



Modelação de dados geográficos para determinação do potencial uso sustentável de coberturas de edifícios

Teresa SANTOS^{1*}; José António TENEDÓRIO¹; José Alberto GONÇALVES²

¹ CICS.NOVA - Centro Interdisciplinar de Ciências Sociais, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa

² CIIMAR - Centro Interdisciplinar de Investigação Marinho e Ambiental, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto

(teresasantos@fcsh.unl.pt; já.tenedorio@fcsh.unl.pt; jajagoncal@fc.up.pt)

Palavras-chave: LiDAR, WorldView-2, Coberturas, Solar

Resumo: A comunicação apresenta os resultados da modelação 2D e 3D de informação obtida por deteção remota, nomeadamente imagens Worldview-2 e dados LiDAR da cidade de Lisboa. Associa-se informação cartográfica vetorial clássica para a localização dos edifícios. Utilizando técnicas de modelação geográfica, seleccionaram-se as coberturas de edifícios de acordo com dois usos potenciais: instalação de sistemas fotovoltaicos e coberturas ajardinadas (*green roofs*).

Foram criados dois *outputs*: a potencial área disponível no topo de edifícios para receber sistemas fotovoltaicos bem como para a instalação de jardins, recorrendo a informação 3D e informação 2D.

Os resultados constituem um contributo para um guia para o planeamento urbano, tanto em matérias de eficiência energética como em qualidade ambiental. Sabendo quais os melhores locais para determinados usos, é possível instruir políticas sustentáveis e criar linhas estratégicas que incentivem a reconversão das coberturas dos edifícios mais favoráveis ao ambiente.



1. Introdução

As autarquias são responsáveis pela aplicação nas suas cidades, de orientações estratégicas que visem promover a sustentabilidade e a eficiência energética, com base em fontes renováveis. Neste contexto, as tecnologias de deteção remota podem ser uma fonte eficaz de geo-informação atualizada sobre o ambiente urbano. Atualmente a modelação de dados geográficos obtidos por sensores LiDAR (*Light Detection And Ranging*) permite a análise tridimensional (3D) da superfície urbana a grande escala. Os modelos de superfície gerados através de nuvens de pontos 3D podem ser complementados por informação planimétrica (2D) obtida por sensores óticos, instalados em satélites de observação da Terra. Nesta comunicação apresentam-se resultados da modelação de dados multisensor 2D e 3D para uso sustentável das coberturas em meio ambiente. Dois cenários são propostos: a eficiência energética e a qualidade do ambiente urbano. Os produtos gerados fornecem avaliações criteriosas aos planeadores urbanos e permitem decidir sobre metas sustentáveis realistas.

A energia solar é uma das melhores fontes de energia renovável com menor impacto negativo no ambiente (Solangi *et al.*, 2011). Avaliar o potencial de energia solar da cidade através do mapeamento solar, constitui uma ferramenta analítica valiosa que permite quantificar as capacidades locais para a produção de energia e usar esses resultados para a conceção e implementação de estratégias de planeamento urbano, em linha com as metas e objetivos de desenvolvimento sustentável. O uso de técnicas de modelação geográfica permite ainda a atualização regular da informação e assim acompanhar os efeitos das políticas de promoção de energia solar. A modelação dos recursos solares ao nível da cobertura, em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), constitui uma ferramenta eficaz para identificar áreas do topo dos edifícios apropriadas para a instalação de painéis. Aplicando algoritmos para classificar e segmentar dados automaticamente, analisa-se as coberturas dos edifícios de acordo com sua inclinação, azimute, sombreados e áreas (Santos, 2011). Sabendo a quantidade de incidente solar radiante bem como as áreas da cobertura ideais para “capturar” a energia, o potencial de energia solar de qualquer cobertura pode ser facilmente calculada (por exemplo, Kodysh *et al.*, 2013; Brito *et al.*, 2012; Jochem *et al.*, 2009; Hofierka e Kanuk, 2009). Esta análise também pode ser estendida para incluir o potencial solar fachadas e outras superfícies verticais (Redweik *et al.*, 2013).

