

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Potencial PV no espaço público urbano

Cassiana Faria Mordomo

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Professor Doutor Killian Lobato
Doutora Engenheira Teresa Santos

Agradecimento

Agradeço a todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão desta etapa do meu percurso.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Killian Lobato e Doutora Engenheira Teresa Santos pela disponibilidade, partilha de conhecimento e acompanhamento ao longo do processo.

À minha família e amigos por todo o suporte.

À minha mãe, por todo o apoio, incentivo e por me ter proporcionado a oportunidade de frequentar o ensino superior.

Aos amigos e colegas que a FCUL me proporcionou ao longo dos últimos anos, por todos os bons momentos.

Ao Fábio, pelo apoio incondicional.

Resumo

A energia solar fotovoltaica, como energia renovável, veio responder a um aumento do consumo e procura de energia que se tem verificado nos últimos anos. Este aumento leva a que se procure novas maneiras de produzir energia de forma viável, mais económica, com menos impactos no ambiente e um impacto visual o mais leve possível. A energia solar fotovoltaica responde a estas necessidades e oferece vantagens como o funcionamento *off-grid* e a possibilidade de se integrar com sucesso no espaço público urbano, em equipamentos que necessitem de energia elétrica para funcionar.

Para implementar esta solução energética em meio urbano, é necessário primeiro estudar com rigor o espaço disponível, simulando o potencial solar e a existência ou não de sombreamento, que dependem de vários fatores morfológicos. Nesta dissertação, o objetivo foi estudar o potencial no espaço urbano com vista à implementação de luminárias a funcionar exclusivamente a energia solar. Deste modo, a ferramenta usada foi o modelo *Solar Analyst*, integrado no Sistema de Informação Geográfica (SIG) *ArcGIS*.

Por meio de testes a diferentes variáveis e otimizações ao longo do processo, desenvolveu-se uma metodologia, implementada no *ArcGIS*, para simular o potencial solar do espaço público urbano para duas áreas distintas da cidade de Lisboa: Baixa de Lisboa e Parque das Nações.

Os resultados foram otimizados para o dia do ano em que, previsivelmente, o recurso solar é mais baixo - 21 de dezembro - e, portanto, com menos radiação incidente no espaço público urbano devido ao sombreamento provocado pelos edifícios.

Para a zona do Parque das Nações foi feito o exercício de analisar o potencial da substituição de luminárias convencionais existentes por luminárias solares autónomas. Das 136 localizações de luminárias convencionais existentes, concluiu-se que mais de 50% apresentam-se como localizações viáveis para uma eventual substituição por luminárias solares.

Palavras-chave: Potencial Solar, Espaço Urbano, Energia Solar Fotovoltaica, Sistemas de Informação Geográfica.

Abstract

Photovoltaic (PV) Solar energy, as a renewable resource, has come as an alternative in response to the increase of the demand of energy in the past years. That demand leads to a search for several alternative ways to produce energy in a more viable and sustainable way. Solar photovoltaic energy offers some advantages, as the off-grid mode and the possibility of an easy integration in urban environment, as in public urban spaces.

To adapt this solution on the urban context, it is mandatory to study several variables, like shadowing (by the buildings) or morphology of the streets, in order to understand their influence on the conversion of solar resource, and proceed to a viable simulation.

In this project, the key was to analyze the solar resource in urban environment in order to evaluate the viability to install solar street lights, replacing the existing ones. The simulation was performed using the Solar Analyst tool of the ArcGIS software.

After testing several variables, and some optimization processes, a viable methodology was developed, and applied to two distinct public urban spaces in the city of Lisbon: Baixa (downtown), and the modern neighborhood Parque das Nações.

The results were optimized for the day of the year where the expected solar irradiance is lowest and where building and obstacle shadowing is at its greatest - December, 21st. In this day of the year, the solar resource on public spaces is expected to be minimum. For the Lisbon neighborhood Parque das Nações, the challenge was to calculate how many of the existing street lights could be replaced for independent solar street lights. The simulation showed that more than 50% of the 136 existing street lights could be replaced for solar street lights.

Key-words: *Solar Resource, Urban Space, Photovoltaic Energy, Geographic Information Systems*

Conteúdo

Agradecimento	iii
Resumo	iv
<i>Abstract</i>	v
Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	ix
Simbologia	x
Acrónimos	x
Enquadramento.....	1
1 Introdução.....	3
1.1 Portugal em Energias Renováveis	3
1.1.1 Energia Solar à escala mundial.....	4
1.1.2 Energia Solar Fotovoltaica em Portugal.....	4
1.2 Radiação Solar	5
1.2.1 Dispersão e Absorção.....	5
1.2.2 Radiação Direta, Difusa e Refletida.....	5
1.2.3 Variação da Radiação Solar.....	6
1.2.4 Conversão de energia solar em eletricidade	10
1.3 Luminárias	10
1.3.1 Convencionais	10
1.3.2 Solares.....	11
1.4 Revisão Bibliográfica	14
1.5 Casos de Estudo – Luminárias e Mobiliário Urbano Solar	15
1.6 Sistemas de Informação Geográfica	18
1.6.1 <i>Solar Analyst</i>	18
1.6.2 Dados <i>LiDAR</i>	19
1.7 Objetivo	21
2 Metodologia.....	22
2.1 Dia a Modelar.....	22
2.2 Dados Originais e Condições	22
2.3 Morfologia das zonas em estudo	25
2.4 Definição dos Parâmetros a usar na Modelação Solar.....	28
2.4.1 Latitude	28
2.4.2 Resolução do Céu - <i>Sky Size</i>	29
2.4.3 Configuração Temporal	30
2.4.4 Intervalo Horário	30

2.4.5	Parâmetros Topográficos.....	31
2.4.6	Parâmetros de Radiação	32
2.4.7	<i>Outputs</i> Opcionais.....	33
2.5	Linguagem <i>Python</i>	33
2.6	Problemática dos “Falsos Muros”	34
2.7	Inclinação ótima e dados do PV GIS	37
2.8	Consumo diário de uma luminária solar	40
3	Resultados.....	43
3.1	Radiação Global	43
3.2	Reclassificação.....	44
4	Considerações Finais.....	53
	Referências	55
	Anexos	58

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Dependência energética de Portugal ao longo dos anos.	3
Figura 1.2 – Irradiação global horizontal na Europa (iMaps GeoModel Solar).	6
Figura 1.3 - Soma média da irradiação global horizontal em Portugal Continental, de 1994 a 2013 (iMaps GeoModel Solar).....	7
Figura 1.4 – Representação do ângulo de declinação.	8
Figura 1.5 – Representação dos vários parâmetros de localização do Sol.	9
Figura 1.6 – Variação do custo de luminárias convencionais em função da altura do poste e do tipo de lâmpada.	11
Figura 1.7 – Esquemático da possível disposição dos elementos de uma luminária solar.	12
Figura 1.8 – Exemplo de luminária LED alimentada a energia solar, comercializada pela GreenWorld.	13
Figura 1.9 – Árvore solar, instalada na Praça do Município, em Lisboa.	16
Figura 1.10 – Luminária híbrida, que combina o uso da energia solar e eólica. [21]	17
Figura 1.11 – Esquemático da luminária híbrida.	17
Figura 1.12 – Representação esquemática do cálculo do nDSM a partir do DSM e DTM.	20
Figura 2.1- Esquemático das operações desenvolvidas – DSM com elevação.....	24
Figura 2.2 – Localização, a vermelho, das duas zonas de estudo na cidade de Lisboa. Acima, o Parque das Nações, mais abaixo, a Baixa. (Google Maps).....	25
Figura 2.3 - DSM da zona da Baixa de Lisboa.....	26
Figura 2.4 - DSM da zona do Parque das Nações.....	27
Figura 2.5 - Toolbox Extract by Mask.....	28
Figura 2.6 - Montagem do modelo no Model Builder, ArcGIS	34
Figura 2.7 – DSM da zona do Parque das Nações, percebendo-se a disparidade dos edifícios entre as duas layers.....	35
Figura 2.8 – Dados de radiação solar direta, mostrando a influência dos contornos errados. A vermelho, os contornos certos, depois da edição manual.....	36
Figura 2.9 – DSM do Parque das Nações a tons de cinza e contorno dos edifícios já corrigido manualmente.	37
Figura 2.10 - Print do ambiente do site PV GIS, com os parâmetros pedidos.	38
Figura 2.11 – Variação média para a cidade de Lisboa, mês de dezembro, das componentes de radiação global (céu real), global (céu limpo) e difusa.	38
Figura 2.12 – Número de horas mensais de iluminação pública ligada, nos horários normal reduzido.	40
Figura 3.1 – Condição usada no Raster Calculator.....	44

Figura 3.2 – Área distribuída pelas classes de sombreamento na zona da Baixa, nas várias alturas. ...	45
Figura 3.3 – Área distribuída pelas classes de sombreamento na zona do Parque das Nações, nas várias alturas.....	45
Figura 3.4 – Mapas de Sombreamento para a Baixa de Lisboa, nas várias alturas testadas.....	47
Figura 3.5 - Mapas de Sombreamento para o Parque das Nações, nas várias alturas testadas.	48
Figura 3.6 – Localização das luminárias atualmente existentes na área do Parque das Nações em estudo.....	49

Índice de Tabelas

Tabela 1.1 – Produção de energia a partir de fontes não renováveis.	4
Tabela 1.2 – Especificações técnicas dos modelos de luminária solar WiseBuy, comercializados pela GreenWorld.....	13
Tabela 1.3 – Diferentes ferramentas do Solar Analyst no ArcGIS.	18
Tabela 2.1 - Latitude das zonas em estudo.....	28
Tabela 2.2 – Tempos de simulação para o teste aos diferentes valores de resolução do céu (sky size).29	
Tabela 2.3 - Tempos de simulação para o teste aos diferentes valores de intervalo horário.	31
Tabela 2.4 – Valores de irradiação para os 12 meses do ano.	39
Tabela 2.5 – Especificações técnicas da luminária solar do modelo iStar 10W.....	40
Tabela 3.1 – Percentagem de luminárias existentes nas categorias definidas.	50

Simbologia

α	Altura solar
A	Ampere
Ah	Ampere hora
ω	Ângulo Solar
ψ	Azimute
δ	Declinação
d_n	Dia juliano
N_d	Duração do dia
GW	Giga-Watt
° N	Graus Norte
kW	Kilo-Watt
kW/m ²	Kilo-Watt por metro quadrado
ϕ	Latitude
lm	Lúmen
lm/W	Lúmen por Watt
MW	Mega-Watt
MWh/m ²	Mega-Watt hora por metro quadrado
m ²	Metro quadrado
μm	Micrómetro
km ²	Quilómetro quadrado
TWh	Tera-Watt hora
UA	Unidade Astronómica
V	Volt
W	Watt
Wh	Watt hora
Wh/m ²	Watt hora por metro quadrado
W/m ²	Watt por metro quadrado
φ	Zénite

Acrónimos

MDS / DSM	Modelo Digital de Superfície / <i>Digital Surface Model</i>
MDT / DTM	Modelo Digital Terrestre / <i>Digital Terrain Model</i>
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
ETRS89-PT-TM06	<i>European Terrestrial Reference System 1989</i>
HN	Horário Normal
HR	Horário Reduzido
IV	Infravermelho
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LAT	<i>Local Aparent Time</i>
nDSM	<i>normalized Digital Surface Model</i>
N	Norte
PSH	<i>Peak Sun Hour</i>
PV	<i>Photovoltaic</i>
SIG / GIS	Sistema de Informação Geográfica / <i>Geographic Information System</i>
S	Sul
UV	Ultravioleta
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
W	Watt

Enquadramento

A energia é de uma importância inegável no contexto atual. Ao longo dos tempos as necessidades energéticas têm vindo a aumentar, fruto do natural desenvolvimento da humanidade. Por outro lado, a expansão do mercado energético com vista à satisfação dessas mesmas necessidades teve – e vai tendo – um impacto importante no ambiente. Este impacto, quase sempre negativo, tem vindo a aguçar a busca por soluções energéticas alternativas, que aliem o conforto da população à sustentabilidade ambiental e energética.

As áreas urbanas, onde se concentra grande parte da população e, como tal, das necessidades energéticas, são particularmente interessantes neste contexto, dado que precisam de soluções energéticas específicas, que possam inserir-se no planeamento urbano, sem prejuízo de poluição sonora, visual ou alteração da paisagem. Novas alternativas no ramo das energias renováveis que se mostrem fiáveis e rentáveis a nível económico podem fomentar a implementação de políticas energéticas específicas por parte dos governos.

No contexto urbano, o aproveitamento da energia solar é particularmente interessante, dado que este tipo de conversão energética alia a eficácia a suprir as necessidades energéticas à vertente estética e funcional. Este tipo de energia não produz ruído, emissão de poluentes e pode ser conjugado com a paisagem envolvente de forma a interferir ao mínimo ou a passar despercebida.

É possível integrar a gestão do funcionamento das luminárias de rua no conceito amplamente difundido nos últimos tempos de *smart cities* – cidades inteligentes – que pressupõe uma utilização e gestão inteligente dos recursos, sendo a rede elétrica um bom exemplo, reduzindo os desperdícios e otimizando a experiência do utilizador na cidade.

O funcionamento da iluminação pública pode ser feito de forma mais eficiente e inteligente, reduzindo os gastos energéticos e aumentando a segurança da população. Esta gestão pode ser feita com base, por exemplo, em sensores de movimento (para decidir quando e com que intensidade ligar as luminárias) e fazendo uma gestão da rede de produção energética, resultando num aproveitamento máximo da energia produzida nas luminárias solares, caso estas estejam interligadas à rede principal, ou apenas entre si.

Com a elaboração e implementação da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, pelas Nações Unidas, foram definidos vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Esta agenda universal conta com 17 objetivos e 169 metas para implementação em todos os países. De entre os objetivos definidos, é importante enquadrar os contributos da presente dissertação nos seguintes:

- Energias Renováveis e Acessíveis
- Cidades e Comunidades Sustentáveis
- Produção e Consumo Sustentáveis

A energia solar fotovoltaica em meio urbano é renovável e é acessível tanto do ponto de vista monetário, pois o investimento inicial pode ter um retorno (*payback*) a curto prazo, mas também do ponto de vista de social, dado que diferentes cidades de diferentes níveis de desenvolvimento podem aceder a este tipo de energia. Na aplicação urbana mencionada nesta dissertação, a energia fica disponível para toda a população utilizadora da cidade, colhendo os benefícios da implementação de luminárias solares também ao nível da segurança nas ruas e fiabilidade da iluminação pública em caso de sobrecarga da rede elétrica.

Tratando-se de uma energia renovável, considera-se que é sustentável, e, não havendo emissões de CO₂ na sua produção, contribui deste modo para a descarbonização das cidades. Ainda, a utilização do meio público urbano para a conversão desta energia leva a uma otimização do aproveitamento do espaço público nas cidades, que é normalmente limitado. Para que haja esta otimização, é importante estudar o potencial dos espaços urbanos de uma forma o mais aproximada possível à realidade, tendo em conta as variáveis condicionantes.

Tanto a produção como o consumo de energia elétrica neste âmbito são feitos de forma sustentável, contribuindo para a preservação dos recursos. Também, o consumo de energia elétrica é otimizado com a utilização de tecnologias que, aliadas à energia solar, fazem com que as luminárias só estejam ligadas quando é realmente necessário.

