



Modelação da radiação solar em ambiente urbano: estudo comparativo entre o Solar Analyst e o R.Sun

Gil GONÇALVES^{1,2}, Pedro POSEIRO³ e Diogo DUARTE⁴

¹ Departamento de Matemática, Universidade de Coimbra (Portugal)

² INESC-Coimbra (Portugal)

³ Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC (Portugal)

⁴ ITC, Universidade de Twente (Holanda)

(gil@mat.uc.pt; pposeiro@lneec.pt; d.a.vicenteamorimduarte@utwente.nl)

Palavras-chave: Radiação Solar, Sistemas Urbanos, Análise espaçotemporal, Solar Analyst, R.Sun

Resumo: A radiação solar é a principal fonte de energia que impulsiona os mais importantes sistemas hidrológicos, climáticos e ecológicos terrestres. Cartografar, à escala urbana, a variação espaçotemporal das componentes da radiação solar é fundamental para estudar os processos físicos e biológicos do sistema urbano, entender os seus microclimas e planear e gerir, inteligentemente, os sistemas energéticos. Neste contexto, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitem integrar, numa mesma plataforma, uma grande variedade de dados espaciais e fornecem uma ferramenta adequada para executar modelos de radiação solar.

Neste artigo, efetua-se uma comparação minuciosa em ambiente urbano entre dois modelos disponíveis em duas plataformas SIG distintas: o Solar Analyst e o R.Sun. Para analisar as componentes direta e difusa da radiação solar, comparam-se os valores mensais obtidos pelos modelos em duas situações: i) duas superfícies, uma superfície horizontal isenta de obstáculos e uma superfície urbana real dotada duma morfologia complexa; ii) duas condições meteorológicas distintas, uma com céu limpo e outra com céu nublado.

Os resultados obtidos mostram que os valores de radiação direta obtidos pelos dois modelos são similares quando se utilizam no Solar Analyst os valores da transmitância atmosférica calculados a partir da expressão da transmitância do R.Sun. No entanto, para a radiação difusa existe uma diferença significativa entre os resultados dos dois modelos. Além disso, a aplicação do facto de visibilidade celeste (SVF – *Sky View Factor*) ao R.Sun melhora substancialmente a correlação entre os modelos.



1. Introdução

As cidades modernas têm um número infindável de microclimas que são influenciados pela radiação solar recebida, pela morfologia urbana, pela composição dos seus elementos (quer naturais, quer antropogénicos) e pela relação espacial entre estes tipos de elementos (Terjung and Louie, 1973). Cartografar, à escala urbana, a variação espacial e temporal da radiação solar é portanto fundamental para estudar os microclimas, compreender os processos físicos e biológicos do sistema urbano e fazer uma gestão e planeamento inteligentes dos seus sistemas energéticos (Terjung and Louie, 1973; Yu et al., 2009) incluindo a implementação, a larga escala (i.e ao nível das coberturas do edificado), de painéis fotovoltaicos, esquemas de financiamento, planeamento e gestão do espaço disponível para instalação destes dispositivos (Brito et al., 2012; Jonsson et al., 2012).

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitem integrar numa mesma plataforma uma grande variedade de dados espaciais e fornecem uma ferramenta adequada, com um excelente custo-benefício, para executar modelos sofisticados de radiação solar (Dubayah and Rich, 1995; Ruiz-Arias et al., 2009). Além disso, a plataforma SIG permite ainda considerar o efeito de sombra no cálculo da radiação solar incidente, o qual é bastante sensível à complexidade urbana devido às diferentes alturas e orientação das construções (Dubayah and Rich, 1995). Os modelos de radiação solar implementados nas diversas plataformas SIG utilizam diferentes algoritmos e complexidades para modelar e parametrizar cada uma das componentes da radiação solar, principalmente a radiação difusa (Robinson and Stone, 2004). O principal *input* dos modelos de radiação solar são os Modelos Digitais de Superfície (MDS) os quais tem vindo a tornar-se mais acessíveis, com maior qualidade e a um custo mais reduzido, devido ao desenvolvimento da tecnologia LiDAR (Yu et al., 2009).