A par da instalação de sistemas solares que promovem a eficiência energética, outro uso sustentável das coberturas inclui a implementação de jardins (coberturas ajardinadas – *green roofs*). O uso da área disponível no topo dos edifícios para jardins em complemento, ou em alternativa, aos sistemas solares, tem como objetivo principal não a eficiência energética, embora se verifique melhorias a nível do isolamento térmico dos edifícios, mas sim a promoção da qualidade ambiental e conforto em meio urbano. Este cenário é particularmente importante em contextos urbanos em que o solo disponível para espaço verde é escasso (IGRA, 2015; Bates *et al.*, 2013; Francis & Lorimer, 2011).

Na literatura encontram-se diversos trabalhos sobre os benefícios públicos de vegetação em coberturas, incluindo a atenuação de altas temperaturas no verão (efeito ilha de calor), diminuindo a necessidade de refrigeração interna dos edifícios; promoção da biodiversidade e melhoria do conforto urbano (Norton *et al.*, 2015; Van Mechelen *et al.*, 2015; Berardi *et al.*, 2014; Benvenuti, 2014; Perini & Magliocco, 2014; Selicato & Violante, 2014). Países como a Alemanha já têm na sua legislação a obrigatoriedade de construção de estruturas ajardinadas em coberturas planas com área superior a 100 m². Recentemente a França decretou que os topos de edifícios construídos em zonas comerciais devem ser parcialmente cobertos por vegetação ou painéis solares (Madre *et al.*, 2014).

Para avaliar o potencial das coberturas em meio urbano para receber sistemas solares ou jardins, é necessário aferir uma série de critérios físicos, geográficos e técnicos. Os critérios físicos incluem o material de revestimento, área disponível, orientação e declive. Os fatores geográficos incluem a análise da disponibilidade de radiação solar, particularmente relevante em contextos urbanos onde os edifícios vizinhos provocam sombreamento. Os critérios técnicos incluem, no caso das coberturas ajardinadas, a capacidade de carga do edifício ou as condições de drenagem, entre outros, que não serão considerados nesta comunicação. Através da modelação de dados 3D e 2D pretende-se demonstrar a adequabilidade das coberturas à instalação de sistemas fotovoltaicos e jardins em meio urbano. Para tal recorre-se à informação altimétrica disponível na nuvem de pontos obtida por LiDAR, bem como à informação



planimétrica disponibilizada por uma imagem WorldView-2 e um ficheiro vetorial com a localização dos edifícios. Através da modelação deste conjunto de dados serão investigadas as características físicas e geográficas das coberturas e quantificado o seu uso potencial sustentável.

2. Área de estudo e conjunto de dados

2.1 Área de estudo

A metodologia proposta inclui dois casos de estudo, a implementar em áreas distintas dada a complexidade dos cálculos requeridos. A metodologia para avaliação do potencial fotovoltaico é implementada numa área localizada na freguesia de Alvalade, em Lisboa, coincidente com o limite da antiga freguesia de Alvalade (Figura 1). A área inclui parte do bairro de Alvalade, caracterizado por uma morfologia moderna, com áreas residenciais, avenidas, praças e escolas, desenhada para promover a circulação pedestre. A área inclui principalmente edifícios residenciais de 5 pisos, com serviços no piso térreo, áreas verdes e edifícios públicos. De acordo com a cartografia municipal, identificaram-se 811 edifícios com uma área média de 222 m². A metodologia para estimar as potenciais coberturas verdes é implementada na cidade de Lisboa. A cidade ocupa 85 km² e apresenta em média 8 horas de luz solar por dia (EC, 2015). De acordo com um inventário realizado em 2013 pela Câmara Municipal, foram identificadas 21 coberturas verdes, totalizando 52 085 m².