Para haver um correto dimensionamento deste tipo de aplicação, é necessário conhecer com o maior detalhe possível as áreas disponíveis, orientação solar e radiação solar recebida.

Como tal, recorrendo a *software* de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e a dados de *Light Detection and Ranging (LiDAR)* da zona ou cidade em estudo, é possível determinar o potencial solar e avaliar as áreas disponíveis e respetiva exposição e potencial solar, e fazer opções quanto aos espaços mais favoráveis e rentáveis para implementação de painéis fotovoltaicos. Estas são ferramentas já usadas em procedimentos de apoio à decisão e planeamento urbanístico. Os dados *LiDAR* são aqui relevantes, uma vez que permitem a modelação dos edifícios urbanos a três dimensões.

O sombreamento é uma variável muito importante que interfere no potencial solar do espaço público. Em meio urbano, o sombreamento é causado maioritariamente por edifícios, árvores e outros objetos presentes na paisagem. A densidade da malha urbana, a distância entre os edifícios e a sua orientação, são variáveis que condicionam a radiação solar recebida no espaço público circundante a esses edifícios. Visto tratar-se de um fenómeno com variação geográfica, torna-se pertinente estudar a sua variação em espaço público urbano recorrendo a *software* SIG.

1 Introdução

1.1 Portugal em Energias Renováveis

Historicamente, a dependência energética de Portugal sempre foi elevada face ao exterior, na ordem de 80 a 90%, dada a inexistência e inexploração de recursos endógenos como petróleo ou gás natural, que têm grande impacto no *mix* energético. A aposta sucessiva nas energias renováveis fez baixar esta percentagem, no entanto, a grande componente hídrica no sistema português, com a sua variabilidade associada, afetou negativamente a dependência energética nos anos menos chuvosos.

Os dados de 2016 apontam para uma dependência energética nos 75%, veja-se a figura 1.1: [1]

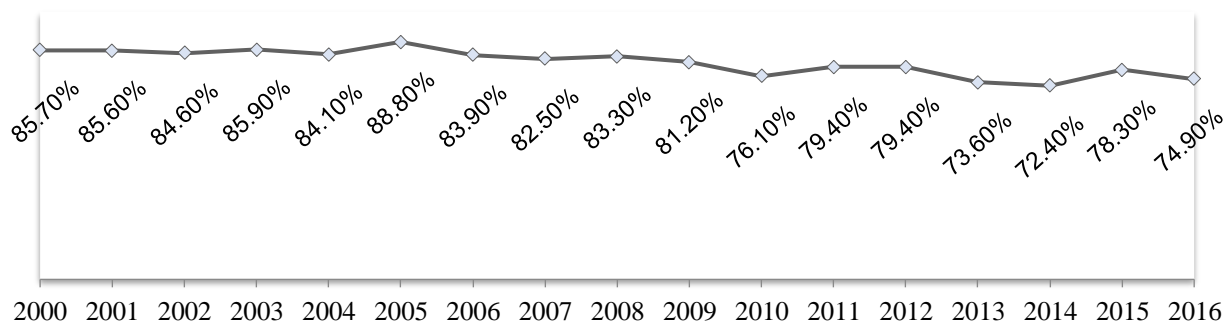


Figura 1.1 – Dependência energética de Portugal ao longo dos anos.

Segundo dados para 2016, comparando a dependência energética de Portugal com outros países europeus, Portugal foi o oitavo país mais dependente, com a média da União Europeia a 28 a situar-se nos 55%. [1]

O país está assim mais exposto à oscilação de preços – do petróleo, principalmente -, devido à baixa oferta energética primária. Por este motivo, urge a procura de outras soluções, como as energias renováveis.

O recurso renovável em Portugal está representado por diversas fontes de energia capazes de constituir uma alternativa às fontes convencionais, que têm cada vez mais expressão: energia eólica, hídrica, solar, geotérmica, de biomassa e de ondas e marés.

Desde o ano de 2013 até 2016 a produção de eletricidade renovável foi maior que a produção de eletricidade por combustíveis fósseis (64% da produção bruta em 2014 contra 18.5% em 2005), revelando o esforço que tem sido feito no desenvolvimento do aproveitamento renovável. [2] No ano de 2017 registou-se uma quota de renováveis no *mix* energético de 42%, por culpa do ano de seca que se verificou. [3]

No ano de 2017, a produção bruta de energia elétrica distribuiu-se por várias fontes. A principal não renovável foi a energia eólica, com 12.14 TWh, seguida da energia hídrica, com 7.47 TWh produzidos. A energia solar fotovoltaica tem ainda pouca expressão, com 0.843 TWh produzidos. O total produzido a partir de fontes não renováveis ilustra-se na tabela 1.1: [3]

Tabela 1.1 – Produção de energia a partir de fontes não renováveis.

Fonte	Energia convertida (TWh)
Carvão	13.60
Gás Natural	13.66
Cogeração Fóssil	4.50
Fuel e Gasóleo	0.96
TOTAL	32.72

A soma da conversão de energia a partir do carvão, gás natural, petróleo e outros não renováveis perfaz um total de 32.72 TWh. [3]

Potência Instalada

A potência instalada em Portugal, incluindo fontes renováveis e convencionais, perfaz um total de 19 GW, segundo dados do ano de 2014, sendo que destes, 59% correspondia a renováveis, ou seja, 11.21 GW. [4]

No ano de 2017, a potência instalada em Portugal de renováveis subiu para 13.7 GW. [3]

1.1.1 Energia Solar à escala mundial

À escala mundial, o interesse no aproveitamento da energia solar como fonte primária de energia tem aumentado consideravelmente. Segundo um estudo efetuado pela *SolarPower Europe*, em 2016 o aproveitamento desta energia teve um aumento de 49%. Foram instalados um total de 76.1 GW em 2016, face aos 51.2 GW instalados no ano anterior. [5]

Em 2016, a China e os Estados Unidos foram os maiores contribuidores, que instalaram respetivamente 34.2 GW e 14 GW. Na Europa registou-se um decréscimo do investimento em relação a 2015, pois se em 2015 houve um aumento de 8.6 GW, no ano seguinte esse aumento foi de 6.9 GW.

1.1.2 Energia Solar Fotovoltaica em Portugal

A potência instalada de energia solar fotovoltaica em Portugal, no fim do ano de 2014, perfazia 228.08 MW. [3]

O destaque vai para a central de produção da Amareleja, que contribui com 45.78 MW. A funcionar desde o fim de 2008 foi, à data da sua construção, a maior central solar fotovoltaica com seguidores no mundo. Contam-se 2 520 seguidores solares, cada um com 104 painéis, totalizando 262 080 painéis fotovoltaicos, numa área de 250 hectares. [7]

Também no Alentejo, a central fotovoltaica Hércules conta com 52 000 painéis, num total de 11 MW de potência. Tem a particularidade de os painéis estarem a 2 metros do solo, podendo o terreno continuar a ser aproveitado para pastoreio. [8]

1.2 Radiação Solar

A potência da radiação solar é usualmente medida em unidades de potência por unidade de área, ou seja, Watt por metro quadrado, W/m^2 (ou ainda kW/m^2).

A sua energia pode ser apresentada em energia por unidade de área, isto é, Watt hora por metro quadrado, Wh/m^2 . Porém, pode falar-se também em “horas de Sol por ano”, em que cada unidade corresponde a $1 kWh/m^2$.

Da energia emitida pelo Sol, apenas uma parte atinge a superfície terrestre. Ao valor do integral da irradiância do Sol para todo o espectro eletromagnético, à distância média Terra-Sol, medido no topo da atmosfera da Terra, num plano perpendicular ao da direção da radiação incidente, chama-se constante solar, e o seu valor padrão é de $1367 W/m^2$. Este valor pode sofrer pequenas variações relacionadas com a altura do dia, a distância Sol-Terra e eventuais modificações da superfície do Sol.

Ao entrar na atmosfera e ao atingir a superfície terrestre, a radiação solar sofre fenómenos de dispersão e de absorção, e como tal, a radiação medida no topo da atmosfera não é a mesma que se mede na superfície terrestre. Estes fenómenos ocorrem principalmente devido à interação da radiação solar com as partículas suspensas na atmosfera, e fazem com que a intensidade da radiação seja afetada. Assim, a atmosfera funciona como um “filtro” à radiação solar.

1.2.1 Dispersão e Absorção

A dispersão atmosférica, ou difusão, ocorre quando a radiação solar, ao entrar em contacto com moléculas de gases na atmosfera, redistribui a sua energia em torno dessas partículas de gás. Daqui não resulta uma perda efetiva de energia, mas uma redistribuição da mesma.

A dispersão pode ser não seletiva quando tem como causa as partículas com diâmetros superiores a $10 \mu m$. Nestes casos, todos os comprimentos de onda irão sofrer difusão por partículas do tamanho referido. Este tipo de dispersão é responsável pela cor branca do nevoeiro e das nuvens. Já a dispersão seletiva está associada a partículas mais pequenas, e é responsável pela cor azul do céu e pelo avermelhado no pôr do Sol.

A absorção consiste, como o nome indica, na absorção de energia da radiação solar, pelos gases e partículas presentes na atmosfera terrestre, resultando este fenómeno numa perda de intensidade da energia radiante. Os gases com maior responsabilidade neste fenómeno são o vapor de água, o dióxido de carbono e o ozono.

1.2.2 Radiação Direta, Difusa e Refletida

A radiação à superfície da Terra pode ser de três tipos: direta, difusa e refletida, sendo que a refletida pode ser considerada difusa, como se verá abaixo.

A radiação direta atinge a superfície da Terra sem antes ter atravessado qualquer obstáculo em toda a atmosfera, e sem ter sofrido outros fenómenos. Nas situações de céu limpo, a componente direta da radiação é maioritária, pois os raios solares não atravessam ou não sofrem desvios pelas nuvens.

A radiação difusa encontra obstáculos antes de chegar à superfície, como o atravessamento de nuvens. É este o tipo de radiação que prevalece em condições de céu nublado ou com valores elevados de

impurezas suspensas. Ao longo de um ano em Portugal, a percentagem de radiação difusa – ou seja, a proporção difusa - constitui de 40 a 60% da radiação global. [9]

A radiação refletida é como que uma outra componente da radiação difusa, pois já não chega à superfície terrestre vinda diretamente do Sol, mais sim tendo sofrido reflexão dos elementos topográficos ou de outras superfícies existentes na superfície da Terra (por exemplo, coberturas de neve).

1.2.3 Variação da Radiação Solar

Variação Espacial

Para o caso do continente europeu, os países mais a Sul, como Portugal, apresentam uma maior irradiação, dado que contabilizam mais dias com menos nebulosidade, especialmente no verão, em comparação com os países mais a norte.

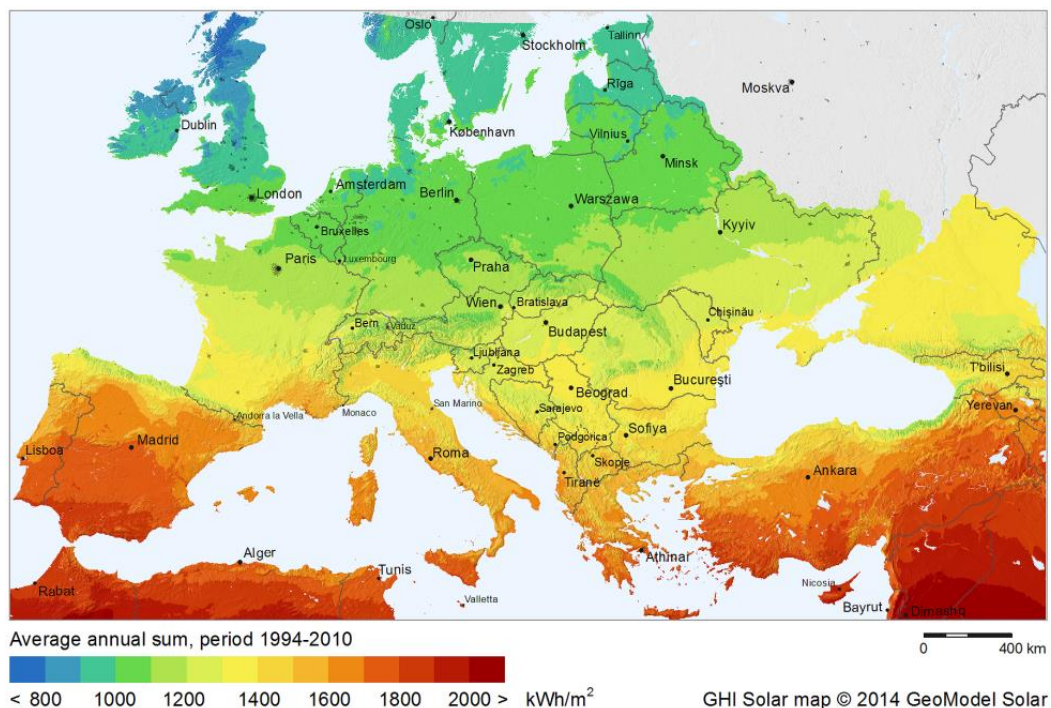


Figura 1.2 – Irradiação global horizontal na Europa (*iMaps GeoModel Solar*).

Nos países do norte da Europa, os valores de radiação solar total média anual são bem diferentes dos registados em Portugal, e podem andar entre 0.8 MWh/m²/ano e 1 MWh/m²/ano.

Em Portugal, o valor de radiação solar total média anual é de 1.74 MWh/m²/ano, contrastando com a média europeia de 1.16 MWh/m²/ano. A título comparativo, os valores registados em regiões áridas estão na gama dos 2.32 MWh/m²/ano. [10]

No território de Portugal Continental é possível observar variações na radiação solar. Os parâmetros que mais influenciam o comportamento da insolação em Portugal são a latitude (que influencia a altura do Sol) e a nebulosidade (mais significativa nas regiões do litoral). O Alentejo e Algarve destacam-se com os valores mais elevados, enquanto a região norte regista valores mais baixos.

O Algarve e Alentejo apresentam valores de insolação na ordem das 3 mil horas anuais (que corresponde a 3 MWh/m²/ano), enquanto no Minho o valor desce para 2 mil horas anuais. Na zona de Lisboa, o valor está entre 2 500 e 3 000 horas por ano. [11]

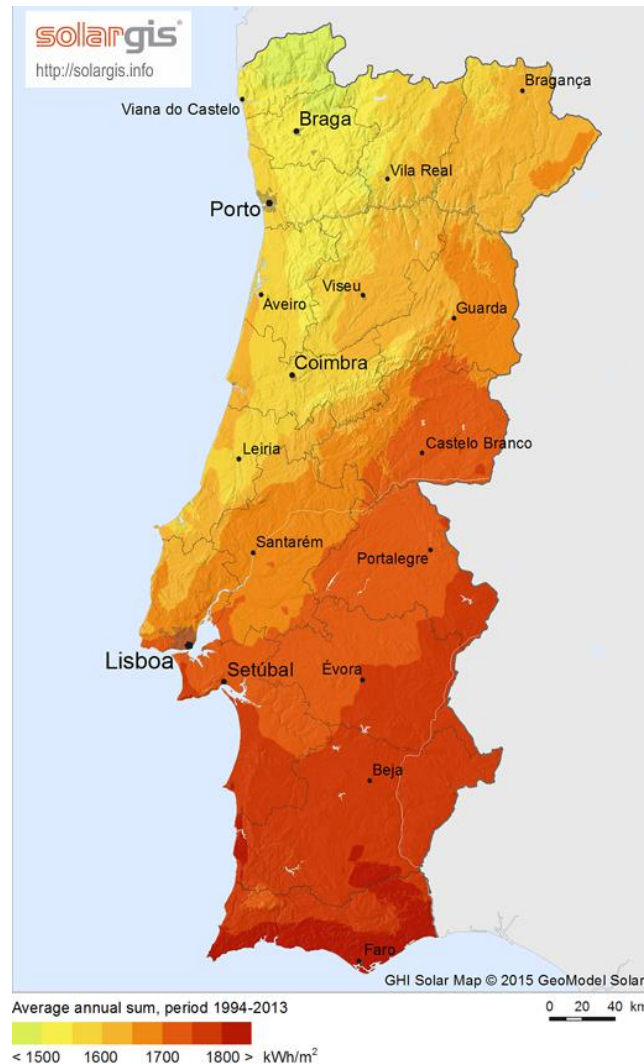


Figura 1.3 - Soma média da irradiação global horizontal em Portugal Continental, de 1994 a 2013 (*iMaps GeoModel Solar*).