Apesar de existirem algumas publicações sobre a comparação de modelos radiação solar (Ruiz-Arias et al., 2009, Freitas et al, 2015), muito poucas comparam, quantitativamente, os diversos modelos de radiação solar em contexto urbano. Uma das dificuldades que podem existir nesta comparação consiste em parametrizar os diferentes modelos para as mesmas condições atmosféricas. Neste artigo é feita uma comparação minuciosa em ambiente urbano entre dois modelos disponíveis em duas plataformas SIG distintas: o Solar Analyst (SA) e o R.Sun.

2. Modelação da radiação solar urbana em ambiente SIG

A superfície terrestre recebe três tipos de radiação: a radiação direta (R_d), a radiação difusa (R_f) e a radiação reflectida (R_r). A radiação direta é a radiação que atinge a superfície sem que seja desviada por qualquer partícula. É uma função do fluxo solar no topo da atmosfera (radiação extraterrestre), da transmitância atmosférica (τ_a), do ângulo de incidência solar numa dada superfície com declive e das obstruções que se encontram no céu (Dubayah and Rich, 1995). A radiação difusa é a radiação que se dispersa a partir da atmosfera até à superfície. O método mais simples de modelar esta energia consiste em tratar o céu como isotrópico. Uma vez, que no contexto urbano não é suficiente supor que a radiação difusa é isotrópica, dois outros factores são frequentemente considerados: a modelação anisotrópica do campo da radiação e a quantidade de céu visível num ponto (Dubayah and Rich, 1995; Robinson and Stone, 2004), conhecido por factor de visibilidade celeste (*Sky View Factor* - SVF). Como o cálculo das condições anisotrópicas pode ser complexo e com elevado custo computacional (as condições atmosféricas podem mudar rapidamente) muitos autores assumem que a radiação difusa é simplesmente de origem isotrópica e aplicam um factor de visibilidade celeste a cada *pixel* do MDS (Dubayah and Rich, 1995). A radiação reflectida é a componente da radiação proveniente da reflexão do terreno envolvente. É função das propriedades da superfície (albedo), da sua orientação e da posição do sol (Fu and Rich, 1999). No entanto, atendendo a que um dos modelos de radiação solar não considera esta componente (ver tabela 2), neste artigo a radiação reflectida não foi estudada.

A soma das componentes da radiação chama-se radiação global (R_g). Na literatura é comum encontrar que a radiação direta é a componente dominante (Yu et al., 2009). Contudo, a radiação difusa e a radiação reflectida podem assumir valores mais significativos nos casos em que a morfologia da superfície é mais complexa (Ruiz-Arias et al., 2009; Yu et al., 2009), ou ainda, nas situações de céu nublado em que a radiação difusa pode ser a componente dominante (Dubayah and Rich, 1995).

2.1 Aspectos gerais da modelação da radiação solar urbana

Para que um modelo de radiação solar seja considerado adequado é necessário que inclua um conjunto de itens representativos das condições reais (Hofierka and Šúri, 2000): i) a posição instantânea Terra-Sol; ii) a superfície topográfica e os objetos



construídos sobre esta; iii) a atenuação atmosférica em condições de céu limpo, causada por gases e partículas sólidas e líquidas dispersas pelo ar; iv) as condições de nebulosidade.

Para uma estimativa minuciosa da radiação em contexto urbano é importante que o modelo tenha em conta o efeito de sombra causado pelas grandes variações da inclinação e exposição dos objetos existentes. Dois algoritmos são utilizados com frequência: um é baseado no movimento do sol (*Hillshade*) e o outro é baseado na visibilidade de cada ponto da superfície (*Viewshed*). Para o primeiro, a sombra é calculada para uma dada posição solar num determinado período e para todos os pontos e verificam-se quais os pontos estão e não obstruídos. O segundo, calcula uma vista hemisférica para cada ponto, em que se consideram todas as obstruções que afetam esse mesmo ponto (Liu et al., 2012). Para a parametrização da atenuação atmosférica em condições de céu limpo é comum considerar o coeficiente *Linke turbidity* (TLK), o qual está disponível na internet para diferentes partes do mundo (Remund et al. 2003; Liu et al., 2012). Parte da radiação direta atenuada é convertida em radiação difusa, que é quantificada a partir do coeficiente de transmissão difusa τ_f (Liu et al., 2012). Por último, para estimar a atenuação da radiação devida à nebulosidade Hofierka and Šúri (2000), utilizam-se alguns métodos empíricos simples, parametrizados para um tempo médio num intervalo horário, diário ou até mensal, uma vez que é impossível considerar as mudanças instantâneas das nuvens.

