



A utilização de modelos SIG 3D na determinação da exposição solar

Rita MACHETE¹, Sónia ILDEFONSO¹, Ana Paula FALCÃO¹, Maria Glória GOMES¹

¹ Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

(rita_machete@msn.com; sonia.ildefonso@tecnico.ulisboa.pt; anapmfflor@gmail.com; mgloria@civil.ist.utl.pt)

Palavras-chave: SIG 3D, Radiação Solar, Fachadas

Resumo: A análise da radiação solar em meio urbano aparece correntemente limitada a abordagens bidimensionais que recorrem a uma operação artificial de combinação da superfície edificada com o modelo digital do terreno. Nestes casos, o enfoque recai apenas sobre a medição da radiação solar nas coberturas. Já em abordagens tridimensionais, a análise restringe-se ao edifício encarado como entidade isolada. Porém, não se deve ignorar que a morfologia do terreno e da envolvente construída condiciona os resultados.

O caso de estudo corresponde a uma secção da Baixa de Lisboa, modelada em ambiente tridimensional no *software CityEngine (Esri)* que, recorrendo a regras de gramática de forma, possibilita a obtenção de informação padrão das fachadas, com grande utilidade para o estudo. Para a análise do potencial solar elegeu-se o *software* de simulação ambiental *Ecotect (Autodesk)*, devido às ferramentas de cálculo que disponibiliza e à sua compatibilidade com o *software* anterior.

Este trabalho visa determinar a influência da morfologia urbana no cálculo detalhado da exposição solar ao nível das coberturas e das fachadas dos edifícios, tendo em atenção a natureza dos respetivos revestimentos. Este estudo está a ser realizado no âmbito de uma dissertação do mestrado em Arquitetura no Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos (IST-UL).



1. Introdução

Os modelos de potencial solar estimam a radiação solar que atinge um determinado local na superfície terrestre, seja de forma direta ou indireta, sendo necessário ter em conta fatores geográficos, meteorológicos e temporais. Cálculos mais detalhados exigem o conhecimento orográfico através de um Modelo Digital de Superfície (MDS) que combina os elementos existentes com o Modelo Digital do Terreno (MDT) (Freitas *et al.*, 2014).

Estudos anteriores de radiação solar consideravam apenas cenários não urbanos ou coberturas individuais, pela dificuldade de obter modelos de superfície de áreas urbanas e porque, em áreas não urbanas, o modelo de superfície é equivalente ao modelo de terreno, que existe praticamente para qualquer área embora com níveis de detalhe muito diversos. Com a evolução das ferramentas de cálculo, a problemática pôde ser abordada para modelos com maior detalhe, como por exemplo apenas num edifício, com software CAD (*Computer Aided Design*) ou numa escala macro com ferramentas de análise espacial em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Neste último caso a ferramenta pode ser diretamente aplicada à informação relativa à superfície terrestre. Contudo, o mesmo não se pode dizer da informação relativa ao edificado, pois presentemente não possui essa funcionalidade.

Existem duas formas de obter um MDS para o meio urbano: i) através da aquisição de uma nuvem de pontos 3D que permite a reconstrução geométrica dos elementos (com base em levantamentos com fotografia aérea, sistemas não tripulados de recolha de dados (UAV) ou *Light Detection And Ranging* (LIDAR)); ii) através de modelação procedimental e paramétrica, onde os elementos modelados são combinados com a informação presente no MDT.

Na segunda alternativa, a informação geográfica de base SIG (informação CAD) é associada a regras de modelação procedimental. Em ambiente urbano, onde se observe uma morfologia com forte dominante modular (simetria e repetição), é possível desenvolver um modelo capaz de captar a identidade local (Aliaga, 2012). O software da *ESRI – CityEngine* - permite este tipo de modelação, suportada por linguagem de programação (*Computer Generated Architecture - CGA*).

Em resposta às preocupações com o potencial solar, encontram-se disponíveis na literatura modelos de análise de radiação solar, que visam identificar as localizações mais favoráveis para a instalação de painéis fotovoltaicos ou de captação de energia solar, de forma a melhorar os modelos energéticos e a promover um design de cidades sustentáveis (Santos *et al.*, 2011; Chow *et al.*, 2014).