Distância Terra-Sol

O Sol e a Terra distam entre si uma unidade astronómica (UA), distância que pode ser aproximada por $1,496 \times 10^{11}$ metros.

O movimento de translação da Terra em torno do Sol, descrito por uma elipse, faz com que a distância Terra-Sol sofra variação ao longo do ano. A Terra atinge o periélio, isto é, o ponto da sua órbita mais próximo do Sol, no princípio do mês de janeiro, onde dista do Sol aproximadamente $1,471 \times 10^{11}$ metros. Atinge o afélio, isto é, ponto da órbita mais afastado do Sol, no início de julho, distando aproximadamente $1,521 \times 10^{11}$ metros do Sol. Como tal, para o hemisfério norte, a Terra está mais próxima do Sol no inverno e mais distante no verão. Contudo, a intensidade de radiação recebida é maior no verão do que no inverno. [12]

Declinação

A declinação, expressa em graus ou radianos, varia consoante o dia do ano. Pode considerar-se constante para cada dia, pois sofre uma variação máxima de 0.5°. Corresponde ao ângulo formado entre a linha que liga o centro do Sol ao centro da Terra e o plano do equador. Tem valor negativo para o hemisfério norte.

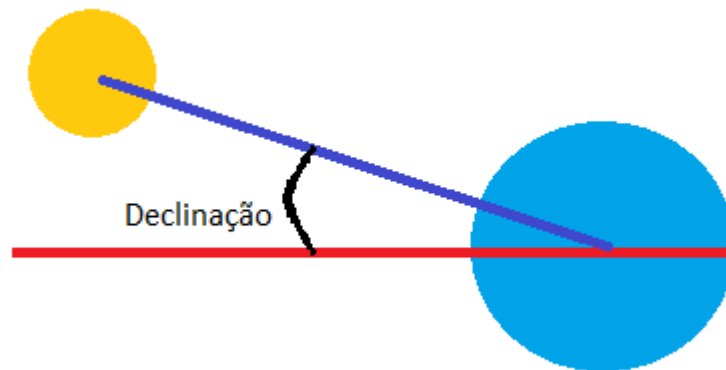


Figura 1.4 – Representação do ângulo de declinação.

O ângulo de declinação (δ) para 21 de dezembro obtém-se pela equação 1.1 (d_n representa o dia juliano, que tem o valor de 355 para o dia 21 de dezembro):

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right] = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (355 + 284) \right] = -23.43^\circ \quad (1.1)$$

No hemisfério norte, a declinação atinge o seu ângulo mínimo (-23.27 graus) no solstício de inverno, a 21 de dezembro, e o seu ângulo máximo (23.27 graus) a 21 de junho, no solstício de verão.

Altura Solar

A altura solar (α) está compreendida entre os 0 e os 90 graus, em que 0° corresponde à posição horizontal e os 90° ao zénite. Quando o Sol se encontra na posição de zénite, a espessura da atmosfera atravessada pela sua radiação é mínima (está completamente na vertical em relação à superfície) e a radiação recebida na superfície é máxima. A altura solar é em média mais elevada no verão do que no inverno, o que faz com que a porção de atmosfera que a radiação tem de atravessar seja menor no verão, resultando em maiores intensidades de radiação à superfície terrestre. Assim, apesar de no verão do hemisfério norte o Sol estar mais distante da Terra (devido à inclinação do eixo terrestre), esta distância é negligenciável, uma vez que o percurso efetuado pela radiação para chegar à superfície é mais curto, e logo a intensidade de radiação à superfície será maior no verão, mesmo que hipoteticamente não houvesse nebulosidade no inverno. [9]

Calcula-se em função da declinação (δ), latitude (ϕ) e ângulo solar (ω), pela equação 1.2:

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin \delta \times \sin \phi + \cos \delta \times \cos \phi \times \cos \omega] \quad (1.2)$$

A altura solar e outros parâmetros que se descreverão a seguir estão representados na figura 1.5:

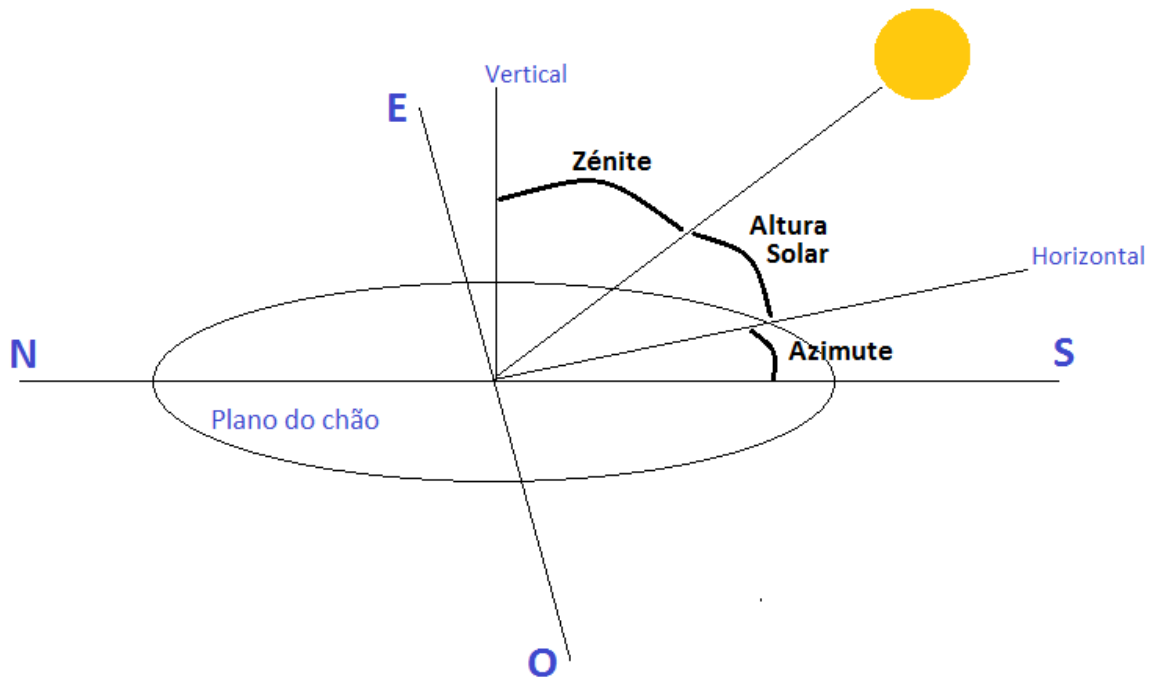


Figura 1.5 – Representação dos vários parâmetros de localização do Sol.

Ângulo Zenital

O ângulo zenital (φ) classifica a elevação solar. A elevação solar descreve uma curva ao longo do dia, e tem o seu valor máximo ao meio-dia solar. Esse máximo do meio-dia solar, tem o maior valor do ano no solstício de verão, a 21 de junho, e atinge o valor mínimo no solstício de inverno, a 21 de dezembro.

Para a latitude de Lisboa, esse máximo verificado no verão é de aproximadamente 75° , e o seu mínimo no inverno de cerca de 27° . Quanto mais baixo é este ângulo, maior obliquidade dos raios solares se verifica, resultando numa maior distância a percorrer pelos raios na atmosfera. Quanto maior a distância na atmosfera que os raios tenham de percorrer, maior será a probabilidade de sofrerem difusão e absorção, o que leva a que a radiação à superfície terrestre seja menor, e as sombras formadas sejam maiores.

Azimute

O azimute (ψ) classifica a orientação do Sol, que pode ser a sul: 0° ; este: -90° e oeste: 90° . É calculado pela equação 1.3, em função da altura solar (α), declinação (δ) e latitude (ϕ):

$$\psi = \cos^{-1} \left[\frac{\sin \alpha \times \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \times \cos \phi} \right] \quad (1.3)$$

Latitude

Corresponde ao ângulo entre o plano equatorial e a superfície de referência. Representa a distância à linha do Equador, em graus, ao longo do Meridiano de *Greenwich*. Tem o valor de 0 graus no Equador, e aumenta até aos 90 graus em direção a norte ou sul.

Com o aumento da latitude (ϕ), isto é, com o afastamento à linha do Equador, os raios solares recebidos na superfície terrestre têm maior obliquidade, traduzindo-se numa maior espessura de atmosfera a atravessar e maior energia perdida, o que faz com que a radiação recebida à superfície da Terra seja menor.

Dada a inclinação do eixo da Terra e o seu movimento de translação, os raios solares incidem obliquamente a norte do trópico de Câncer (à latitude de 23.27° N) e a sul do trópico de Capricórnio (à latitude de 23.27° S), onde Sol nunca atinge o seu zénite. Portugal encontra-se a norte do trópico de Câncer e, como tal, numa zona do globo em que a incidência dos raios solares se processa de forma oblíqua.

Topografia

A topografia classifica e descreve a superfície terrestre em função dos seus acidentes morfológicos. Este parâmetro, a uma escala local, é dos que mais influencia a radiação solar recebida. Os diferentes acidentes morfológicos (vales, montanhas, etc.), a elevação, o declive e a orientação fazem com que haja diferentes sombreamentos e obstáculos à incidência de radiação.

No hemisfério Norte, são as superfícies orientadas a Sul que recebem mais horas de radiação solar, acontecendo o contrário com as superfícies orientadas a Norte.

No caso de estudos de potencial de radiação solar a um nível local, como é o caso deste projeto, a topografia tem um papel principal no potencial de radiação da superfície terrestre. Por um lado, na cidade de Lisboa, como em todo o país, são as vertentes viradas a sul as que registam um potencial mais elevado, com mais horas de exposição solar e maior intensidade da radiação incidente. Por outro lado, a influência da morfologia urbana é igualmente determinante neste tipo de análise. Logo, para uma análise de potencial solar ser bem sucedida, a topografia é um parâmetro fundamental a estudar.

1.2.4 Conversão de energia solar em eletricidade

A radiação solar incidente, energia solar, pode ser convertida em energia elétrica recorrendo a um painel solar fotovoltaico. Estes dispositivos são constituídos por células fotovoltaicas, que captam a radiação do Sol e a convertem em energia elétrica graças à diferença de potencial criada pela luz, que assim faz com que a corrente corra entre duas camadas com cargas contrárias. No geral, considera-se que convertem entre 15 a 20% da radiação solar incidente em energia elétrica.

1.3 Luminárias

1.3.1 Convencionais

As luminárias convencionais, que se observam em larga escala em Portugal, são na sua maioria constituídas por lâmpadas de vapor de mercúrio ou de vapor de sódio a alta pressão, com potências que variam entre 70 e 150 Watt, dependendo do tipo de lâmpada. Estão posicionadas num poste, que tipicamente tem uma altura de 3 a 6 metros. Cada luminária está ligada à rede elétrica da zona, e estão também interligadas entre si.

A implementação deste tipo de mobiliário urbano em zonas isoladas, longe da rede elétrica principal, constitui um problema a nível de custos e construção da obra. Para estes casos, a implementação de

luminárias solares, independentes da rede e entre elas, constitui uma alternativa, como se irá explicar à frente. Porém, o entrave para que não haja uma substituição massiva das luminárias convencionais para as solares, poderá estar no seu custo.

Como tal, para um estudo comparativo, recorreu-se ao simulador de preços disponível *online* e gratuito, propriedade da *CYPE Ingenieros*. Esta é uma empresa espanhola do ramo da construção, engenharia e arquitetura, que vende *software* adaptado às necessidades do setor, como geradores de orçamentos, geradores de preços para vários países (Europa, América e África), bases de dados e cadernos de encargos. [13]

A ferramenta usada foi o Gerador de Preços [14], que corresponde a uma base de dados interativa que permite ao utilizador, ao escolher o tipo de obra e os materiais, obter um preço total ou discriminado dos materiais e mão de obra envolvidos na realização de determinado projeto.

O custo obtido abrange o poste, a luminária, as ligações à rede, a fundação, a mão de obra dos vários profissionais e o aluguer dos materiais e meios indispensáveis à conclusão da obra.

O preço varia em função dos materiais escolhidos:

- Tipo de lâmpada: vapor de mercúrio ou vapor de sódio a alta pressão;
- Potência: entre 70 e 150 W, dependendo do tipo de lâmpada;
- Altura do poste: 3 a 6 metros

O preço da luminária em si varia de 81 a 106 €. Já o preço de toda a instalação pode ir de 553 a 649 €, dependendo do tipo de luminária utilizada e da altura do poste. A variação dos preços em função dos materiais escolhidos está representada na figura 1.6:

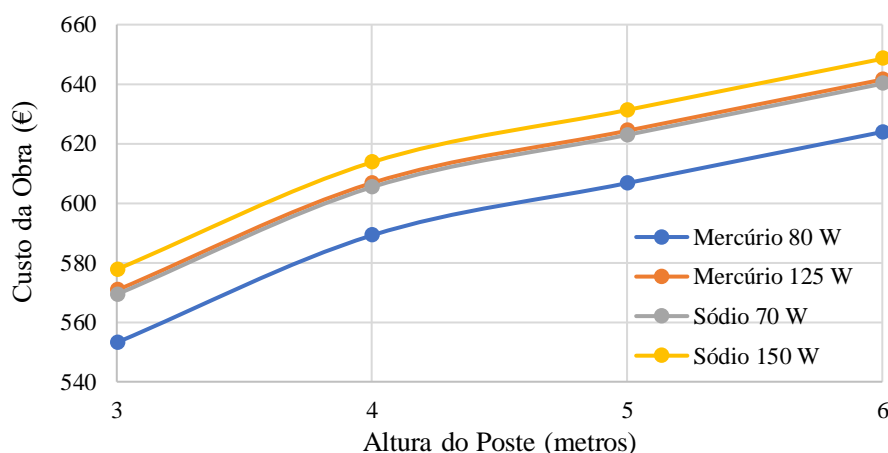


Figura 1.6 – Variação do custo de luminárias convencionais em função da altura do poste e do tipo de lâmpada.

1.3.2 Solares

Uma luminária solar é um equipamento de iluminação exterior, para rede viária ou espaços de lazer, como jardins ou vias pedonais, cuja energia gasta é de origem solar, normalmente acumulada durante o dia (quando há radiação) e gasta durante a noite, providenciando iluminação.