Os dois modelos baseados em SIG considerados neste trabalho seguem diferentes métodos para estimar a radiação solar, principalmente a componente da radiação difusa. Ambos foram originalmente desenvolvidos para avaliar os efeitos topográficos na distribuição espacial da radiação solar a larga escala (Yu et al, 2009), ou seja considerando apenas o efeito da variação do relevo natural do terreno num vasto território.

2.2 Solar Analyst

O Solar Analyst é uma extensão do ESRI ArcGis desenvolvida para o ambiente Windows (Fu and Rich, 1999). Este modelo disponibiliza a radiação direta, a radiação difusa e a duração da radiação. O Solar Analyst começa por calcular a bacia de visibilidade (*Viewshed*) e de seguida utiliza uma técnica para dividir, para cada *pixel* do MDS, a cúpula celeste em vários sectores definidos pela elevação solar e azimute (Ruiz-Arias et al., 2009; Robinson and Stone, 2004). A transmitância direta neste modelo é dada por:

$$\tau_d = \tau^{M_S} \quad (1)$$

onde: M_S é a massa de ar percorrida pela radiação até atingir a superfície terrestre a qual é função da altitude do local e do ângulo de elevação solar e τ é a transmitividade para a radiação direta (parâmetro de entrada do modelo).

2.2 R.Sun

O modelo R.Sun é baseado em (Hofierka and Šúri, 2000) e foi desenvolvido para a plataforma de código aberto GRASS GIS. Este modelo calcula, para as condições de céu nublado (que se consideram próximas das reais), as três componentes da radiação solar: direta, difusa e reflectida. A expressão utilizada para calcular a radiação direta é similar à expressão utilizada pelo Solar Analyst. Contudo, a expressão da transmitância atmosférica utilizada pelo R.Sun é a seguinte:

$$\tau_d = e^{-0.866T_{LK}M_R S_R} \quad (2)$$

onde: M_R representa a espessura óptica relativa da massa de ar e S_R a espessura óptica de Rayleigh da massa de ar. As expressões completas para estes parâmetros são dadas em (Hofierka and Šúri, 2000).

3. Materiais e métodos

3.1 Área de estudo e dados

A área de estudo é situada na parte histórica da cidade de Coimbra (Património Mundial da UNESCO) e caracterizada, na parte central, por grandes edifícios pertencentes ao polo I da Universidade de Coimbra e a oeste por pequenas casas, ruas estreitas, algumas com declive acentuado, escadinhas e pátios.

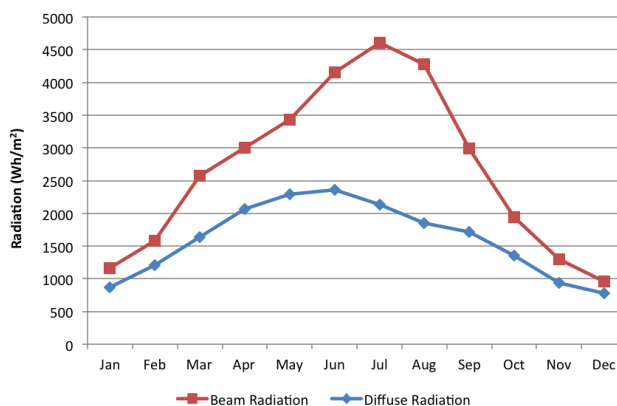
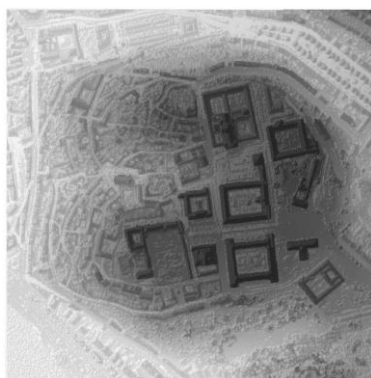