2.2 Conjunto de dados

Os dados explorados nesta comunicação incluem informação altimétrica e planimétrica (Figura 1). A planimetria incluiu uma imagem de grande resolução espacial e o mapa da localização dos edifícios, retirado da cartografia municipal. A imagem foi captada pelo sensor WorldView-2 a 29 de Junho de 2010, cobrindo a cidade de Lisboa com um ângulo Off-Nadir de 7.1 °. A imagem foi obtida no formato *Ortho-Ready*, com resolução espacial de 2m no modo multiespectral (8 bandas) e 0.5 m no modo pancromático, e resolução espectral de 11 bits (Quadro 1). Aplicou-se o algoritmo de fusão *Pan Sharp* por forma a tirar vantagem da resolução espacial da banda pancromática. Um processo de ortorectificação foi aplicado por forma a reduzir as distorções provocadas pelo relevo.

Quadro 1 – Características espectrais do sensor WorldView-2

Bandas espectrais	Comprimento de onda (nm)
1	400-450 (coastal)
2	450-510 (blue)
3	510-580 (green)
4	585-625 (yellow)
5	630-690 (red)
6	705-745 (red edge)
7	770-895 (NIR-1)
8	860-900 (NIR-2)
Pan	450-800

Para auxiliar na deteção do tipo de material utilizado na cobertura produziu-se uma imagem do índice de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), construído com as bandas NIR1 (banda 5) e RED (banda 7) do sensor WorldView-2, de acordo com a equação 1:

$$NDVI = (NIR1 - RED) / (NIR1 + RED) \quad (1)$$

A planimetria incluiu um mapa com a localização dos edifícios retirado da cartografia municipal de 1998 à escala 1:1000, e atualizado a 2006 (Santos, 2011). A altimetria consistiu em informação 3D recolhida num voo LiDAR, realizado em



2006. A partir da nuvem de pontos recolhida, produziu-se uma imagem baseada no 2º retorno, com 1 m de resolução. Esta imagem representa o Modelo Digital de Superfície (MDS) da área de estudo.