A **luminária** em si pode ser do tipo LED (*Light Emitting Diode*) ou não. A tecnologia LED oferece um grande número de lúmenes para um baixo consumo de energia, quando comparado com lâmpadas convencionais. Tem ainda a vantagem de não necessitar de tempo de aquecimento (*warm up*) para atingir a capacidade máxima de iluminação ao ligar – o que permite a utilização de sensores de movimento para uma poupança adicional de energia.

Acoplado à luminária está um **painel solar**, que converte a energia solar em elétrica. Deve ser montado com uma inclinação que maximize o recurso solar.

A **bateria** armazena a energia convertida durante o dia e alimenta a luminária durante a noite. Dependendo da bateria, é possível guardar energia necessária à iluminação durante algumas noites, no caso de não haver recurso solar durante um curto período de dias. Pode ficar acoplada ao poste ou enterrada no solo.

É necessário ao sistema um **controlador de carga**, que determina quando a bateria deve carregar e descarregar, protegendo-a de eventuais sobrecargas e sobre descargas, prolongando o seu tempo de vida útil.

Por último, o **poste** suporta toda esta estrutura. Nas luminárias solares é necessário um cuidado acrescido com a montagem e suporte de todos os acessórios, para que resistam bem ao vento e condições atmosféricas adversas. Adicionalmente, existe também um risco de vandalização superior ao de uma luminária convencional, devido ao elevado valor dos aparelhos como a bateria, o controlador ou o painel solar.

As luminárias solares podem ficar independentes da rede, uma vez que possuem uma bateria, facilitando assim a sua instalação em locais isolados, onde uma eventual ligação à rede seria muito dispendiosa ou até impeditiva à implementação da iluminação.

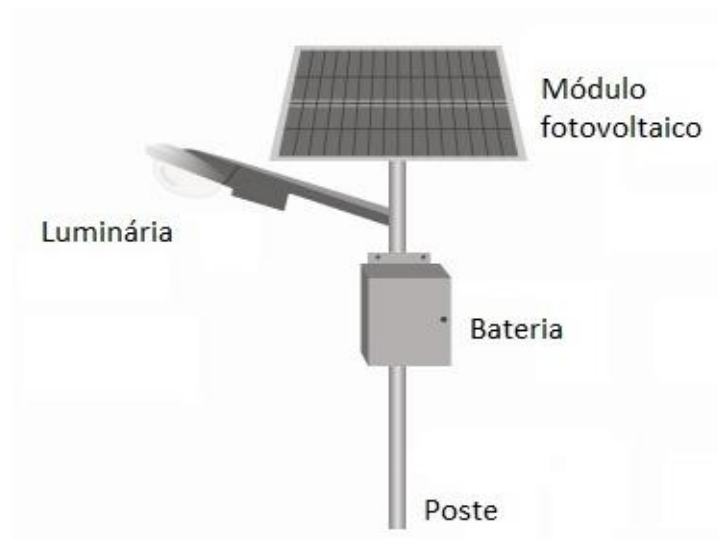


Figura 1.7 – Esquemático da possível disposição dos elementos de uma luminária solar.



Figura 1.8 – Exemplo de luminária LED alimentada a energia solar, comercializada pela *GreenWorld*.

Na tabela 1.2 encontram-se as especificações técnicas das luminárias solares do modelo *iStar*, que estão disponíveis em potências dos 10 aos 40 Watt, com garantia de 2 anos:

Tabela 1.2 – Especificações técnicas dos modelos de luminária solar *WiseBuy*, comercializados pela *GreenWorld*.¹

Nome do Modelo	iStar 10W	iStar 15W	iStar 20W	iStar 30W	iStar 40W
Preço [euros]	988	1 317	1 482	1 585	1 728
Potência do Módulo [W]	50	70	100	140	150
Capacidade da Bateria [Ah]	40	55	75	100	120
Controlador de Carga	10 A 12/24 V	10 A 12/24 V	10 A 12/24 V	10 A 12/24 V	10 A 12/24 V
Potência da Lâmpada [W]	10	15	20	30	40
Fluxo Luminoso [lm]	900 a 1000	1350 a 1650	1800 a 2200	2700 a 3300	3600 a 4400
Eficiência Luminosa [lm/W]	100	100	100	100	100
Tipo de Lâmpada	LED	LED	LED	LED	LED
Vida Útil [horas]	50 000	50 000	50 000	50 000	50 000

A **dimensão do módulo** da luminária de 10 Watt, segundo os dados do fabricante, é de 668 x 545 x 28mm, que corresponde a uma área aproximada de 0.4 m².

¹ A autora agradece o Pedro Fonte da *Wisebuy* pelo fornecimento dos dados.

1.4 Revisão Bibliográfica

No âmbito do desenvolvimento desta dissertação realizou-se uma revisão bibliográfica, que consiste na pesquisa de artigos do âmbito científico e investigações ou projetos desenvolvidos num contexto temático semelhante ao do presente trabalho.

O estudo de dados morfológicos de uma cidade constitui um importante procedimento para avaliar o recurso solar existente no espaço público urbano, dado que este é influenciado pela morfologia, malha urbana e pelos obstáculos construídos, ou seja, o edificado.

Recorreu-se para esta revisão ao sítio *online Web of Science*, que pode ser acedido por www.webofknowledge.com. Este sítio funciona como um motor de busca para artigos científicos.

É possível efetuar uma pesquisa de artigos científicos, e outros, baseada em palavras-chave, formulando uma “questão” – *query* – que contenha as palavras-chave pretendidas.

Assim, formulou-se a *query* que se mostra abaixo:

(GIS) AND (Solar) AND (urban OR city) AND (PV)

Para esta pesquisa foram encontrados 51 resultados, dos quais se indica que 33 são artigos, e os restantes são revisões (2) ou *proceedings papers* (16). Dos artigos científicos encontrados, destaca-se:

Applications of solar mapping in the urban environment – 2014 [15]

Os edifícios em contexto urbano podem ser usados para produção de eletricidade. Para tal, é necessário saber a distribuição geográfica dos mesmos, bem como a localização dos melhores sítios. A superfície da cidade pode ser modelada e assim estimar-se o potencial solar para cada localização.

O artigo avalia o potencial fotovoltaico nos edifícios residenciais, tendo em conta duas variáveis: a população existente e a energia solar recebida nas coberturas dos edifícios. O modelo desenvolvido foi testado na região de Lisboa, usando *software* de informação geográfica, informação vetorial sobre os limites dos edifícios, dados censitários e um Modelo Digital de Superfície (MDS) gerado por dados LiDAR.

O potencial total avaliado é comparado com a procura local de energia elétrica. Os resultados encontrados constituem um ponto de partida importante que pode ser usado no futuro como instrumento de apoio à tomada de decisão, no que diz respeito a investimentos na área da produção solar fotovoltaica.

Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades – 2014 [16]

Dada a elevada área de fachadas presente numa paisagem urbana, é de considerar o seu potencial solar. Desenvolveu-se uma metodologia GIS, partindo dos dados de radiação solar para coberturas, solo e fachadas; modelo 3D de edifícios e MDS a partir de dados *LiDAR*; de modo a incorporá-los e permitir uma análise completa do potencial solar. Este modelo é particularmente interessante no que toca à ajuda na tomada de decisão e à avaliação do potencial solar para cada edifício.

Pesquisando por

(LiDAR) AND (Potential) AND (Urban OR city) AND (Lisbon)

Encontraram-se os seguintes resultados de relevo:

Solar energy potential on roofs and facades in a urban landscape – 2013 [17]

No âmbito deste artigo foi desenvolvido um modelo solar a 3 dimensões para se calcular e visualizar o potencial solar dos edifícios, integrando o potencial dos telhados e das fachadas. Aplicou-se o método desenvolvido ao *Campus* da Universidade de Lisboa.

A partir de dados *LiDAR* foi construído um MDS em que foi aplicado o modelo solar. Desenvolveu-se um algoritmo que permitiu ter em conta o sombreamento tanto nas coberturas dos edifícios como nas fachadas.

Resultou deste estudo que, como esperado, as coberturas registam maior potencial solar, contudo, dada a elevada área de fachadas existente, estas têm um impacto positivo e considerável no potencial solar de edifícios em contexto urbano.

Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data – 2012 [18]

A energia solar fotovoltaica não apresenta grandes perdas de transmissão e distribuição, pois a energia é convertida no mesmo sítio de consumo. O seu pico de recurso é compatível com picos de carga / procura quando esta está diretamente relacionada com a utilização de aparelhos de ar condicionado. Permite ainda combinar a conversão de energia com o revestimento ou isolamento de edifícios através dos painéis solares.

Neste artigo foi avaliado o potencial solar para a região de Carnaxide, no distrito de Lisboa, usando dados *LiDAR* e a extensão do *ArcGIS Solar Analyst* (tal como no presente trabalho). O trabalho levado a cabo no artigo em estudo concluiu que para uma penetração PV baixa, como é a maior parte dos casos, o potencial PV pode ser estimado com fiabilidade considerando um local com inclinação e orientação ótimas e considerando que não há sombras. Contudo, para uma penetração PV alta – o que não se costuma verificar – o potencial PV seria bem estimado se se considerasse uma superfície horizontal com a área de planta dos edifícios.

1.5 Casos de Estudo – Luminárias e Mobiliário Urbano Solar

Árvore Solar – Lisboa, Praça do Município

Foi implantada na cidade de Lisboa, mais propriamente na Praça do Município, uma “Árvore Solar”, que consiste num equipamento de mobiliário urbano, inspirado numa árvore, feito de aço e que possui painéis solares fotovoltaicos (figura 1.9). Oferece ao público a possibilidade de carregar a bateria do seu telemóvel ou *gadget* eletrónico, assim como usar a internet através de *Wi-Fi*.

A estrutura chama-se *Vtree Solar*, e foi colocada em Lisboa, no dia 13 de fevereiro de 2017, ao abrigo do programa da comunidade europeia *Sharing Cities*, que tem como objetivo promover a sustentabilidade urbana através da criação de soluções tecnológicas.

A conceção do equipamento ficou a cargo da *start-up* portuguesa VTREE, e o objetivo é este ir mudando periodicamente para outras praças da cidade. Segundo um dos fundadores da *start-up*, Francisco Santos, a estrutura em árvore foi pensada tendo como inspiração as florestas da Transilvânia, Roménia, país dos outros fundadores do projeto, onde ganhou o prémio “*Smart City Industry Awards*”, na categoria “*Data & Technology*”.

A estrutura possui, no total, 5 metros quadrados de painéis solares destinados a recolher recurso solar para o converter em energia elétrica, utilizável por qualquer utente que passe por aquela zona da cidade. As “raízes” da árvore contêm as baterias e entradas USB necessárias; e nas ramificações encontram-se as lâmpadas, do tipo LED, e os painéis solares fotovoltaicos.

Este tipo de mobiliário revela-se um contributo para a decoração do espaço público e para a iluminação noturna, promovendo a segurança e a imagem sustentável das cidades e equipamentos urbanos. [19], [20]



Figura 1.9 – Árvore solar, instalada na Praça do Município, em Lisboa.

Brasil – Iluminação pública híbrida

Corria o ano de 2001 quando, no Brasil, após a ocorrência de um grave apagão, foi desenvolvido um sistema de iluminação pública pioneiro que aliou a energia solar à energia eólica, tendo por objetivo, na eventualidade de apagões futuros, manter a iluminação da cidade.

As luminárias desenvolvidas têm no topo do poste um aparelho similar a um pequeno “avião”, de cerca de 3 metros de comprimento. Este aparelho, escolhido em função da sua aerodinâmica, combina o aproveitamento de energia eólica, pelas suas hélices; e de energia solar, coletada num painel fotovoltaico existente na superfície plana, as “asas” do avião. As hélices do avião podem girar e posicionar-se de forma a aproveitar o maior recurso eólico possível.

O painel solar tem uma potência máxima de 400 W e as hélices produzem até 1 kW. Existe a particularidade de cada poste poder alimentar até 3 postes de iluminação em simultâneo, isto é, cada poste com avião será capaz de abastecer mais dois postes sem este aparelho. As baterias de cada poste têm uma autonomia que pode chegar às 70 horas.



Figura 1.10 – Luminária híbrida, que combina o uso da energia solar e eólica. [21]

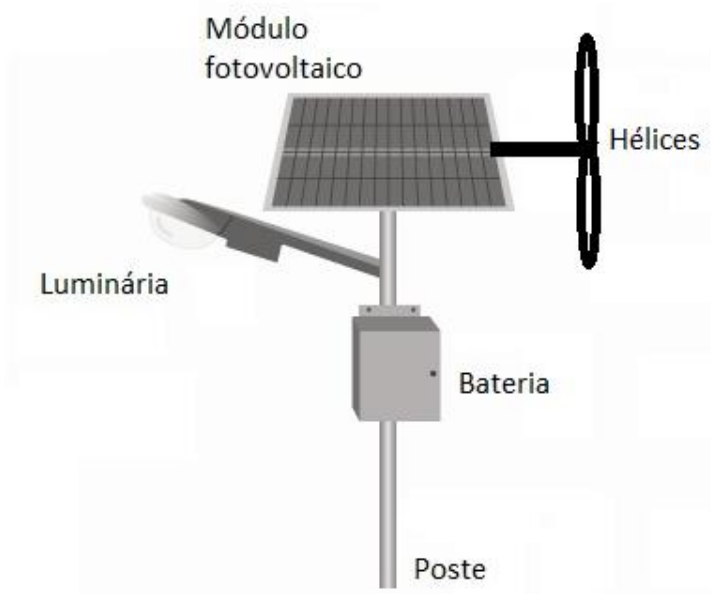


Figura 1.11 – Esquemático da luminária híbrida.

Este projeto possibilitou a poupança de 9 200 € por quilómetro/mês, com a instalação de cada poste a ficar 10% mais barata que os convencionais, devido à inexistência de cabos de ligação à rede e subestações. [21]

Este tipo de luminárias criado integra de uma forma interessante a energia fotovoltaica e eólica, ao mesmo tempo que desconstrói esteticamente, de uma forma positiva, a estrutura comum das luminárias solares.

Kabul - Solar Street Lights (Luminárias de Rua Solares)

O projeto de Kabul data do ano de 2010 e consistiu na implementação de 28 luminárias solares na cidade. Este projeto teve um impacto muito positivo na vida da população, pois significou uma melhoria considerável na sua segurança. A velha infraestrutura elétrica de Kabul, arruinada pela guerra, não conseguia suportar com consistência uma aparentemente simples rede de iluminação pública, pois a procura de energia era maior que a energia que efetivamente chegava à rede. A reparação da infraestrutura de distribuição elétrica, sobretudo a enterrada, iria representar muito tempo de obras. Por estes motivos, as luminárias convencionais existentes não estavam a ser usadas.

Após a concretização do projeto, a população reportou um aumento de segurança nas ruas e consequente melhoria na economia, dado que o comércio passou a funcionar mais quatro a cinco horas por dia. Por outro lado, a rede elétrica ficou um pouco menos sobrecarregada, já que as luminárias solares não se traduzem numa solicitação de energia à rede. [22]

1.6 Sistemas de Informação Geográfica

O *ArcGIS* é um *software* informático, propriedade da ESRI, de sistemas de informação geográfica. Este *software* permite a manipulação de dados geográficos sob a forma de mapa e foi o usado neste projeto.