Figura 1 – MDS da área de estudo (esquerda); valores médios mensais medidos para a radiação solar direta e difusa

O varrimento aéreo por Laser, que deu origem ao MDS, foi realizado nos dias 31 de Julho, 1 e 2 de Agosto de 2000 a uma altura média de 850 metros acima do solo. O sistema utilizado foi o Toposys-1 operado com um ângulo de varrimento $\pm 7.1^\circ$, no modo de último retorno e com uma frequência de repetição de pulso (PRF - Pulse Repetition Frequency) de 60 kHz, resultando numa densidade de pontos de aproximadamente 5 pontos/m². Esta nuvem foi depois processada para se obter o MDS (figura 1 – esquerda) com células de 1 m.

Tabela 1 – Valores mensais de TLK, elevação solar máxima e transmitividade atmosférica para Coimbra.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TLK	2.5	2.7	2.9	3	3.5	3.4	3.6	3.2	3.3	3.1	2.6	2.4
α_{max}	28.6	36.7	47.9	59.8	68.8	73.1	71.2	63.6	52.5	41	31.1	26.5
τ_d	0.845	0.819	0.79	0.771	0.73	0.733	0.721	0.754	0.759	0.788	0.835	0.855

Os dados meteorológicos necessários a este estudo constam de: i) valores mensais médios da radiação solar direta e difusa registados no período de 1971-2000 pela estação meteorológica do Observatório Geofísico e Astronómico da Universidade de Coimbra (figura 1 – direita); ii) valores mensais de TLK; iii) os valores máximos do ângulo de elevação solar α_{max} ; iv) os valores da transmitância atmosférica τ_d calculados utilizando a equação 3 (ver 3.2.1).

3.2 Metodologia

As principais diferenças entre os dois modelos de radiação solar são: i) o SA considera apenas as condições de céu limpo e o R.Sun inclui um parâmetro para considerar a nebulosidade; ii) a radiação reflectida que não é calculada no SA; iii) o método de cálculo do efeito sombra que no SA é o *Viewshed* e no R.Sun que é o *Hillshade*; iv) os parâmetros atmosféricos específicos (τ para o SA e τ_{LK} para o R.Sun). Como foi dito anteriormente, a transmitância atmosférica τ_d é o parâmetro que tem maiores implicações e importância nos resultados obtidos para a radiação direta. A comparação relativa entre os dois modelos de radiação solar é feita para as duas componentes da radiação solar quer em condições de céu limpo quer em condições de céu nublado.

3.2.1 – Comparação dos modelos em condições de céu limpo

Para permitir uma comparação entre os resultados dos dois modelos para a radiação direta é necessário parametrizar os modelos de tal forma que estes considerem as mesmas condições atmosféricas. Para o R.Sun, a transmitância atmosférica (Eq. 2) depende do parâmetro TLK. Este valor está disponível para cada mês no SoDa Web Service para Coimbra (tabela 1). No entanto, para o Solar Analyst, a transmitância atmosférica (Eq. 1) depende do parâmetro τ , cujo valor pode ser calculado utilizando a expressão seguinte, a qual é obtida a partir da (Eq. 2):

$$\tau = \left(e^{-0.866 \tau_{LK} M_R S_R} \right) \frac{1}{M_S} \quad (3)$$

Utilizando a expressão anterior e os valores de TLK e α_{max} dados na tabela 1 pode calcular-se para Coimbra e para cada mês, os valores da transmitividade atmosférica para a radiação direta equivalentes aos valores de TLK (ver tabela 1).

3.2.2 – Comparação dos modelos em condições de céu nublado

Apenas o R.Sun está preparado para calcular diretamente a radiação solar para as condições de céu nublado, ao considerar um parâmetro de nebulosidade para cada uma das componentes da radiação solar. Esse parâmetro, também denominado de Índice de céu limpo (*Clear-Sky Index*), não é mais do que o rácio entre a radiação solar obtida pelo modelo para as condições de céu limpo e a radiação solar fornecida por uma estação meteorológica para as condições de céu nublado, ou seja:

$$k_d = \frac{R_{d,r}}{R_{d,m}} \quad ; \quad k_f = \frac{R_{f,r}}{R_{f,m}} \quad (4)$$

onde: R significa radiação, d = direta, f = difusa, r = real, m= modelo; com esta notação $R_{d,r}$ designa a radiação direta real, ou seja, a observada na estação meteorológica. Nestas condições, para calcular a radiação direta e difusa considerando as condições de céu nublado, será necessário estimar previamente os parâmetros mensais k_d e k_f para estas duas componentes e para cada modelo.