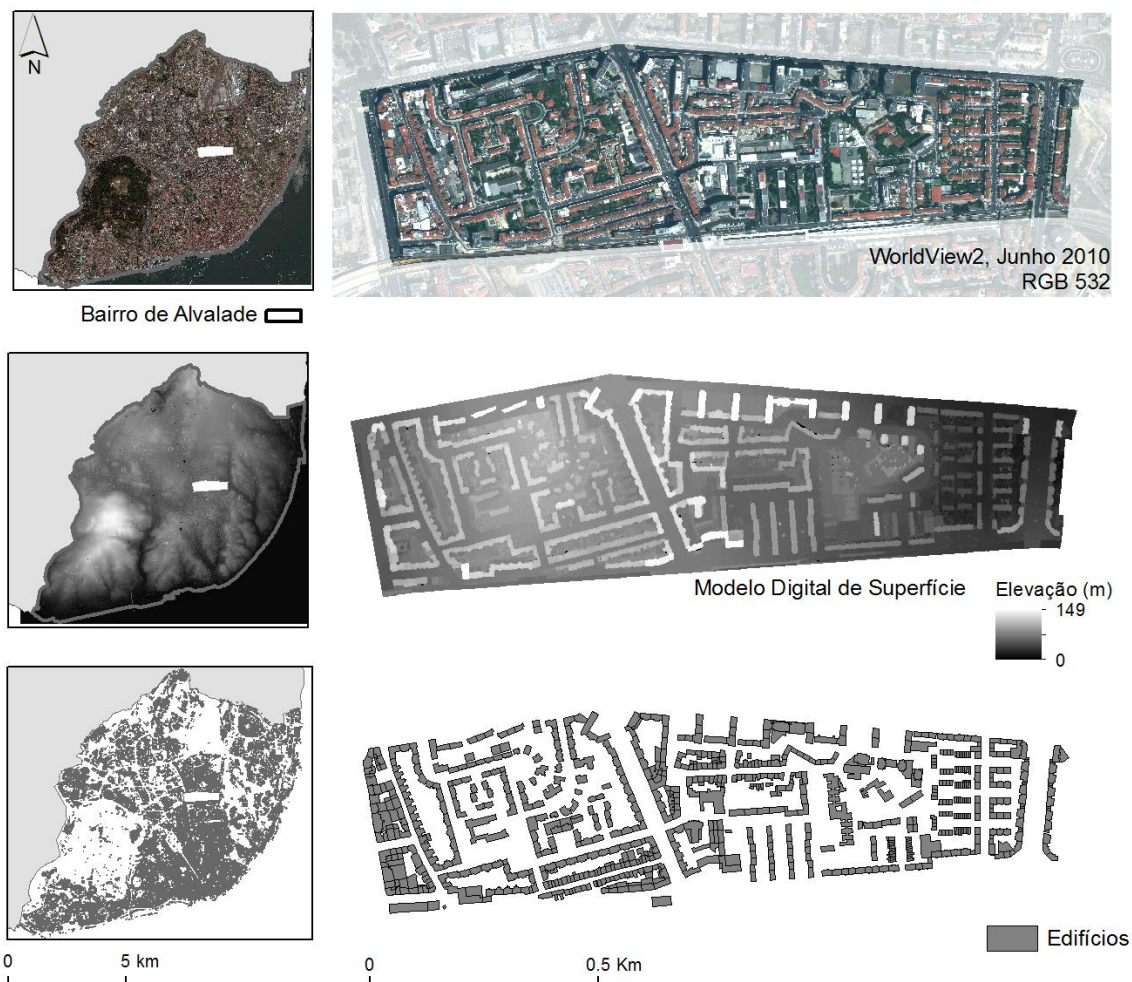


Figura 1 – Duas áreas de estudo - Cidade de Lisboa (direita) e Bairro de Alvalade (esquerda) - e dados utilizados

3. Metodologia

A metodologia para estimar o potencial uso sustentável das coberturas baseou-se no MDS, complementado, no caso das coberturas jardinadas, com informação recolhida na imagem WorldView-2 e a localização dos edifícios.

3.1 Modelação 3D do edificado

A aferição de ambos os usos potenciais inicia-se com a modelação do edificado, seguindo-se a modelação da energia solar disponível em cada cobertura. Nestas duas fases, recorre-se à informação 3D (MDS) e ao mapa das áreas edificadas. Por forma a incluir na modelação solar parâmetros como os efeitos atmosféricos, latitude e elevação, declive, orientação, variação diária e sazonal do ângulo solar e efeito de ensombramento dos edifícios vizinhos, selecionou-se a aplicação *Solar Radiation* disponível no software ArcGIS (ESRI). O resultado é um mapa com a radiação anual em cada local em Wh/m².

3.2 Potencial uso fotovoltaico dos topos dos edifícios



Para avaliar o potencial fotovoltaico, os critérios são diferentes dos utilizados para avaliar o potencial de implementação de jardins. A estimacão do potencial solar considera as especificaces dos equipamentos utilizados para converter energia solar em elétrica como a área do painel e a sua eficiência, a área da cobertura, bem como a quantidade de radiao solar disponível em cada cobertura. Nesta comunicao os critérios aplicados foram: coberturas com áreas superiores a 24 m² e com valores anuais de radiao superiores a 0.8 MWh/m². Considerando-se apenas os edifícios residenciais, retirados da planimetria, e as características solares dos edifícios, aferiu-se o potencial solar de cada cobertura na área de estudo. Sobrepondo o mapa solar com o mapa dos edifícios,  possível saber qual o potencial fotovoltaico de cada cobertura na área de estudo. Uma descrio mais detalhada da modelao solar pode ser consultada em Santos *et al.* (2014).