No caso de Santos *et al.* (2011) é apresentada uma metodologia de cálculo de exposição solar em ambiente SIG, recorrendo previamente à integração, num modelo único, da informação altimétrica relativa ao edificado e do modelo digital do terreno. Chow *et al.* (2014) explora a apresentação dos cálculos da radiação solar em ambiente tridimensionais, através da extrusão dos volumes dos edifícios, discretizando os resultados de acordo com os alçados.

Redweik *et al.* (2011, 2013) e Hofierka e Zlocha (2012), que trabalham com modelos 3D usam, respectivamente, um modelo derivado de informação LiDAR e um modelo derivado de informação fotogramétrica. Uma área em sombra não recebe radiação directa. Logo, é necessário criar um mapa de sombras para cada instante, produzindo um atributo binário associado com o local e o instante temporal em estudo. Este cálculo pode ser efectuado para cada pixel (Redweik *et al.*, 2011) ou para uma grelha (Hofierka e Zlocha, 2012).

Este trabalho visa determinar a influência do contexto urbano nas simulações computacionais ambientais, especificamente, de análise da radiação solar ao nível das coberturas e fachadas dos edifícios. O estudo foca essencialmente algumas características dos modelos digitais utilizados para o efeito, como a dimensão e a relevância do terreno e da envolvente construída, e as propriedades dos respectivos materiais de revestimento.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo e construção do modelo em 3D-SIG

Como área de estudo foi considerada uma secção da Baixa de Lisboa, que, por ter uma estrutura urbana regular e uma arquitetura de carácter modular, é favorável à aplicação de regras CGA (figura 1).

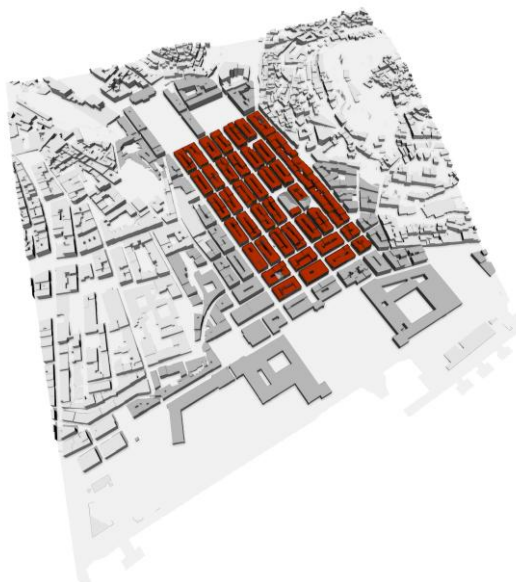


Figura 1 – Vista geral da área de estudo

O modelo foi criado a partir dos dados cedidos pela Câmara Municipal de Lisboa - a rede viária e os polígonos de implantação dos edifícios. Associado a cada edifício, encontra-se um conjunto de informação sob a forma de atributos, tais como, a tipologia de ocupação, o revestimento de fachada e o número de pisos.

Programaram-se três níveis de detalhe alternativos, sendo o 'detalhe' um aspeto que condiciona o tempo de computação (simulação) e o rigor dos resultados: i) apenas a representação volumétrica dos edifícios, através da extrusão do polígono de implantação, tendo por base o valor da altura do piso e o número de pisos; ii) a partição das superfícies (fachadas e cobertura) em painéis - grelha triangular, com catetos de três metros; e finalmente iii) a parametrização das fachadas, considerando as variações de pé direito entre pisos e as suas características próprias, nomeadamente os detalhes arquitetónicos e os materiais de revestimento (figura 2). Sendo o estudo focado na análise das fachadas, o detalhe das coberturas foi propositadamente desprezado.



Figura 2 – Dois exemplos que diferem entre si na tipologia de fachada e nos materiais de revestimento, modelados em ambiente 3D-SIG

A partição das superfícies de fachada e de cobertura em painéis conduz ao aumento da quantidade de pontos de medição por edifício e, conseqüentemente, a um acréscimo de exatidão nos resultados.