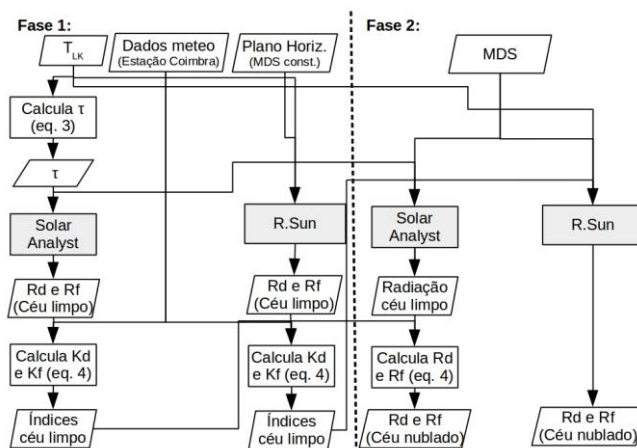


Figura 2 – Metodologia utilizada no cálculo da radiação direta e difusa considerando as mesmas condições de céu nublado nos dois modelos

A figura 2 descreve a metodologia seguida para calcular a radiação solar direta e difusa para condições de céu nublado. Utilizando os dados da estação meteorológica (figura 1 - direita) e um MDS definido como um plano horizontal à cota da estação calculam-se, com a Eq. 4, os índices de céu limpo para as duas componentes (ver parágrafo 3.2.1), obtendo-se a tabela 3.

Tabela 3 – Índices mensais de céu limpo calculados para estação meteorológica de Coimbra.

		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
k_d	SA	0.517	0.474	0.557	0.5	0.514	0.591	0.698	0.703	0.634	0.562	0.517	0.447
	R.Sun	0.463	0.459	0.531	0.482	0.507	0.574	0.676	0.675	0.603	0.538	0.491	0.44
k_f	SA	1.218	1.325	1.58	1.769	1.906	1.881	1.883	1.671	1.718	1.535	1.178	0.997
	R.Sun	1.615	1.714	1.748	1.858	1.602	1.666	1.43	1.513	1.545	1.552	1.605	1.64

Depois, numa segunda fase, utilizando estes índices e o MDS da área de estudo calculam-se as duas componentes da radiação para os dois modelos. No R.Sun os índices são introduzidos diretamente como parâmetros de entrada no modelo. No SA é necessário multiplicar cada uma das componentes da radiação calculada pelo modelo pelos coeficientes de céu limpo (ver eq. 4).

3.2.3 – Factor de visibilidade de céu

Como vimos anteriormente os dois modelos utilizam diferentes estratégias para o cálculo do efeito de sombra causado pelos objetos existentes no MDS. O levantamento das obstruções na componente da radiação difusa é um processo complexo, tanto mais quanto maior a complexidade da modelação da radiação difusa. O SA faz o levantamento das obstruções para a radiação difusa do mesmo modo que faz para a radiação direta. Este assunto não é muito claro por parte dos autores, porque a radiação difusa de acordo com as componentes isotrópicas e anisotrópicas consideradas, teria de ter uma abordagem diferente para cada

uma delas. Depois de realizadas algumas experiências com SA parece-nos que o procedimento utilizado se enquadra no que explica Robinson e Stone (2004) em que aplica um SVF para considerar as obstruções. Assim, para considerar o SVF na radiação difusa R_f utiliza a seguinte expressão:

$$\hat{R}_f = R_f \times SVF \quad (5)$$

Em relação ao R.Sun, a teoria mostra que o modelo diferencia nesta componente os elementos que estão a ser irradiados diretamente e os que estão em sombra. Depois de algumas experimentações com o modelo, algumas dúvidas surgiram em relação a este assunto, pelo que, se pretende comparar os modelos antes e depois de aplicar o SVF no R.Sun, uma vez que o Solar Analyst já o considera. Com auxílio do software SAGA - System for Automated Geoscientific Analyses (www.saga-gis.org) e utilizando o MDS de Coimbra, pode obter-se facilmente o mapa de SVF de Coimbra com valores a variar entre 0 e 1, sendo que 0 significa a obstrução total e 1 todo o horizonte desobstruído.