3.3 Potencial uso dos topos dos edifícios como coberturas ajardinadas

A estimacão do uso potencial das coberturas para receber jardins recorreu a critérios diferentes do cenário anterior. Após a modelao do edificado e da energia solar disponível, considerou-se o tipo de material existente na cobertura e o número médio de horas de sol disponíveis. Por forma a distinguir as coberturas com telha, recorreu-se a uma classificao orientada a objeto da imagem WorldView-2, disponível na extensão *Feature Analyst 5* para o ArcGIS (ESRI). Nesta fase, e para diminuir a presença de erros de comissão, utilizou-se o mapa dos edifícios como máscara de classificao. O número de horas solares diárias foi calculado a partir das variáveis radiao global diária (R, MJ/m²), radiao extraterrestre diária (R₀, MJ/m²), número de horas solares diárias (n, h) e número máximo de horas solares diárias (N, h), utilizando a fórmula de Angstrm–Prescott (e.g., Yorukoglu & Celik, 2006), de acordo com a equao 2:

$$R/R_0 = 0.22 * 0.54(n/N) \quad (2)$$

Para a instalao de jardins em coberturas, consideraram-se então os seguintes critérios: livres de telha, área disponível superior a 100m², máximo de 11° de inclinao para evitar deslocamento de solo, e pelo menos 3 a 4 horas de sol por dia. Apenas coberturas com estas características foram consideradas adequadas para receber estruturas ajardinadas.

4. Resultados e discussão

A primeira nota de discussão  que os que artefactos como chaminés, antenas ou caixas de elevadores não foram contabilizados nesta metodologia, dada a resoluo espacial do modelo digital de superfície utilizado. Para tal seria necessário um modelo com resoluo superior.

A modelao geográfica para determinao do potencial fotovoltaico resulta num mapa com a estimativa da energia fotovoltaica produzida por painéis solares em cada cobertura residencial da área de estudo (Figura 2). Para a produo deste mapa os *inputs* consistiram no modelo digital de superfície derivado dos dados LiDAR e a localizao dos edifícios. Na rea de estudo identificaram-se 760 edifícios residenciais, de um total de 811. Para cada um dos edifícios aferiu-se a radiao anual incidente e o seu potencial fotovoltaico considerando os critérios de área e eficiência dos painéis. A partir dos dados estimados, conclui-se que 63 % dos edifícios residenciais localizados no bairro de Alvalade apresentam excelentes a muito boas condies para a instalao de painéis fotovoltaicos. Por outro lado, 8 % não apresentam condies (potencial baixo) que justifiquem um investimento naquele tipo de estrutura.

A informao sobre o potencial fotovoltaico dos topos de edifícios constitui não são uma ferramenta de planeamento municipal mas também uma ferramenta útil para o cidadão. Sabendo o potencial do edifício  possível planear o investimento em sistemas solares e estimar o período de retorno desse investimento (Santos *et al.*, 2014). A recente entrada em vigor (janeiro de 2015) da legislao que regula o autoconsumo fotovoltaico (Decreto-lei n. 153/2014 de 20 de outubro) veio realçar a necessidade e a utilidade deste tipo de ferramentas. Neste contexto, o uso de dados geográficos obtidos por deteo remota torna o processo de mapeamento expedito e replicável, permitindo não são identificar locais suscetíveis de investimento público e privado, mas também acompanhar a dinâmica de alterao da cidade; a construo de novos edifícios pode beneficiar de um *design* urbano que promova a eficiência energética.