2.2 Objeto de análise

Para o estudo da influência do contexto nos resultados da simulação, foi eleito um quarteirão localizado no extremo norte-nascente do núcleo central da Baixa. Tendo por base esse quarteirão, foram tidos em consideração dois fatores - a 'dimensão do contexto' e a 'relevância da envolvente construída'. Da sua combinação, resultaram os seguintes cenários de análise (figura 3):

C1.a : secção com aproximadamente 1000 m x 1300 m, considerando a envolvente edificada do quarteirão;

C1.b : secção com aproximadamente 1000 m x 1300 m, desprezando a envolvente edificada do quarteirão;

C2.a : secção com aproximadamente 160 m x 190 m, considerando a envolvente edificada do quarteirão;

C2.b : secção com aproximadamente 160 m x 190 m, desprezando a envolvente edificada do quarteirão;

C3 : sem contexto (quarteirão isolado).

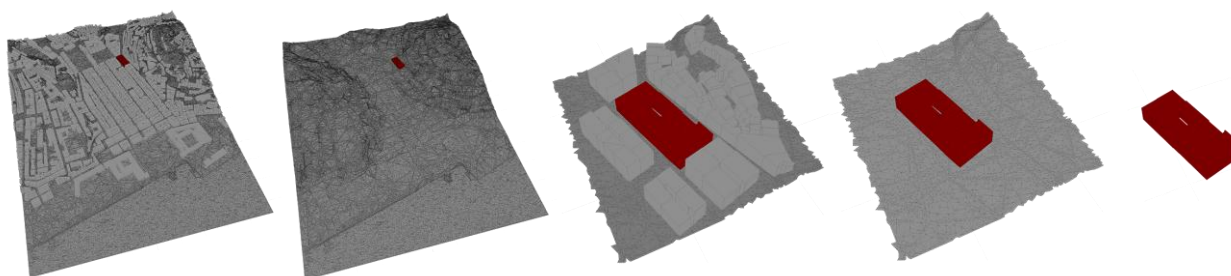


Figura 3 – Cenários, com o quarteirão assinalado a vermelho. Da esquerda para a direita: C1a, C1b, C2a, C2b e C3.

Para o estudo específico do impacto da componente reflectida na radiação solar global simulada, foram considerados um plano de fachada orientado a Oeste, e os edifícios circundantes. Para estes, ativou-se o nível de detalhe iii do modelo, resultando numa associação automática (previamente programada) dos respetivos materiais de revestimento (figura 4). De forma a reduzir, posteriormente, o tempo de computação da simulação, eliminaram-se todos os elementos do modelo, exeto aqueles que potencialmente provocariam algum efeito de reflexão (edifícios adjacentes e fronteiros e superfície de pavimento).

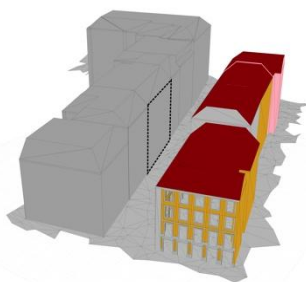


Figura 4 – Plano de fachada analisado e elementos circundantes

2.3 Cálculo da Radiação Solar em *Ecotect*

Para o cálculo do potencial solar foi utilizado o software *Ecotect*, por ser um simulador ambiental e por ser compatível com um dos formatos de saída do *CityEngine*. As suas ferramentas, em conjunto com um ficheiro climático associado a uma localização geográfica particular (para o caso de estudo, as coordenadas da cidade de Lisboa), permitem o cálculo da radiação para cada entidade do modelo, e a leitura dos resultados, no próprio ambiente tridimensional (associação dos valores a uma escala cromática) ou em forma de tabela de dados ou gráfico. É também possível limitar o cálculo a uma ou várias superfícies selecionadas, de modo a obter pontualmente o impacto causado pelos elementos imediatamente adjacentes.

2.4 Resultados

Em ambos os pontos estudados, os cálculos foram efetuados para os solstícios de verão (21 de Junho) e inverno (21 de Dezembro), que representam os momentos mais significativos do ano, e possibilitam uma compreensão geral da realidade a partir de um número reduzido de observações (figura 5).