4. Resultados e discussão

4.1 Comparação dos modelos em condições de céu limpo

A Figura 4 (esquerda) mostra os resultados obtidos pelos modelos para a radiação direta na estação meteorológica de Coimbra, considerando condições de céu limpo e utilizando os parâmetros os valores dos parâmetros TLK e τ calculados anteriormente (tabela 1). Os diferentes métodos utilizados pelos modelos no cálculo do efeito de sombra (*Hillshade* e *Viewshed*), não influenciou os resultados obtidos para esta componente. De acordo com a figura 4 (esquerda), podemos confirmar que os dois modelos fornecem resultados semelhantes para a radiação direta em condições de céu limpo. A diferença entre os modelos é sempre inferior a 250 Wh.m⁻² dia⁻¹.

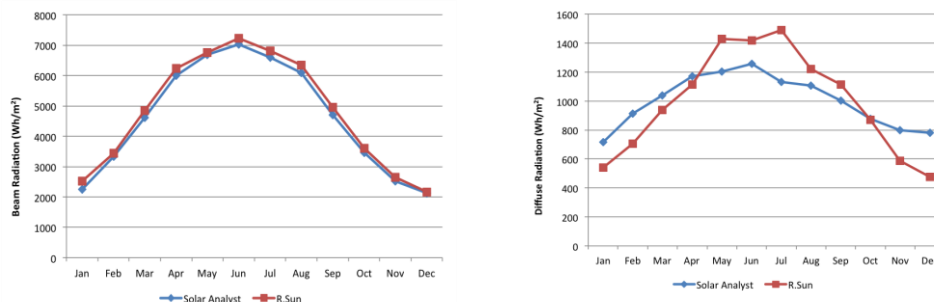


Figura 4 – Comparação dos modelos para as condições de céu limpo numa superfície horizontal: Rd (esq.); Rf (direita)

A figura 4 (direita) mostra os resultados obtidos para a radiação difusa. No caso do Solar Analyst utilizaram-se para o parâmetro τ os valores definidos na tabela 3 e para o parâmetro de difusão o valor por defeito 0.2. Para o R.Sun utilizaram-se para o parâmetro TLK os valores dados na tabela 1. Observa-se nesta figura que os resultados obtidos pelos dois modelos diferem significativamente. Nos meses mais frios, o Solar Analyst fornece valores maiores que o R.Sun. Nos meses mais quentes (Maio a Setembro), acontece o contrário. Por último, esta figura permite-nos concluir que os dois modelos seguem diferentes metodologias para o cálculo da componente difusa.

4.2 Comparação dos modelos em condições de céu nublado e em zona urbana

4.2.1 – Radiação direta

Para analisar as diferenças entre os dois modelos no cálculo da radiação direta, considerou-se a complexa zona urbana histórica de Coimbra e com resultados obtidos pelos dois modelos, construíram-se gráficos de dispersão para dois meses distantes (Janeiro e Julho), calcularam-se os coeficientes de determinação R^2 e o erro médio quadrático (REMQ) obtido para cada uma das regressões lineares (Tabela 4). Analisando os resultados obtidos, verifica-se a existência de uma grande concordância entre os dois modelos para o mês de Janeiro. Contudo, para o mês de Julho verifica-se que existe uma ligeira discordância entre os modelos para determinados pixels: os pixels assinalados a vermelho representam as diferenças entre os modelos superiores a 250Wh.m⁻² .dia⁻¹.