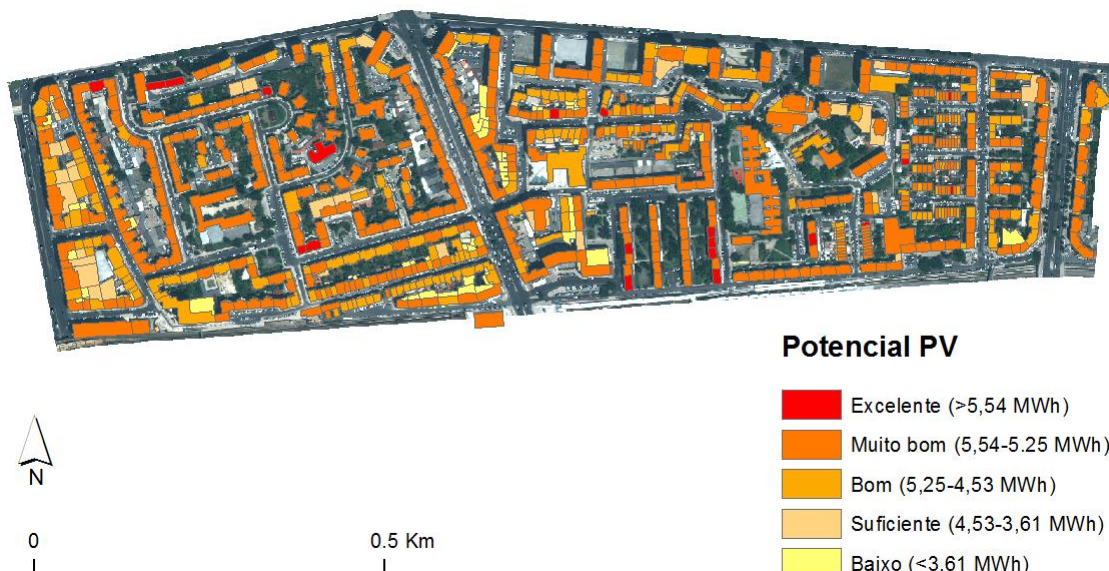


Figura 2 – Estimativa do potencial de produção de eletricidade por painéis solares instalados nas coberturas residenciais

A estimação do potencial em coberturas ajardinadas na cidade de Lisboa recorreu ao mapa solar bem como à informação espectral disponível da imagem WorldView-2 e à localização dos edifícios (Figura 3). O uso da imagem de satélite, através de um processo de classificação semi-automático, permitiu distinguir os edifícios com telha, e por isso, não suscetíveis de receber vegetação. Num total de 62 935 edifícios identificados em Lisboa, no ano de 2006, 13 005 foram classificados como sem telha. Após aplicação dos critérios relativos ao número médio de horas solares diárias, área disponível e declive, o mapa final identifica 2 772 edifícios com condições físicas e geográficas adequadas para receber coberturas ajardinadas, o que representa um ganho para a cidade de 1 721 041 m² de área verde. Este valor representa um grande aumento potencial da área jardinada, face ao valor atual de 52 085 m². Numa ótica operacional, estas coberturas terão que ser analisadas posteriormente *in situ* para verificar se as condições de drenagem bem como a capacidade de carga suportada pelo edifício se adaptam a este tipo de reconversão.

A informação sobre potenciais áreas verdes em ambientes urbanos pode ser usada para promover ações de desenvolvimento urbano baseadas em baixo carbono, que vão muito além da área permeável ao nível do solo. Igualmente, a reconversão dos topos dos edifícios para coberturas ajardinadas é um fator de mitigação das mudanças climáticas e as ações de conservação da biodiversidade, ao mesmo tempo que promove novos espaços públicos e privados de lazer.

5. Conclusões

Nesta comunicação demonstrou-se a utilidade da informação geográfica 2D e 3D para a modelação de usos potenciais de topos de edifícios em meio urbano. No primeiro caso apresentado, faz-se uso de dados 3D obtidos por LiDAR para modelar a eficiência da conversão de energia solar em elétrica, a partir de painéis instalados em coberturas residenciais. No segundo caso, propõe-se o uso conjunto dos dados 3D e informação 2D recolhida numa imagem de satélite para identificar edifícios com potencial para receber coberturas ajardinadas. Decorrente do trabalho de investigação podemos concluir que o grande desafio é internalizar no Plano Diretor Municipal (PDM), no *design urbano* e nos planos estratégicos as ações que permitem atingir os objetivos das cidades sustentáveis. As tecnologias de informação geográfica são uma das componentes mais importantes para monitorizar as ações dos PDM e das estratégias das cidades sustentáveis. Neste contexto, o uso de imagens obtidas por deteção remota torna exequível a comparabilidade de indicadores sustentáveis. O processamento deste tipo de informação 2D, através de métodos semi-automáticos,



resulta em mapas de usos e ocupação do solo que garantem a comparabilidade dos estados de superfície dos elementos urbanos independentemente da escala.