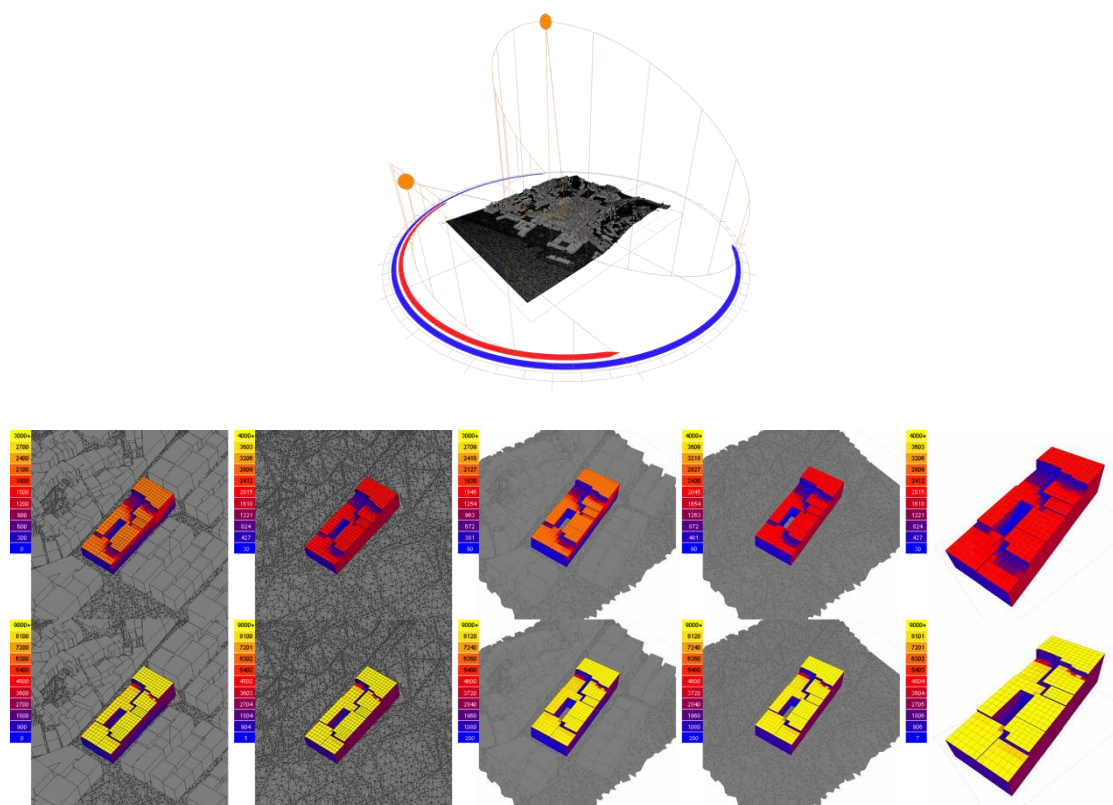


Figura 5 – Em cima: Trajetória solar (meio dia) para o solstício de inverno (esquerda) e o solstício de verão (direita). Em baixo: Radiação solar global (Wh/m²) medida nos solstícios de inverno (linha superior) e verão (linha inferior). Da esquerda para a direita: C1.a, C1.b, C2.a, C2.b e C3.

Em seguida, os resultados obtidos para os cinco cenários e para as duas datas do ano foram agrupados e comparados entre si, numa tentativa de caracterização da variação relativa. Da combinação dos cenários, dois a dois, foi possível determinar os valores máximo e mínimo, a média (\bar{x}), a mediana e o desvio padrão (σ), conforme apresentado nos Quadros 1 a 6, onde a última variável representa a variabilidade das leituras. Os valores estão discriminados por orientação de fachada (norte, sul, este e oeste) e cobertura (versão plana, simplificada).

Quadro 1 – Variação da radiação solar global (Wh/m²) entre os cenários C1.a e C2.a, nos solstícios de inverno e verão.