1.6.1 Solar Analyst

O modelo solar utilizado foi o *Solar Analyst*, inserido no *ArcGIS* 10.3. Este modelo tem como base algorítmica o *Hemispherical Viewshed Algorithm*, criado por Fu e Rich, em 1999.

Tabela 1.3 – Diferentes ferramentas do *Solar Analyst* no *ArcGIS*.

Ferramenta	Descrição
Radiação Solar por Áreas <i>Area Solar Radiation</i>	Obtém a radiação solar incidente através de um ficheiro <i>raster</i> .
Radiação Solar por Pontos <i>Points Solar Radiation</i>	Obtém a radiação solar incidente para localizações específicas num ficheiro <i>feature</i> ou tabela de localização.
Gráficos de Radiação Solar <i>Solar Radiation Graphics</i>	Obtém representações <i>raster</i> do <i>viewshed</i> ² hemisférico, mapa do sol e mapa do céu, que são usados no cálculo da radiação solar direta, difusa e global.

² O *viewshed* é importante nas situações em que é necessário saber de que localizações será visível um objeto implantado numa paisagem.

O cálculo do *viewshed* parte de um *input raster*, identificando os pixéis que podem ser vistos de um ou vários pontos de observação. No caso de se considerar apenas um ponto de observação, como *output*, é atribuído a cada pixel o valor de 1 ou 0, conforme é possível ou não a cada ponto obter visibilidade para o ponto de observação considerado.

Para uma explicação mais detalhada, consultar a referência [23].

O *Solar Analyst* permite o mapeamento e análise da radiação solar numa certa área e durante certos períodos de tempo, usando preferencialmente um Modelo Digital de Superfície. Tem em conta as condições atmosféricas, a latitude, elevação, topografia, inclinação, orientação, posição do Sol, e sombreamentos causados por edifícios circundantes ou acidentes geográficos caraterísticos da topografia de determinado local. Devolve o cálculo da irradiação solar incidente, em Wh/m^2 , para um determinado intervalo de tempo numa área escolhida. [18]

Modelação da Radiação Solar

À superfície terrestre a radiação solar chega sob a forma de três componentes: direta, difusa e refletida. O *Solar Analyst* calcula a radiação global pela soma das componentes direta e difusa.

O modelo gera mapas de radiação global, radiação direta, radiação difusa e duração da radiação direta.

As ferramentas de análise da radiação solar no *ArcGIS* permitem o mapeamento e respetiva análise da irradiação solar para um certo período temporal e área geográfica. O *Area Solar Radiation* usou-se para simular a radiação de uma área, sendo que os cálculos são repetidos para cada superfície de entrada, e o resultado é um mapa de insolação para a área geográfica inteira. São tidas em consideração a superfície de orientação e as sombras resultantes do modelo de elevação usado. [24]

As etapas são as que se seguem:

1. Cálculo de um *viewshed* hemisférico ascendente baseado na topografia da área.
 2. Sobreposição do *viewshed* num *sunmap* para estimar a radiação direta.
 3. Sobreposição do *viewshed* num *skymap* para estimar a radiação difusa.
 4. Repetição do processo para cada área de interesse, de modo a produzir um mapa de insolação.
- **Viewshed** – representa a distribuição angular da obstrução do céu, e calcula o máximo de obstruções em cada direção. Corresponde a uma fotografia hemisférica vista de baixo para cima.
 - **Sunmap** – representa a radiação direta proveniente de cada direção do céu. Corresponde a um mapa do hemisfério contendo vários setores, revelando os dias e meses do ano.
 - **Skymap** – representa a radiação direta e difusa proveniente de qualquer direção do céu. É construído a partir das divisões do zénite e azimute, parâmetros que resultam na divisão do céu em vários setores (8 x 8).

Ao sobrepor estes mapas, é possível obter-se a radiação solar direta e difusa. Sobrepondo o *Viewshed* e o *Sunmap*, obtém-se a radiação solar direta. Sobrepondo o *Viewshed* com o *Skymap*, obtém-se a radiação solar difusa. [24]

1.6.2 Dados LiDAR

LiDAR, acrónimo para *Light Detection and Ranging*, é uma tecnologia de aquisição de dados geográficos de altitude.

É considerada deteção remota ativa, isto é, a partir de um sensor é emitida energia para uma superfície. Essa energia enviada é refletida pelos objetos da superfície, e posteriormente medida pelo sensor, dando origem à modelação das alturas das superfícies e objetos existentes.

No caso específico da tecnologia LiDAR, existe um laser de alta precisão que, num helicóptero ou outro meio aéreo, lança feixes de luz na direção de um espelho, que são depois transmitidos para a superfície terrestre a analisar. A superfície é varrida por raios laser, e através do intervalo de tempo decorrido entre o envio do laser pelo sensor até à receção do mesmo no sensor, por reflexão na superfície terrestre, é encontrada a distância desde o sensor até aos objetos existentes. Assim, forma-se uma imagem com os registos altimétricos. O resultado é uma nuvem de pontos com informação sobre a altimetria. Esta informação é posteriormente processada por forma a produzir um modelo *raster* – Modelo Digital de Superfície (MDS).

O modelo digital de superfície usado nesta dissertação, com 1 metro quadrado de resolução, foi obtido pela tecnologia *LiDAR*.

Pode utilizar-se um Modelo Digital de Terreno (MDT), ou DTM (*Digital Terrain Model*), que é um modelo de elevação com informação referente apenas ao solo a descoberto (sem informação de edifícios, vegetação e outros eventuais objetos). Porém, a forma mais correta de representar uma superfície urbana é considerar os elementos à sua superfície. Deste modo, o MDS é o parâmetro essencial a partir do qual se deve fazer a modelação.

O MDS ou DSM, (*Digital Surface Model*), contém informação referente ao solo descoberto e também a todo o edificado e outros objetos presentes à superfície dos terrenos, como edifícios, árvores e outras estruturas presentes na paisagem.

Outro produto possível de derivar é o nDSM, que corresponde ao *Normalized Digital Surface Model*, ou seja, Modelo Digital de Superfície Normalizado, e obtém-se subtraindo o DTM ao DSM, como se mostra na figura 1.12.

O nDSM fica assim com a informação de elevação apenas relativa aos edifícios e outros objetos da paisagem, excluindo a elevação “normal” dos terrenos em relação ao nível das águas do mar.

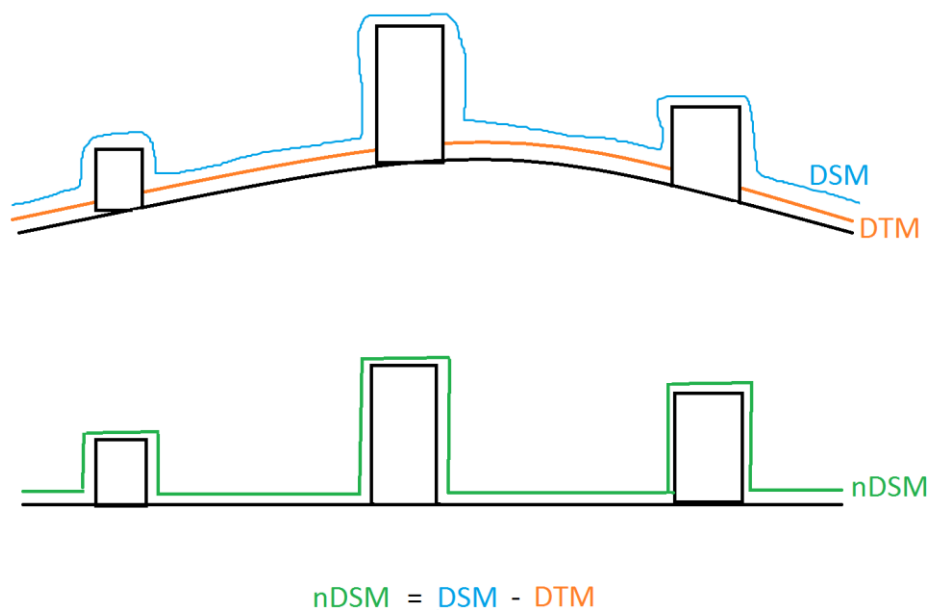


Figura 1.12 – Representação esquemática do cálculo do nDSM a partir do DSM e DTM.

1.7 Objetivo

O objetivo deste trabalho é, partindo de dados geográficos da morfologia da superfície da cidade, chegar aos dados de recurso solar existentes em determinados espaços públicos de Lisboa, de forma a avaliar a sua viabilidade para a instalação ou substituição de luminárias convencionais por luminárias solares. Esta troca visa proporcionar uma poupança monetária e de recurso elétrico, ao mesmo tempo que não se compromete a sua funcionalidade e a segurança dos utilizadores.

De forma a obter os dados pretendidos, o recurso utilizado para o processo descrito é o *software SIG*, particularmente o *ArcGIS*.

Esta dissertação apresentará no capítulo 2 a metodologia, seguida pelo capítulo 3 com os resultados e por último as considerações finais, no capítulo 4.

2 Metodologia

2.1 Dia a Modelar

Devido ao movimento aparente do Sol, a energia por si emitida que chega à Terra vai sofrendo variações ao longo do ano.

Ao projetar e dimensionar um sistema solar autónomo (*off-grid*), tem-se em conta o pior cenário possível, isto é, o dia do ano com menos recurso solar para conversão de energia. Se o sistema ficar dimensionado para que seja possível suprir as necessidades básicas de energia no pior dia do ano, garante-se que o sistema é eficaz nos restantes dias.

O dia com menos exposição solar de todo o ano é 21 de dezembro, dia do solstício de inverno e a altura em que se regista um ângulo de declinação mais reduzido, de -23 graus e 27 minutos.

Neste dia, o Sol tem o seu ângulo de elevação mais baixo, o que faz com que a espessura da atmosfera atravessada pelos raios solares seja máxima, e aí se perca intensidade na radiação.

É o dia com menos horas de Sol por ser o dia mais curto do ano, e a sua duração (N_d) calcula-se pela equação 2.1:

$$N_d = \frac{2 \times \omega_S}{15} = \frac{2 \times 69.68^\circ}{15} = 9 \text{ h } 17 \text{ minutos} \quad (2.1)$$

Com o ângulo solar (ω_S) (em função da latitude ϕ de Lisboa e da declinação δ do dia 21 de dezembro) a calcular-se pela equação 2.2:

$$\omega_S = \cos^{-1}(-\tan \phi \times \tan \delta) = \cos^{-1}(-\tan(38.7^\circ) \times \tan(-23.43^\circ)) = 69.68^\circ \quad (2.2)$$

A hora do nascer do Sol (LAT) é dada pela equação 2.3:

$$LAT = 12 - \frac{\omega_S}{15} = 12 - \frac{69.68^\circ}{15} = 7 \text{ h } 21' 17'' \quad (2.3)$$

Então, o pôr do Sol será 9 horas e 17 minutos depois do nascer do Sol, logo, às 16 horas e 38 minutos. Considerar-se-á, daqui para a frente, uma duração média do dia de 9 horas e meia.

Pelo exposto neste subcapítulo, define-se que as simulações solares deste projeto serão efetuadas para o dia 21 de dezembro.

2.2 Dados Originais e Condições

O trabalho recorreu aos seguintes dados geográficos no sistema de referência ETRS89-PT-TM06:

- Localização das zonas em estudo: Baixa e Parque das Nações assinaladas na planta da cidade de Lisboa.

- Modelo DSM de cada zona de Lisboa: Baixa e Parque das Nações. Foi obtido pela tecnologia *LiDAR*, tem 1 metro quadrado de resolução espacial e provém de um voo realizado em 2006.
- Modelo nDSM das duas zonas de Lisboa: Baixa e Parque das Nações. [25]
- Ficheiro *raster* com os edifícios das zonas em estudo. Onde existem edifícios os pixéis têm valor 1, onde não há edifícios o valor é *NoData*.
- *Shapefile* polígono com a forma dos edifícios para as áreas de estudo, com informação da localização, e informação adicional como o número de pisos, a área, etc.
- *Shapefile* linha com as estradas e ruas da cidade de Lisboa, com as respetivas designações retiradas da plataforma gratuita *OpenStreet Maps*.

Tendo como objetivo quantificar a energia solar disponível a diferentes alturas do solo, foi necessário criar sucessivas *layers* que representassem esta situação.

Dadas as informações de partida, o objetivo foi, através de várias condições, chegar a uma *layer* com informação da elevação do terreno e também dos objetos nele existentes, mas de forma que, nessa *layer*, se possa ir aumentando a elevação do solo, metro a metro, até à altura do edifício mais alto, mas sem elevar a altura dos edifícios.

Esta condição possibilita o cálculo dos valores de radiação solar fora dos edifícios e a várias alturas do solo, de modo a reproduzir as várias alturas a que uma eventual luminária solar poderá ser colocada. Assim, o que se pretende criar é um DSM em que a altura referente às vias de comunicação e espaços sem edificado possa ser alterada sem prejuízo para as informações relativas ao edificado urbano.

Para chegar às *layers* pretendidas de forma a efetuar as simulações solares, foram necessárias várias condições geradas a partir dos dados originais. As *layers* abaixo discriminadas foram criadas a partir dos dados originais, usando as condições descritas, efetuadas no *Raster Calculator*.

- **expo_01_final, baixa_01_final**

Esta *layer* foi feita a partir da *layer* **edifícios_raster.tif**, onde se fez corresponder às zonas *NoData* (sem edifícios) o valor de 0, pela seguinte condição:

Con (edifícios_raster.tif = 1, 1, 0)

Obteve-se uma *layer*, a que se chamou **edifícios_01.tif**, onde para cada zona de Lisboa a estudar, um pixel correspondente a uma zona onde esteja localizado um edifício tem o valor 1, e um pixel sem edifício tem o valor 0. Com esta operação, foram eliminados os registos *NoData*.

- **DSM_ND_**

De seguida, criou-se uma *layer* para cada zona da cidade, em que nas áreas sem edifícios, a informação é a do DSM, e onde há edifícios, o valor do pixel passou a ser *NoData*. A essa *layer* chamou-se **DSM_ND_Expo**, e obteve-se a partir da seguinte condição (exemplo para o Parque das Nações):

Con (edifícios_01.tif = 1, -3...E48, DSM_Expo)

O objetivo é combinar na mesma *layer* a altura dos edifícios (que se mantém constante) e a altura do terreno circundante (onde não há edifícios) com elevações de 0 a 35 metros (altura máxima dos edifícios) adicionais ao estabelecido no DSM.

- **DSM_com elevação**

Abaixo o exemplo da condição para o Parque das Nações, para uma altura de terreno correspondente a (DSM + 5 metros), a que se chamou **DSM_Expo_5m**:

Con (IsNull (DSM_ND_Expo), DSM_Expo, (DSM_ND_Expo + 5))

Destas operações resultaram 8 *layers* para cada zona em estudo, contendo edifícios com a mesma altura do DSM e terreno com altura a variar de DSM + 0 metros a DSM + 35 metros, de 5 em 5 metros. A altura de 35 metros foi escolhida como máxima por ser a altura máxima dos edifícios existentes nas duas áreas. Não faria sentido ver a radiação muito acima das coberturas dos edifícios, dado que já não se verificaria aí sombreamento. Um esquemático destas operações encontra-se na figura 2.1:

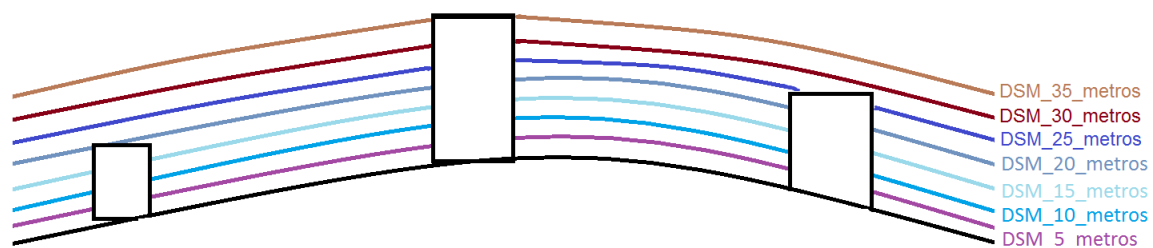


Figura 2.1- Esquemático das operações desenvolvidas – DSM com elevação.