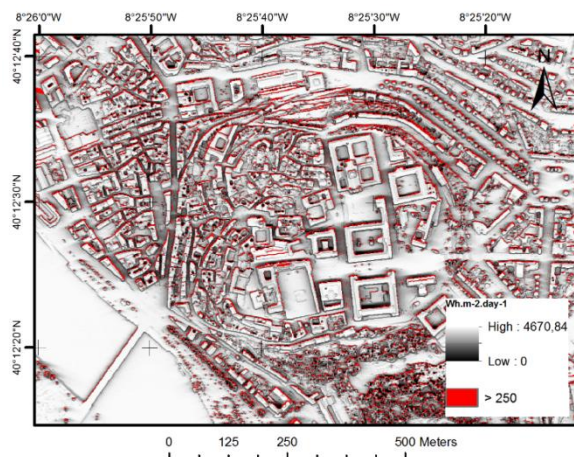


Figura 5 – Mapa de radiação solar direta para Julho mostrando as diferenças entre os dois modelos

Para analisarmos espacialmente as diferenças existentes entre os modelos para o mês de Julho, construímos (figura 5) o mapa das diferenças e identificámos a vermelho os pixels com diferenças superiores a 250 Wh.m-2.dia-1. Verificamos assim que as áreas onde existe maior diferença entre os modelos estão localizadas principalmente nas fachadas do sector norte (NO, NE) dos edifícios. Estas pequenas diferenças podem ser devidas ao procedimento utilizado em cada modelo para calcular o efeito de sombra. No entanto, como a correlação entre os dois modelos é excelente, podemos concluir que, em geral, estes dois procedimentos (*Viewshed* para o SA e *Hillshade* para o R.Sun) serão equivalentes.

Tabela 4 – Análise da relação linear entre os modelos de radiação solar.

Área de estudo		Janeiro		Julho	
		R ²	REMQ	R ²	REMQ
	R _d	0.994	49.92	0.895	401.48
	R _f	0.196	180.83	0.469	231.08
R.Sun com SVF	R _f	0.692	91.75	0.784	284.95

4.2.2 – Radiação difusa

Para o caso da radiação difusa os valores do coeficiente R² e do REMQ (em Wh.m-2.dia-1) da regressão linear entre os dois modelos, para os meses de Janeiro e Julho, são dados na segunda linha da tabela 4. Ao contrário do observado para a radiação direta, a radiação difusa não tem qualquer correlação entre os modelos para os meses considerados. Com vista a identificar os locais onde essas diferenças são mais evidentes procedeu-se à elaboração dos mapas de diferenças (fig. 6). O modelo R.Sun é mais sensível à variação da orientação do que o SA. No mapa de Julho é evidente que a modelação da superfície da radiação difusa varia no Solar Analyst e parece manter-se invariável no espaço no modelo R.Sun. O modelo R.Sun parece não considerar qualquer efeito de sombra na radiação solar difusa criado pelos edifícios, à exceção dos limites/fachadas dos mesmos.

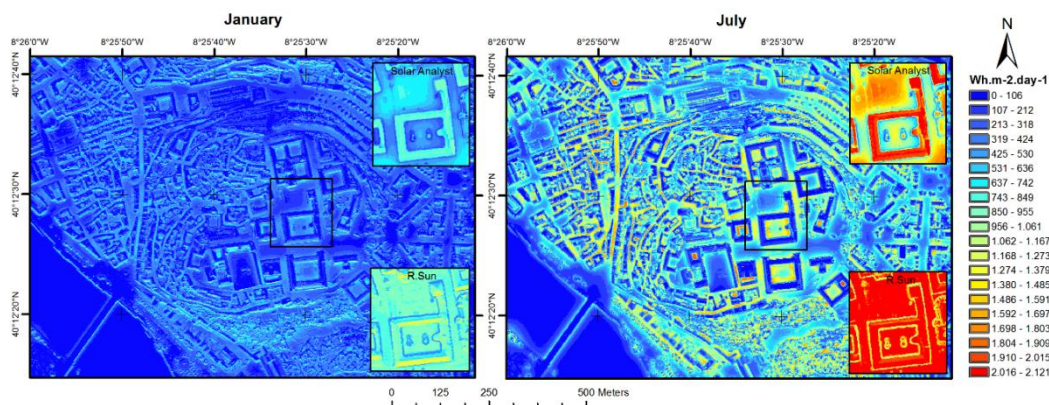


Figura 6 – Mapa das diferenças da radiação difusa entre os modelos para janeiro (esquerda) e julho (direita)



Por último, para analisar o efeito da integração do SVF no R.Sun utilizaram-se gráficos de dispersão e calculou-se a correlação entre os dois modelos. Apesar de se verificar um aumento significativo da correlação para a radiação difusa (tabela 4, linha 3), o valor obtido para o coeficiente R^2 é muito inferior ao valor obtido para a radiação direta.