	21-Dez					21-Jun				
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
Nº de Painéis	327	96	210	72	162	327	96	210	72	162
Máximo	5,11	45,73	133,24	14,63	48,70	45,18	62,17	42,95	35,18	236,74
Mínimo	0,00	0,00	0,00	1,64	0,00	0,00	0,00	0,00	3,95	0,00
Média (\bar{x})	2,40	4,48	4,85	4,05	2,83	8,90	5,29	8,13	9,75	10,89
Mediana	2,56	0,36	1,24	3,07	0,49	6,19	0,86	2,98	7,39	1,15
Desvio padrão (σ)	1,54	10,39	13,94	2,48	7,47	10,56	10,81	9,72	5,96	39,77



Quadro 2 – Variação da radiação solar global (Wh/m²) entre os cenários C1.b e C2.b, nos solstícios de inverno e verão.

	21-Dez					21-Jun				
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
Nº de Painéis	327	96	210	72	162	327	96	210	72	162
Máximo	13,05	156,93	13,77	10,98	135,69	113,16	101,63	33,11	26,41	644,15
Mínimo	0,38	3,65	0,00	4,42	0,00	0,90	10,10	0,00	10,64	0,00
Média (\bar{x})	6,63	33,71	9,31	7,66	20,01	46,73	27,65	22,40	18,88	187,00
Mediana	5,82	9,55	9,33	7,73	11,74	48,20	21,79	22,45	19,50	118,58
Desvio padrão (σ)	2,80	37,01	2,22	2,05	27,80	21,52	18,41	5,35	4,75	196,38

Quadro 3 – Variação da radiação solar global (Wh/m²) entre os cenários C1.a e C1.b, nos solstícios de inverno e verão.

	21-Dez					21-Jun				
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
Nº de Painéis	327	96	210	72	162	327	96	210	72	162
Máximo	101,89	3052,48	1176,11	233,20	373,31	193,39	1855,81	1357,45	560,90	1773,54
Mínimo	0,76	0,56	0,00	42,85	0,00	1,82	0,79	0,00	103,07	0,00
Média (\bar{x})	7,27	2202,18	563,45	145,93	202,55	33,36	566,29	516,84	352,86	838,51
Mediana	3,06	2891,92	628,18	150,05	217,81	6,67	551,47	331,69	360,91	892,70
Desvio padrão (σ)	15,41	1190,86	409,98	54,49	121,19	50,85	456,72	466,42	132,99	565,54

Quadro 4 – Variação da radiação solar global (Wh/m²) entre os cenários C2.a e C2.b, nos solstícios de inverno e verão.

	21-Dez					21-Jun				
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
Nº de Painéis	327	96	210	72	162	327	96	210	72	162
Máximo	107,56	3058,91	1188,73	240,63	376,18	261,89	1866,27	1385,97	578,77	2096,79
Mínimo	1,77	15,64	0,00	41,96	0,00	5,40	22,22	0,00	115,23	0,00
Média (\bar{x})	11,50	2231,45	567,91	149,53	219,73	71,19	588,73	531,12	361,99	1014,62
Mediana	7,35	2929,70	634,98	154,74	242,90	51,26	571,07	348,12	372,19	1080,18
Desvio padrão (σ)	16,16	1180,98	410,31	56,13	113,50	54,77	450,36	472,32	136,10	568,36

Quadro 5 – Variação da radiação solar global (Wh/m²) entre os cenários C1.b e C3, nos solstícios de inverno e verão.

	21-Dez					21-Jun				
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
Nº de Painéis	327	96	210	72	162	327	96	210	72	162
Máximo	16,26	3126,07	1408,19	15,51	675,14	166,21	2368,05	2379,94	61,15	3708,54
Mínimo	0,38	89,98	5,10	5,11	130,76	0,90	25,10	12,26	36,13	472,87
Média (\bar{x})	9,37	778,87	16,03	9,29	242,87	68,68	555,30	33,75	46,19	1391,34
Mediana	9,83	122,78	9,35	9,11	154,81	59,61	56,15	22,50	45,76	1032,71
Desvio padrão (σ)	3,57	1244,83	96,55	2,94	171,57	23,67	960,26	162,76	7,07	1072,10

Quadro 6 – Variação da radiação solar global (Wh/m²) entre os cenários C2.b e C3, nos solstícios de inverno e verão.