Após estas condições, determinou-se a radiação solar incidente para cada zona a cada elevação estabelecida através a ferramenta *Solar Analyst* do *ArcToolbox*,

ArcToolbox → *Spatial Analyst Tools* → *Solar Radiation* → *Area Solar Radiation*

Esta *tool* requer um ficheiro de *input*, o DSM, assim como a definição de vários parâmetros, que se explicam no subcapítulo “Parametrização da *Tool*”.

Reformulação das Áreas em Estudo

A ideia original consistiu em fazer a modelação para 4 áreas distintas de Lisboa, localizadas na Baixa de Lisboa, bairro da Madre de Deus, Alta de Lisboa e Parque das Nações. Porém, ao fazer-se as primeiras simulações de teste com a resolução pretendida, o tempo das simulações para cada área e cada altura do solo variou entre 24 e 32 horas, o que tornou inviável a realização do estudo e o respetivo tratamento dos dados.

Optou-se por fazer incidir o projeto a apenas duas zonas de Lisboa, a Baixa e o Parque das Nações, por serem as zonas mais interessantes a nível das características que apresentavam: a Baixa, uma zona de densa malha urbana uniforme e construção antiga; o Parque das Nações pelo contrário, uma zona moderna, com edifícios de várias alturas e uma malha urbana mais leve e diversificada.

Posto isto, e voltando a efetuar simulações de teste, circunscreveu-se cada área a um quadrado com 300 metros de largura, ou seja, 0.09 km² de área, por ser desta forma possível a modelação solar com a resolução máxima e um tratamento de dados eficaz.

A localização das áreas em estudo escolhidas na cidade de Lisboa é a que se ilustra na figura 2.2, a vermelho:



Figura 2.2 – Localização, a vermelho, das duas zonas de estudo na cidade de Lisboa. Acima, o Parque das Nações, mais abaixo, a Baixa. (Google Maps)

2.3 Morfologia das zonas em estudo

As zonas da Baixa e Parque das Nações foram escolhidas para sobre elas se efetuarem as modelações devido ao facto de cada uma delas apresentar características morfológicas bastante distintas entre si e do resto da cidade, podendo assim analisar-se várias situações diferentes em apenas duas áreas. São zonas distintas em termos de planeamento, densidade e tipo de malha urbana.

Baixa de Lisboa

A zona da Baixa de Lisboa é a zona de construção mais antiga contemplada neste trabalho, e caracteriza-se por ter uma zona plana e baixa, com uma construção geométrica (idealizada pelo Marquês de Pombal na reconstrução de Lisboa aquando do sismo de 1755); bem como uma zona de construção mais desordenada, na vertente da encosta do castelo, onde o terreno atinge uma elevação superior. Restringiu-se o estudo à Baixa Pombalina propriamente dita onde se verificam ruas de traçado geométrico ortogonal.

A construção nesta zona tem grande densidade, e os edifícios são tipicamente de 3 ou 4 pisos. As ruas principais apresentam uma orientação Norte-Sul, fazendo com que a maior parte dos edifícios tenham as suas fachadas orientadas a Este e Oeste. Deste modo, as fachadas/topos verificam incidência do Sol nas primeiras e nas últimas horas do dia, e não na altura de maior intensidade de radiação – meio dia solar.

Este traçado faz com que haja também ruas com orientação Este-Oeste, dando origem a fachadas e topos virados a Norte e Sul. Neste caso, as fachadas a sul têm grande incidência de Sol durante todo o dia, ao contrário das fachadas e topos a norte, que praticamente não recebem radiação ao longo do dia (e do ano).

A área específica escolhida para modelar foi um quadrado de 300 metros de lado, cujo DSM com indicação de ruas e edifícios se mostra abaixo:

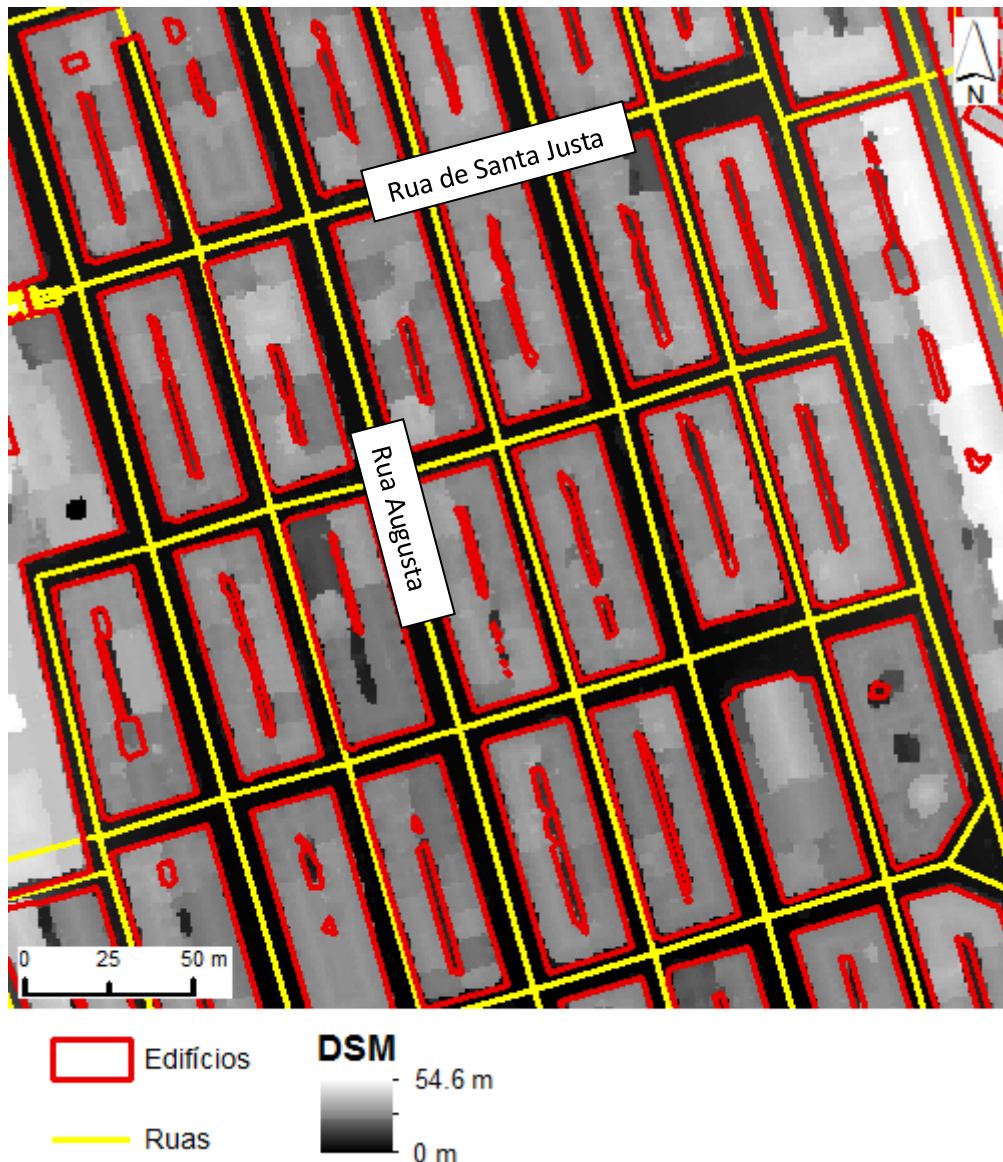


Figura 2.3 - DSM da zona da Baixa de Lisboa.

Observando o DSM é visível a disposição ortogonal das ruas, bem como a homogeneidade da disposição dos edifícios.

Parque das Nações

A segunda zona em estudo é o Parque das Nações (ou Expo). Este bairro moderno situa-se à beira Tejo, na parte mais oriental de Lisboa, e resulta de uma requalificação profunda desta área no âmbito

da Exposição Mundial de 1998 – Expo 98. O bairro do Parque das Nações nasceu da intervenção numa zona degradada e decadente, a nível paisagístico, social e ambiental, onde coexistiam velhas indústrias, armazéns abandonados e construções devolutas.

A intervenção teve o objetivo de valorizar aquela zona esquecida da cidade, e como tal a reabilitação deu-se no sentido da construção de zona habitacional, infraestruturas de comunicação e transportes públicos, e áreas de lazer e serviços.

A zona do Parque das Nações tem maior número de ruas com direção aproximada Norte-Sul. As construções existentes não obedecem a nenhum padrão específico, como acontece na Baixa, gerando assim ruas com traçados diferentes entre si.

Escolheu-se uma área na forma de um quadrado de 300 metros de lado, cujo DSM com indicação de ruas e edifícios se mostra abaixo:

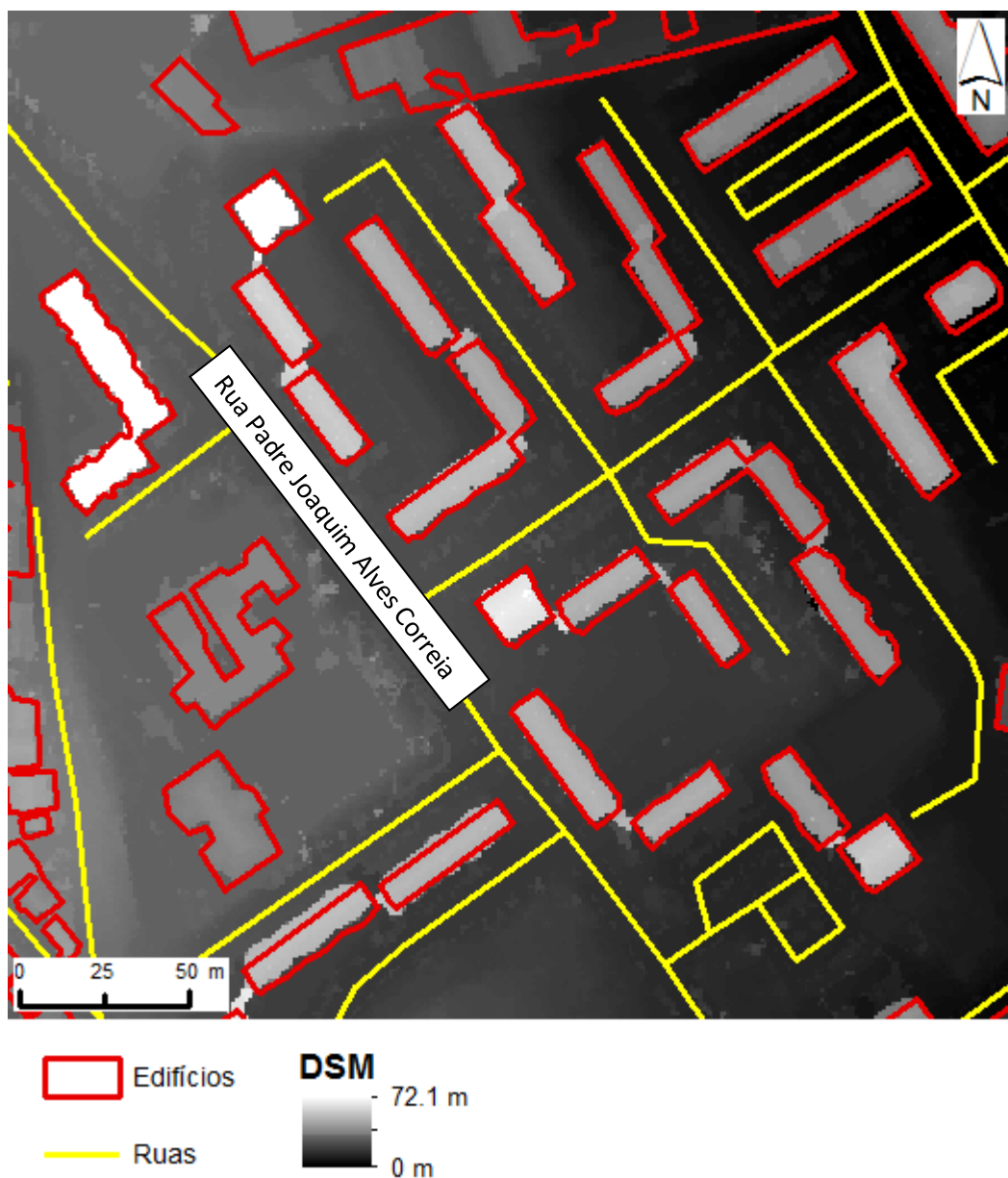


Figura 2.4 - DSM da zona do Parque das Nações.

Por observação da figura 2.4 percebe-se que, em comparação com a Baixa, esta zona aparenta uma densidade de edifícios menor, e a sua disposição aparenta ser bem mais desordenada. Contudo, ao reparar na malha de ruas, verifica-se que esta também é predominantemente ortogonal, originando ruas de direção Norte-Sul e Este-Oeste. Nesta área verificam-se edifícios de alturas mais variadas do que na zona da Baixa.

Para selecionar as duas zonas a estudar, criou-se no *ArcGIS* um quadrado de molde com as dimensões pretendidas – 300 por 300 metros – localizado sobre o DSM original das áreas da Baixa e do Parque das Nações. Para se “cortar” um quadrado menor, dentro das zonas anteriormente referidas, foi usada a opção *Extract By Mask*:

ArcToolbox → *Spatial Analyst Tools* → *Extraction* → *Extract By Mask*.

No primeiro *input* pedido pela ferramenta foi colocado o DSM pretendido; no segundo *input* colocou-se o quadrado de molde com as dimensões que se pretende no novo DSM; no *output* colocou-se o nome e pasta de destino do resultado da extração.

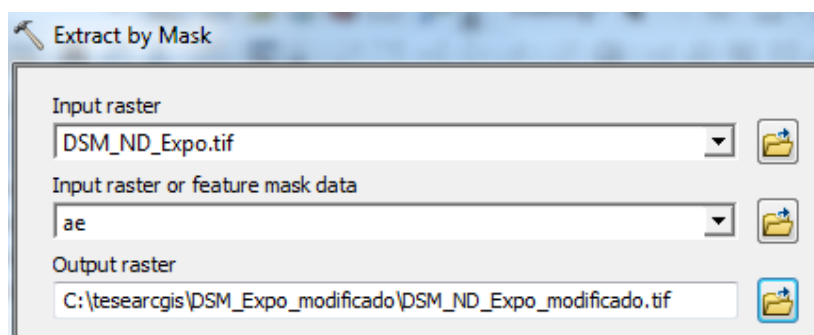


Figura 2.5 - *Toolbox Extract by Mask*.

De seguida, repetiu-se o procedimento para adicionar altura aos DSM's. Daí resultaram DSM's da área pretendida do Parque das Nações e da Baixa com alturas de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 metros.