5. Conclusões

Tal como seria de esperar, os resultados da radiação direta foram muito similares quando se utilizou a (Eq. 3) no cálculo do parâmetro τ do Solar Analyst. Para a radiação difusa constatou-se uma diferença de resultados e de metodologia utilizada por cada modelo. A aplicação do SVF aumenta a correlação entre as radiações difusas calculadas pelos modelos, devida sobretudo a uma melhor aproximação entre os valores de radiação das áreas que envolvem os edifícios e não dos valores das suas coberturas. Ainda em relação a esta componente, o peso desta componente torna-se ainda mais elevado quando se consideram as condições de céu nublado, em que esta componente pode tornar-se a dominante em relação à radiação direta. Além disso os índices de céu limpo a atribuir à radiação difusa aumentam os valores desta componente, enquanto que para a radiação direta, a diminuem. Também em locais mais expostos ao efeito das sombras pelos edifícios circundantes, podem apresentar maiores índices de radiação difusa. Uma das vantagens de utilizar o R.Sun em relação ao SA é que o primeiro pode ser executado diretamente, uma vez que facilmente se podem obter os parâmetros de entrada do modelo.

Como trabalho futuro consideramos importante melhorar a modelação da radiação difusa, uma vez que em condições de céu nublado esta componente pode assumir valores superiores aos da radiação direta.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no contexto da Initiative Energy for Sustainability of the University of Coimbra, suportado pelo projeto Energy and Mobility for Sustainable Region (CENTRO-07-0224-FEDER-002004) e financiado parcialmente pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito do projeto PEst-OE/ EEI/UI308/2014. Os autores agradecem também à IT-GEO, Tecnologias e Informação Georreferenciada, S.A., pela cedência do MDS LiDAR.

Referências Bibliográficas

- Brito, M., Gomes, N., Santos, T., and Tenedório, J. (2012). Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using lidar data. *Solar Energy*, 86(1):283 – 288.
- Dubayah, R. and Rich, P. M. (1995). Topographic solar radiation models for gis. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(4):405–419.
- Fu, P. and Rich, P. M. (1999). Design and implementation of the solar analyst: an arcview extension for modeling solar radiation at landscape scales. In *Proceedings of the 19th annual ESRI User Conference*, San Diego, USA.
- Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., Brito, M. Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 41, January 2015, Pages 915-931,
- Hofierka, J. and Šúri, M. (2000). The solar radiation model for open source gis: implementation and applications. *Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference*, pag. 1–19.
- Liu, M., Bárdossy, A., Li, J., and Jiang, Y. (2012). Gis-based modelling of topography-induced solar radiation variability in complex terrain for data sparse region. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(7):1281–1308.
- Nguyen, H. T. and Pearce, J. M. (2012). Incorporation shading losses in solar photovoltaic potential assesement at the municipal scale. *Solar Energy*, pag.1245– 1260.
- Remund, J., Wald, L., Lefevre, M., Ranchin, T., and Page, J. (2003). Linke turbidity information. In *proceedings of ISES Solar World Congress*, Sweden, pag. 16–19.
- Robinson, D. and Stone, A. (2004). Solar radiation modelling in the urban context. *Solar Energy*, Vol 77(3), pag. 295–309.
- Ruiz-Arias, J. A., Tovar-Pescador, J., Pozo-Vázquez, D., and Alsamamra, H. (2009). A comparative analysis of dem-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(8):1049–1076.
- Terjung, H. W. and Louie, S. S. (1973). Solar radiation and urban heat islands. *Annals of the Association of American Geographers*, 63(2):181–207.
- Yu, B., Wy, H. L. J., and Lin, W. (2009). Investigating impacts of urban morphology on spatio-temporal variations of solar radiation with airborne lidar data and a solar flux model: a case study of downtown Houston. *International Journal of Remote Sensing*, 30(17):4359–4385.