	21-Dez					21-Jun				
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
Nº de Painéis	327	96	210	72	162	327	96	210	72	162
Máximo	9,57	3101,05	1408,19	6,08	675,14	55,27	2355,69	2379,94	38,46	3708,54
Mínimo	0,00	1,02	0,00	0,38	46,74	0,00	2,45	0,00	10,44	36,53
Média (\bar{x})	2,74	745,15	6,71	1,63	222,86	21,95	527,65	11,35	27,30	1204,34
Mediana	1,16	115,15	0,00	1,33	142,11	11,05	37,81	0,00	27,02	726,54
Desvio padrão (σ)	3,13	1231,36	97,17	1,13	168,03	22,06	945,95	164,23	3,83	1141,56



O seguinte quadro resumo apresenta os valores médios da radiação solar global e a sua variação (diferença) entre os diferentes cenários:

Quadro 7 – Quadro resumo dos valores médios da radiação solar global (Wh/m²), em cima, e das diferenças verificadas entre os cenários, em baixo.

	21-Dez					21-Jun				
	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este	Cobertura	Sul	Oeste	Norte	Este
C1a	1973,48	319,72	920,30	294,72	315,52	8175,49	1475,29	2047,69	936,43	1691,94
C1b	1980,76	2521,89	1483,75	440,65	518,07	8208,90	2041,59	2564,53	1289,29	2530,45
C2a	1975,88	324,16	925,16	298,77	318,35	8184,35	1480,51	2055,81	946,18	1702,83
C2b	1987,38	2555,61	1493,07	448,31	538,08	8255,57	2069,24	2586,93	1308,17	2717,45
C3	1990,13	3300,76	1499,78	449,94	760,94	8277,59	2596,89	2598,28	1335,48	3921,79
C1a - C2a	-2,40	-4,45	-4,85	-4,05	-2,83	-8,86	-5,22	-8,13	-9,75	-10,89
C1b - C2b	-6,62	-33,71	-9,31	-7,66	-20,01	-46,67	-27,65	-22,40	-18,88	-187,00
C1a - C1b	-7,27	-2202,18	-563,45	-145,93	-202,55	-33,41	-566,29	-516,84	-352,86	-838,51
C2a - C2b	-11,49	-2231,45	-567,91	-149,53	-219,73	-71,22	-588,73	-531,12	-361,99	-1014,62
C1b - C3	-9,37	-778,87	-16,03	-9,29	-242,87	-68,68	-555,30	-33,75	-46,19	-1391,34
C2b - C3	-2,75	-745,15	-6,71	-1,63	-222,86	-22,02	-527,65	-11,35	-27,30	-1204,34

Os valores de radiação diminuem, quando se aumenta a dimensão do contexto (modelo mais abrangente, menos localizado) e se inclui na análise a envolvente edificada. Quanto mais detalhado e completo for o modelo, maior é o nível de obstrução à radiação incidente sentido nas fachadas em análise.

No caso da avaliação do impacto da componente refletida na radiação solar global, ao longo dos dois dias (solstício de inverno e solstício de verão), apresentam-se os seguintes resultados (Quadros 8 e 9):

Quadro 8 – Exposição Solar Horária, ao longo do dia 21 de Dezembro, medida na fachada em estudo (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °)

Hora	Radiação Directa Normal	Radiação Difusa em Plano Horizontal	Ângulo de Incidência	Percentagem de Área Sombreada	Radiação Reflectida	Radiação Incidente		Radiação Absorvida	
	W/m ²	W/m ²	°	%	W/m ²	W/m ²	W	W/m ²	W
8:00	128	76	>90,00	100%	0	24	6761	9	2633
9:00	169	137	>90,00	100%	0	43	12188	17	4746
10:00	429	148	>90,00	100%	0	46	13167	18	5127
11:00	597	131	>90,00	100%	0	41	11655	16	4538
12:00	751	97	82,31	2%	0,1	129	36841	50	14355
13:00	526	131	68,76	10%	0,1	213	60875	83	23717
14:00	583	93	54,74	63%	0,3	154	44191	60	17246
15:00	193	81	39,49	82%	0,8	51	14735	20	5829
16:00	216	14	28,22	88%	1,1	27	7659	11	3100
Totais					2	726	208073	284	81293