2.4 Definição dos Parâmetros a usar na Modelação Solar

2.4.1 Latitude

O valor predefinido de latitude é 45° Norte, que não corresponde exatamente à zona em estudo. É possível indicar a latitude de cada área a modelar, porém, as latitudes são definidas automaticamente com a introdução de um DSM de *input* (a latitude já foi previamente atribuída ao DSM), pelo que não houve necessidade de introdução manual dos valores.

Os valores associados aos DSM's são os seguintes:

Tabela 2.1 - Latitude das zonas em estudo.

Zona em estudo	Latitude (° N)
Baixa de Lisboa	38.7101
Parque das Nações	38.7703

2.4.2 Resolução do Céu - *Sky Size*

Este parâmetro define o tamanho do céu, que é a resolução usada nos cálculos de radiação que irá ser apresentada no *Viewshed*, *Sunmap*, *Skymap* e *Direct Radiation Duration*.

O valor mínimo e predefinido é de 200 x 200 e o valor máximo admitido é 4000 x 4000. Com a resolução máxima, o tempo de processamento dos dados é superior, mas também o seu rigor e definição.

Este parâmetro já foi testado anteriormente noutros trabalhos [26], contudo, existem variações possíveis consoante o processador utilizado, pelo que foi necessário fazer o teste. Efetuaram-se modelações ao nível do chão (0 metros), para as situações extremas: resolução máxima de 4000 x 4000 e resolução predefinida de 200 x 200, com objetivo de se analisar o tempo despendido e a nitidez e fiabilidade dos resultados. A partir daí, foram realizadas modelações com resoluções intermédias. Testaram-se as resoluções seguintes:

- 4000 x 4000
- 2000 x 2000
- 1000 x 1000
- 500 x 500
- 200 x 200

Os restantes parâmetros foram mantidos, e a opção “*create outputs in each interval*” não foi marcada.

Foram pedidos *outputs* de radiação global (predefinido) e os *outputs* opcionais de radiação direta e radiação difusa. Cada modelação deu origem a 3 *outputs* distintos: Radiação Global, Radiação Direta e Radiação Difusa.

Analisaram-se dois aspetos importantes: o tempo decorrido por cada simulação consoante a sua resolução, e a fiabilidade dos dados obtidos para cada resolução. Os tempos decorridos de cada simulação para os vários valores do *Sky Size* ilustram-se na tabela 2.2:

Tabela 2.2 – Tempos de simulação para o teste aos diferentes valores de resolução do céu (*sky size*).

Resolução - <i>Sky Size</i>	Tempo de simulação	
	Baixa	Parque das Nações
200 x 200	1 min 47 seg	1 min 3 seg
500 x 500	3 min 32 seg	2 min 57 seg
1000 x 1000	10 min 31 seg	9 min 33 seg
2000 x 2000	34 min 31 seg	34 min 59 seg
4000 x 4000	2 horas 6 min	2 horas 17 min

Ao analisar os tempos concluiu-se que a resolução do céu tem um impacto significativo no tempo de modelação, pois os tempos registados variaram entre aproximadamente 1 minuto e 2 horas e 17 minutos.

Ao nível da precisão dos dados, a utilização de uma resolução baixa leva a uma sobrestimação das quantidades de irradiação, pelo que se conclui que o modelo com resolução máxima oferece também a precisão máxima possível permitida pelo programa.

Assim, decidiu-se que o valor de resolução de céu ideal a usar é o máximo: 4000 x 4000 – dado que o tempo de simulação para as áreas em estudo é aceitável e viável de acordo com os recursos físicos existentes – o processador do computador remoto – e deste modo os dados obtidos têm a fiabilidade máxima que se pode obter usando este programa.

2.4.3 Configuração Temporal

Aqui define-se qual o dia, dias, ou intervalo de dias para que se pretende efetuar a modelação. As opções para este parâmetro são as seguintes:

- *Special Days*
- *Within a day*
- *Multiple days in a year*
- *Whole year with monthly interval*

No caso em estudo, usa-se a opção “*Within a day*”, o que significa que a modelação irá ser feita para apenas um dia do ano. É necessário definir esse dia segundo o calendário juliano, bem como a hora de início e fim da simulação – embora esta só ocorra para o período, dentro do definido, em que há Sol.

O dia 21 de dezembro equivale ao dia juliano número 355. Foi escolhido como hora de início da simulação as 7 horas da manhã, e hora de término as 18 horas, dado que o nascer e pôr do Sol ocorre dentro deste intervalo horário.

2.4.4 Intervalo Horário

Aqui define-se o intervalo de tempo entre duas modelações de dados para a mesma hora. O valor predefinido é de 0.5, isto é, em cada hora serão obtidos 2 *outputs*, 1 de meia em meia hora, durante as horas de simulação definidas.

Ao marcar-se a opção “*create outputs for each interval*”, cada *output* pedido virá dividido em bandas, em que cada banda é referente a um intervalo.

Testaram-se alguns valores de intervalo horário, isto é, marcando a opção “*create outputs for each interval*”, o que permite obter uma evolução da radiação recebida ao longo do dia, e perceber qual a influência verificada na precisão dos dados e no tempo de simulação.

Com o *sky size* definido como máximo, 4000 x 4000, foram testados os intervalos seguintes:

- 0.25 → intervalos de 15 minutos
- 0.5 → intervalos de 30 minutos
- 1 → intervalos de 60 minutos
- 1.5 → intervalos de 90 minutos

Para os quais se obteve os tempos de simulação discriminados na tabela 2.3:

Tabela 2.3 - Tempos de simulação para o teste aos diferentes valores de intervalo horário.

Intervalo Horário	Tempo de simulação	
	Baixa	Parque das Nações
0.25	2 horas 19 min	2 horas 23 min
0.5	2 horas 23 min	2 horas 24 min
1	2 horas 16 min	2 horas 22 min
1.5	2 horas 14 min	2 horas 21 min

Observa-se que pedir ao programa simulações por intervalos faz aumentar em poucos minutos o tempo total de simulação.

Pedindo *outputs* para cada intervalo horário, é possível depois, recorrendo a um algoritmo adequado, somar todas as bandas no *ArcGIS*, para se obter o valor máximo e mínimo diário de radiação. Desta soma, verifica-se que os valores totais de radiação ao fim de um dia são iguais, marcando ou não a opção “*create outputs for each interval*”. Como tal, a escolha de intervalos horários não terá influência no rigor dos dados, mas tem a vantagem de permitir obter um melhor conhecimento do comportamento da radiação ao longo do dia.

Após a análise dos testes, foi escolhido o valor de 0.25, isto é, 4 *outputs* por hora, de 15 em 15 minutos, por, ao emitir um maior número de dados, oferecer a possibilidade de um melhor conhecimento e tratamento de resultados. Para a opção escolhida, de 0.25, vem como resultado um *output* para um tipo de radiação com 38 bandas cada (38 bandas para a radiação global, 38 bandas para radiação direta e o mesmo para a radiação difusa).

2.4.5 Parâmetros Topográficos

- **Z factor (opcional)**

Parâmetro que define as unidades do terreno, e é usado para converter, por exemplo, metros para pés. Como não são necessárias conversões, usou-se o valor predefinido: 1. [27]

- **Declives e Exposição - *Slope and aspect***

Este parâmetro é relativo aos declives e exposição. Em casos de estudos de potencial de radiação solar a um nível local, como é o caso do presente estudo, a topografia tem uma influência fundamental.

A opção predefinida é *FROM_DEM*, pela qual o programa calcula todos os declives e exposições em função do ficheiro de *input*. Deste modo, todas as irregularidades do terreno são tidas em conta na modelação.

Contudo, a opção escolhida foi *FLAT_SURFACE*, que trata a superfície como plana. A opção predefinida, por ser mais rigorosa, dá origem a ruído na modelação, que dificulta depois a perceção e apresentação dos dados. Como tal, não foi essa a que prevaleceu.

- **Direções de Cálculo - *Calculation directions***

As direções de cálculo estão relacionadas com a resolução do DSM de entrada. O valor predefinido pelo programa é de 32, e todos os valores válidos têm de ser obrigatoriamente múltiplos de 8. Segundo revisão de outros projetos [26], [27], o aumento deste parâmetro não altera significativamente o tempo de simulação (diferença de 30 minutos). Quanto menor o número de direções, mais abruptas se tornam as transições na modelação, gerando um certo ruído e conseqüente subestimação da radiação recebida nas “transições” entre edifícios. Por este motivo, para se obter dados mais rigorosos, a escolha deste parâmetro recaiu para o valor máximo de 360.

2.4.6 Parâmetros de Radiação

- **Divisões do Zénite - *Zenith divisions***

Diz respeito ao número de *sky sectors* (secções do céu) para o cálculo do *Skymap*. Este parâmetro não é muito relevante, segundo revisão de outros projetos, quando não se escolhe o modelo *Standart Overcast Sky*. [26] O valor predefinido é de 8 divisões, e foi este o valor adotado.

- **Divisões Azimutais - *Azimuth divisions***

Corresponde ao número de divisões do céu para o cálculo do *Skymap*. O valor predefinido é de 8 divisões, sendo que os valores válidos são maiores de zero, múltiplos de 8 e inferiores a 160. Manteve-se nas simulações o valor predefinido, segundo revisão de bibliografia. [26]

- **Tipo de Modelo da Radiação Difusa - *Diffuse model type***

Este parâmetro serve para escolher como será tratada a radiação difusa, que pode ser calculada recorrendo a dois modelos distintos.

O primeiro, *STANDARD OVERCAST SKY*, corresponde à predefinição do programa, céu nublado “normal”, faz variar o fluxo de radiação difusa em função do ângulo zenital.

A forma alternativa considera o fluxo de radiação difusa de entrada como sendo o mesmo em todas as direções do céu, pode ser referido como “céu nublado uniforme”, e tem o nome de *UNIFORM SKY*, que foi o modelo escolhido para as simulações.

- **Proporção Difusa - *Diffuse proportion***

A proporção difusa corresponde à fração de radiação difusa presente na radiação global normal, e o seu valor varia entre 0 e 1. Quanto maior for o valor de proporção difusa considerado, maior é a componente de radiação difusa na radiação global. O valor predefinido pelo programa, que corresponde a dias de céu limpo, é de 0.3, ou seja, da radiação global normal, 30% desta corresponde a radiação difusa.

Foi usado o valor de 0.25 como sendo o indicado para o mês de dezembro, segundo revisão de bibliografia. [27]

- **Transmissividade - *Transmittivity***

A transmissividade quantifica a quantidade de radiação que é transmitida ao longo da atmosfera e chega até à superfície da Terra. Este valor varia entre 0 e 1, e a predefinição do programa aponta 0.5

como o valor correspondente a condições de céu limpo. A uma transmissão máxima de radiação corresponde o valor de 1, e à inexistência de transmissão corresponde o valor 0.

O valor utilizado foi de 0.65, que corresponde ao valor médio previsto para o mês de dezembro, segundo revisão bibliográfica. [27]

Os parâmetros de transmissividade e proporção difusa vêm colmatar uma lacuna importante do programa, que é o facto de este não incluir na modelação a influência das nuvens na radiação incidente. Assim, ao escolher valores para transmissividade e proporção difusa, concordantes com o dia ou mês do ano a modelar, está-se, de certa forma, a simular a influência de uma maior ou menor cobertura de nuvens.

2.4.7 *Outputs* Opcionais

Pode solicitar-se ao *Solar Analyst* os *outputs* opcionais:

- *Output direct radiation raster* – Radiação Direta
- *Output diffuse radiation raster* – Radiação Difusa
- *Output direct duration raster* – Duração da Radiação Direta

No caso em estudo, foram pedidos ao programa os *outputs* de Radiação Direta e Radiação Difusa. Um apanhado dos *outputs* pedidos e parâmetros escolhidos no *Solar Analyst* pode ser visto no Anexo 1.

2.5 Linguagem *Python*

Para correr as simulações relativas à irradiação solar para cada zona a cada altura diferente – de 0 a 35 metros – e todos os testes e calibrações realizados anteriormente, optou-se por montar um modelo no *Model Builder* do *ArcGIS*, que se exportou para linguagem *python*, para de seguida o fazer correr na janela de simulação *python* do *ArcGIS*.

A opção pelo uso do *script* em linguagem *python* deve-se a uma questão de agilizar e promover a rapidez de processo. Dado que são necessárias 8 simulações (alturas de 0 a 35 metros em relação ao DSM, de 5 em 5 metros), para cada zona, totalizam-se 16 simulações, cada uma com cerca de 2 horas de duração. Ao enviar os pedidos de simulação para um computador remoto em *script* de *python*, não é necessário ordenar o começo uma nova simulação quando a última é concluída, pois todas elas se desencadeiam conforme solicitado no ficheiro.

Na figura 2.6 encontra-se o exemplo da construção do modelo para a zona da Baixa. Um modelo similar a esse foi construído para a segunda zona em estudo, o Parque das Nações.

Começou por se arrastar para a janela de *python* todas as *layers* anteriormente calculadas, ou seja, os DSM da Baixa com elevação do terreno de 0 a 35 metros, que se encontravam na janela *ArcCatalog*. A cada *layer* conectou-se a *tool Solar Area*, devidamente parametrizada, definindo-se o *input* (DSM_Baixa_5m, por exemplo), bem como o nome e a localização dos respetivos ficheiros de saída (Baixa_Global_5m, por exemplo), para os dados de radiação global, direta e difusa.

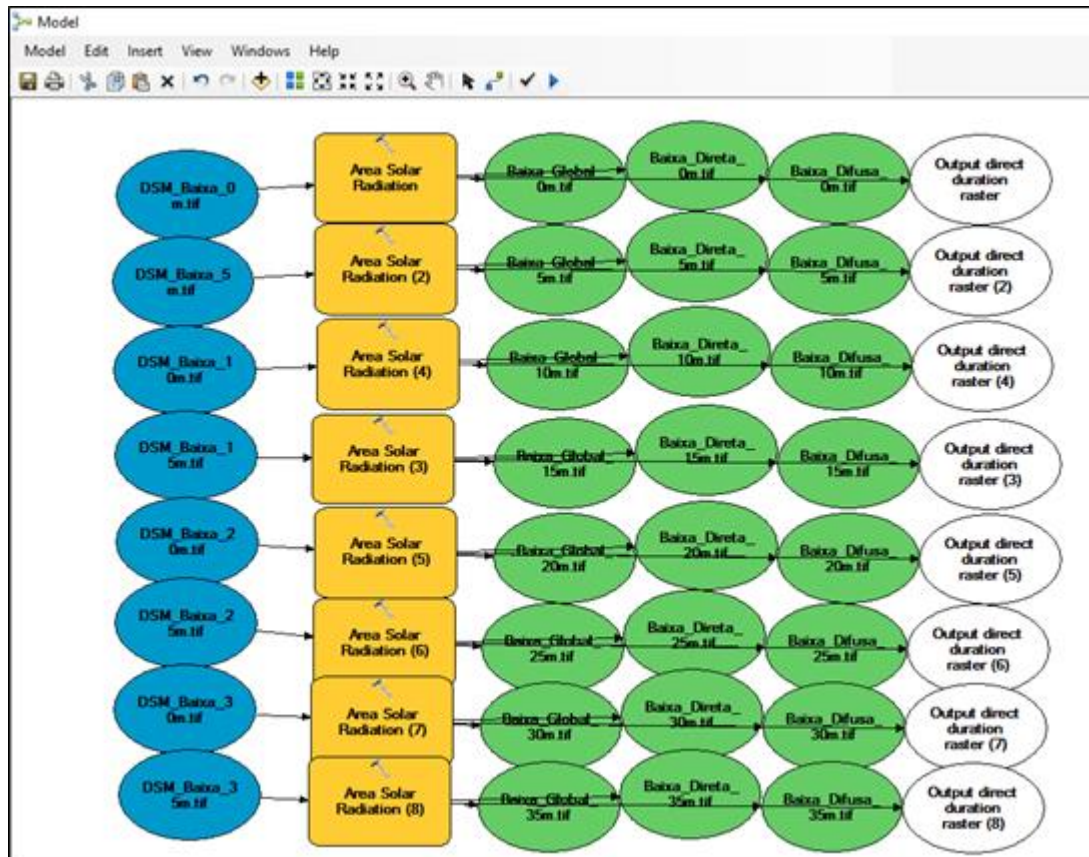


Figura 2.6 - Montagem do modelo no *Model Builder*, *ArcGIS*

De seguida, o modelo criado foi guardado e exportado para linguagem *python*, onde foi “chamado” através da opção *Python* do *ArcMap*.