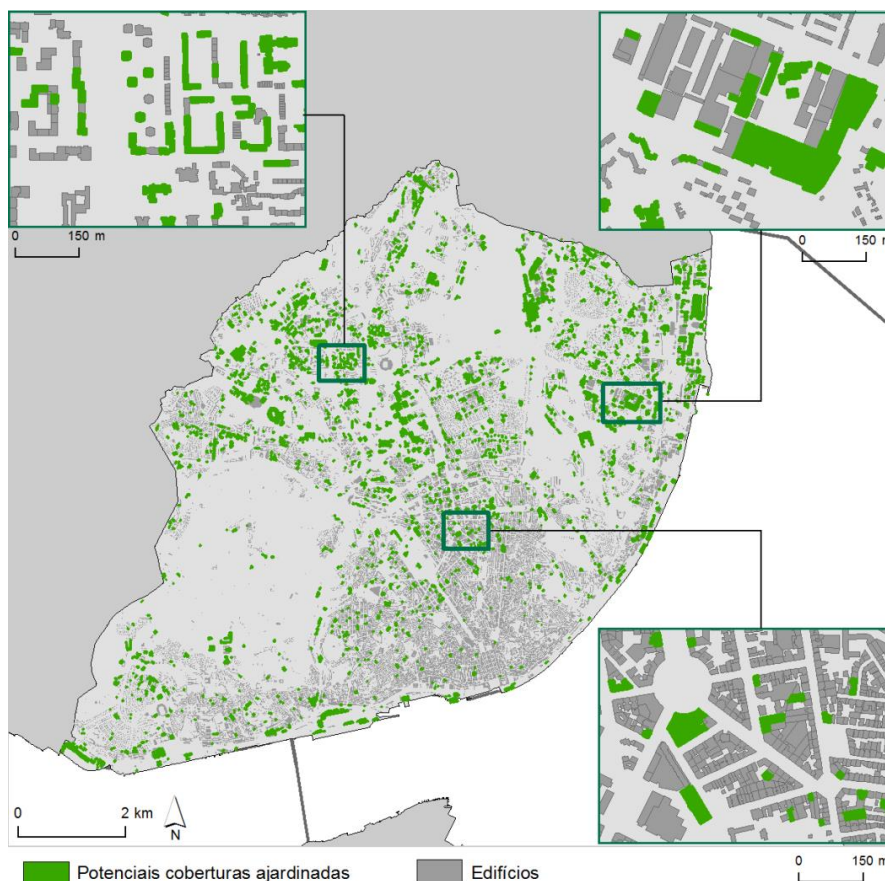


Figura 3 – Edifícios com potencial para receber coberturas ajardinadas em Lisboa

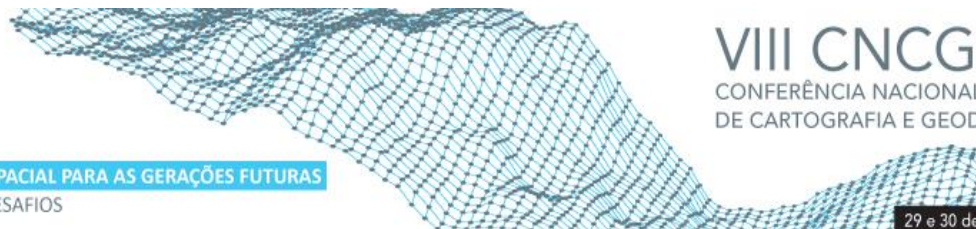
Não se pode resumir a medição dos indicadores de sustentabilidade urbana a informação geográfica 2D. Esta informação 2D deve ser complementada por modelação 3D de dados geográficos. As nuvens de pontos LiDAR ou as obtidas por *image matching* de dados recolhidos por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) permitem a modelação referida. Esses modelos urbanos são insubstituíveis na análise à micro-escala (Tenedório *et al.*, 2014).