Quadro 9 – Exposição Solar Horária, ao longo do dia 21 de Junho, medida na fachada em estudo (Área de superfície: 286,421 m²; Azimute: -106,70 °; Altitude: 0,00 °)

Hora	Radiação Directa Normal	Radiação Difusa em Plano Horizontal	Ângulo de Incidência	Percentagem de Área Sombreada	Radiação Reflectida	Radiação Incidente		Radiação Absorvida	
	W/m ²	W/m ²	°	%	W/m ²	W/m ²	W	W/m ²	W
6:00	351	187	>90,00	100%	0	58	16637	23	6479
7:00	545	212	>90,00	100%	0	66	18861	26	7345
8:00	695	202	>90,00	100%	0	63	17971	24	6998



9:00	813	169	>90,00	100%	0	52	15035	20	5855	
10:00	895	133	>90,00	100%	0	41	11833	16	4608	
11:00	920	126	>90,00	100%	0	39	11210	15	4365	
12:00	920	126	>90,00	100%	0	39	11210	15	4365	
13:00	895	133	80,62	2%	0,2	184	52790	72	20582	
14:00	813	169	68,45	2%	0,9	345	98875	135	38604	
15:00	695	202	56,88	10%	1,4	405	116087	158	45358	
16:00	545	212	44,54	37%	0,2	310	88676	121	34556	
17:00	351	187	36,86	63%	0,5	163	46605	64	18201	
18:00	32	120	37,74	67%	0,1	46	13092	18	5104	
Totais						3	1812	518882	707	202420

Observa-se que, em ambos os casos, a radiação refletida medida, é nula até o sol atingir o meio-dia. A orientação dos edifícios e a largura da rua parecem justificar a condição de sombreamento total da fachada analisada, durante esse período. Nas restantes horas de sol, a fachada está claramente exposta à radiação direta, sendo a componente refletida praticamente desprezável.

3. Conclusões

Na simulação computacional da radiação solar recebida por qualquer superfície em contexto urbano, verifica-se uma relação direta entre as características do modelo tridimensional utilizado e o resultado. Quanto mais realista for a representação do tecido urbano (morfologia do terreno e do edificado) mais rigoroso é o resultado. A extensão do modelo tem também uma participação positiva, no sentido do rigor, pois quanto maior a área de influência, melhor a contextualização do elemento em análise, porém com custos no tempo computacional.

O estudo demonstra que para se reduzir o tempo de simulação, poderá ser utilizado um modelo contextual menos extenso, salvaguardando-se contudo a importância da inclusão dos potenciais elementos de sombreamento da envolvente próxima, que irão influenciar o mapa de sombras, como por exemplo, os edifícios de grande altura e as vertentes com declive muito acentuado.

Referências Bibliográficas

- Aliaga, D. G. (2012). 3D design and modeling of smart cities from a computer graphics perspective. International Scholarly Research Notices, 2012
- Carneiro, C., Morello, E., Ratti, C. & Golay, F. (2008) Solar Radiation over the Urban Texture: Lidar Data and Image Processing Techniques for Environmental Analysis at City Scale. Proceedings of the 3D Geoinfo Conference, Seoul, 13-14 November 2008.
- Chow, A.; Fung, A.S.; Li, S. (2014) GIS modeling of solar neighborhood potential at a fine spatiotemporal resolution. Buildings 2014, 4, 195–206
- Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., & Brito, M. C. (2014). Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 915-931.
- Hofierka, J. and Zlocha, M. (2012) A new 3-D Solar radiation model for 3-D city models, Transactions in GIS, 16(5), pp. 681–680.
- Redweik, P., Catita, C. and Brito, M.C. (2011) 3D local scale solar radiation model based on urban LIDAR data, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-4/W19. ISPRS Hannover 2011 Workshop, Germany.
- Redweik, P.; Catita, C.; Brito, M. (2013) Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape, Solar Energy 97, 332-341.
- Santos, T., Brito, M., Freire, S., Fonseca, A., and Tenedório, A. (2011) Solar potential analysis in Lisbon Using LIDAR data, Remote Sensing and Geoinformation, pp. 13-19.