Agradecimentos

O trabalho decorreu no âmbito de uma bolsa de Pós-Doutoramento financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) (SFRH/BPD/76893/2011). O artigo apresenta resultados de investigação no âmbito do Projecto PEST-UID/SOC/04647/2013, financiado pela FCT. Os autores agradecem à Logica a disponibilização dos dados LiDAR.

Referências Bibliográficas

- Bates, A. J., Sadler, J. P., Mackay, R. (2013). Vegetation development over four years on two green roofs in the UK. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(1), 98–108.
- Benvenuti, S. (2014). Wildflower green roofs for urban landscaping, ecological sustainability and biodiversity. *Landscape and Urban Planning*, 124, 151–161.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411–428.



- Brito, M. C., Gomes, N., Santos, T., & Tenedório, J. A. (2012). Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Solar Energy*, 86(1), 283–288.
- European Commission. (2015). Eurostat - Data Explorer. Retrieved June 15, 2015, from http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=urb_cenv&lang=en
- Francis, R. A., Lorimer, J. (2011). Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management*, 92(6), 1429–1437.
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127–138.
- Hofierka, J., & Kaňuk, J. (2009). Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools. *Renewable Energy*, 34(10), 2206–2214.
- IGRA - International Green Roof Association. (2015). Public Benefits. Retrieved June 15, 2015, from http://www.igra-world.com/benefits/public_benefits.php
- Jochem, A., Hofle, B., Hollaus, M., Rutzinger, M. (2009). Object Detection in Airborne LIDAR Data for Improved Solar Radiation Modeling in Urban Areas. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science* (Vol. XXXVIII, Part 3/W8), Paris, France.
- Kodysh, J. B., Omitaomu, O. A., Bhaduri, B. L., Neish, B. S. (2013). Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society*, 8, 31–41.
- Madre, F., Vergnes, A., Machon, N., Clergeau, P. (2014). Green roofs as habitats for wild plant species in urban landscapes: First insights from a large-scale sampling. *Landscape and Urban Planning*, 122, 100–107.
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127–138.
- Perini, K., Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), 495–506.
- 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. (2011). *Producing Geographical Information for Land Planning using VHR Data: Local Scale Applications*. S.I.: LAP LAMBERT Academic Publishing.
- Santos, T., Gomes, N., Freire, S., Brito, M. C., Santos, L., Tenedório, J. A. (2014). Applications of solar mapping in the urban environment. *Applied Geography*, 51, 48–57.
- Selicato, S., Violante, D. (2014). *The Impact Of Intelligent Building Technologies On The Urban Environment*. In *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2014* (B. Murgante, Vol. 8581, pp. 204–252). Springer International Publishing Switzerland.
- Solangi, K. H., Islam, M. R., Saidur, R., Rahim, N. A., Fayaz, H. (2011). A review on global solar energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2149–2163.
- Tenedório, J. A., Rebelo, C., Estanqueiro, R., Henriques, C. D., Marques, L., Gonçalves, J. A. (2014). New Developments in Geographical Information Technology for Urban and Spatial Planning. In *Technologies for Urban and Spatial Planning: Virtual Cities and Territories* (N. Pinto, J. Tenedório, A. Antunes, J. Cladera, pp. 196–227). Hershey: Information Science Reference.
- Van Mechelen, C., Van Meerbeek, K., Dutoit, T., Hermy, M. (2015). Functional diversity as a framework for novel ecosystem design: The example of extensive green roofs. *Landscape and Urban Planning*, 136, 165–173.
- Yorukoglu, M., Celik, A. N. (2006). A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. *Energy Conversion and Management*, 47(15–16), 2441–2450