2.6 Problemática dos “Falsos Muros”

Corridas as simulações solares com os parâmetros listados acima, verificou-se a existência de anormalidades nos resultados, que se concluiu serem fruto do desfasamento que ocorria entre duas das *layers* fornecidas como dados de partida: as áreas correspondentes a edificado no DSM e o seu contorno na *layer* **edificios_01**, como se percebe pela figura 2.7:

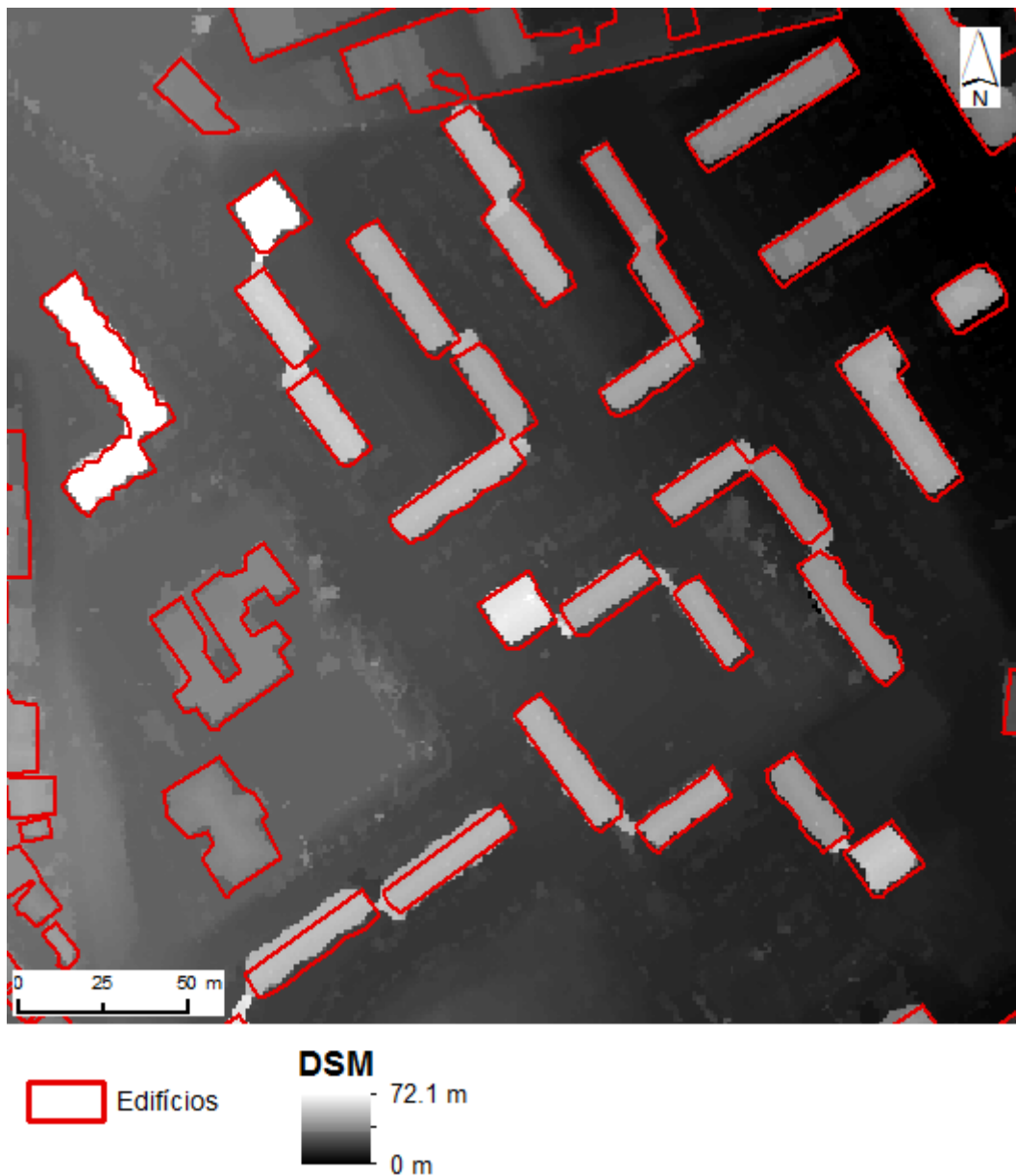


Figura 2.7 – DSM da zona do Parque das Nações, percebendo-se a disparidade dos edifícios entre as duas *layers*.

Quando se procedeu às operações para criar DSM's com as alturas dos edifícios constantes e alturas das ruas variáveis, foi necessário assim conjugar as informações que vieram inicialmente da *shapefile* dos edifícios. Contudo, ao sobrepor esta aos DSM, verifica-se visualmente que, em certos pontos, as áreas correspondentes a edifícios, não coincidem, pois o contorno dos edifícios na *shapefile* deixa, na verdade, ainda partes dos edifícios fora desse mesmo contorno.

Este caso verifica-se com maior gravidade na zona do Parque das Nações, e por observação direta da figura é perceptível um desfasamento entre as áreas de edifícios e o seu contorno.

Como o DSM tem dados de alturas, ao não reconhecer como edifício as totalidades das áreas, fez com que sobrasse um “rebordo” dos edifícios, que após as operações de subida das alturas, deu origem a ruas com alturas aumentadas, edifícios com alturas constantes (que muitas vezes ficavam abaixo do nível das ruas) e a rebordos de edifício, isto é, áreas do DSM com uma altura mais elevada do que a rua, por se tratar de um edifício mas, não sendo reconhecido como tal por se encontrar fora do

contorno, entrava na operação das alturas e a sua altura, já mais alta que a rua, ia aumentando. Dava origem assim, nos DSM de maior altura, a um “muro” que rodeava certos edifícios.

Tal situação, nas simulações solares, deu origem a que se projetassem sombras significativas, de muros hipotéticos. Assim, uma simulação solar da altura máxima, 35 metros, dava origem a um resultado com as coberturas dos edifícios com valores de radiação igual a 0. Para além disto, projetava sombras irreais na área das ruas.

A figura 2.8 mostra no Parque das Nações, radiação direta, a 35 metros de altura, ao meio dia solar. Observa-se a projeção das sombras provocadas por um suposto “contorno” de grande altura dos edifícios.

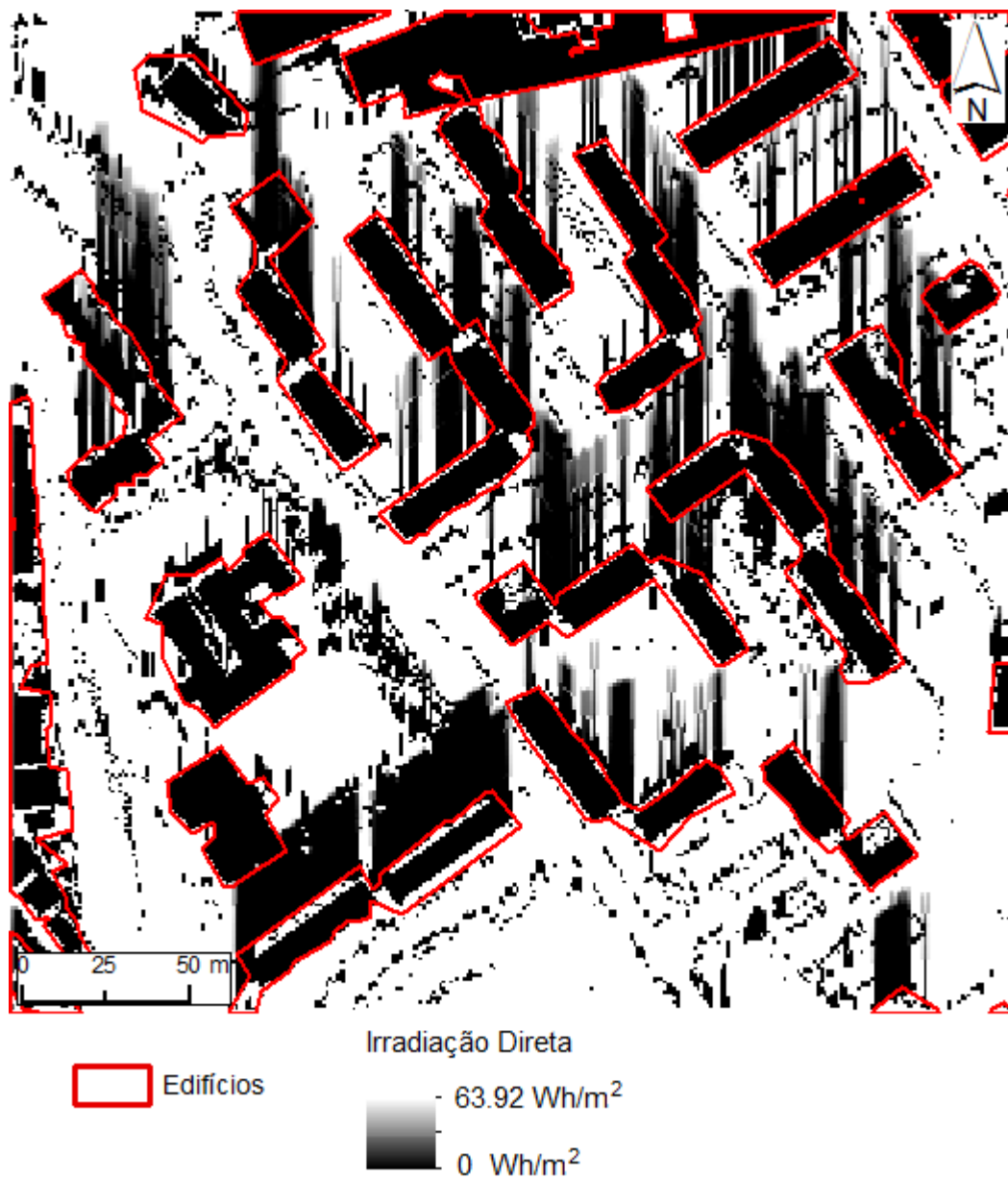


Figura 2.8 – Dados de radiação solar direta, mostrando a influência dos contornos errados. A vermelho, os contornos certos, depois da edição manual.

Perante esta situação, e dado que ocorreu nos dados originais fornecidos, a opção escolhida foi editar, manualmente, os contornos dos edifícios, fazendo-os coincidir de forma mais rigorosa com o DSM.

O procedimento foi efetuado para as duas zonas, contudo, no Parque das Nações a situação era mais evidente, e como tal foi dada como exemplo. Após a edição, foi possível ver coincidir as áreas de edifícios nas duas *layers*, como se mostra na figura 2.9:



Figura 2.9 – DSM do Parque das Nações a tons de cinza e contorno dos edifícios já corrigido manualmente.

2.7 Inclinação ótima e dados do PV GIS

Pelo *site* PV GIS, observou-se, para Lisboa, a radiação média diária recebida numa inclinação de 0 graus no mês de dezembro. [28]

Para tal, selecionou-se no mapa a cidade de Lisboa, escolheu-se o mês de dezembro, na base de dados de radiação “Climate-SAF PVGIS” (de modo a que seja possível obter o *output* de radiação direta).

Fixou-se uma inclinação e orientação de 0 graus. Selecionaram-se os *outputs* irradiação global média, irradiação global em condições de céu limpo e irradiação direta normal.

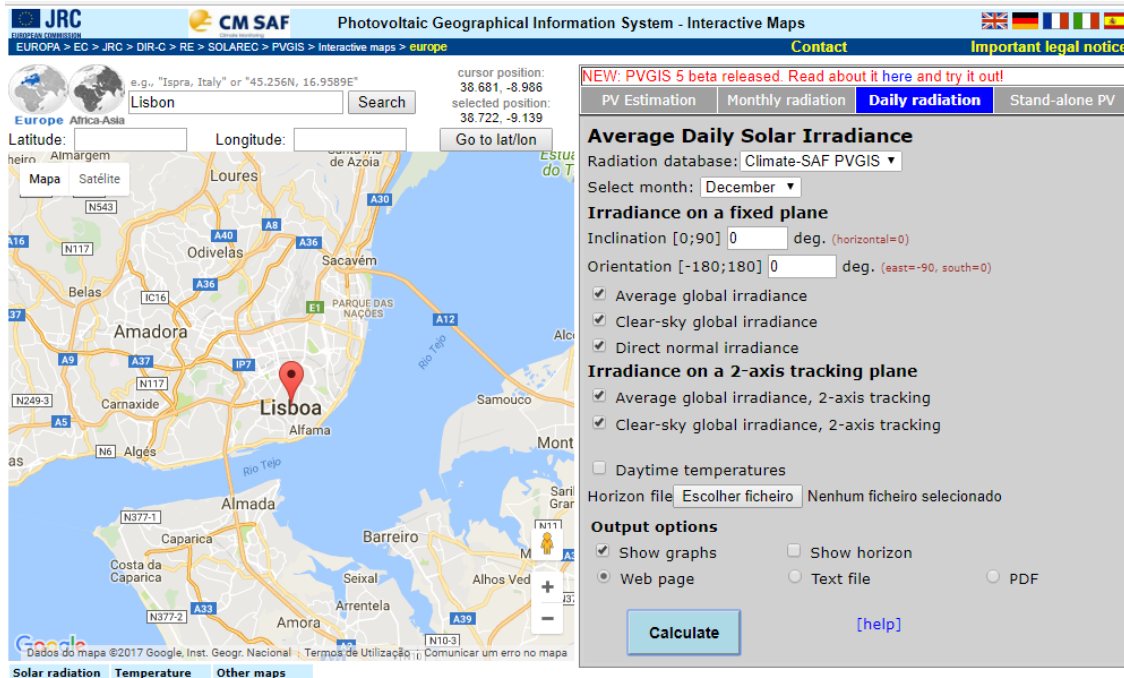


Figura 2.10 - Print do ambiente do site PV GIS, com os parâmetros pedidos.

O PV GIS não fornece diretamente os dados da irradiação direta. Contudo, sabendo que esta corresponde à diferença entre a irradiação global e a irradiação difusa, facilmente se obtêm os seus valores.

Na figura 2.11 está a variação da irradiação média para o mês de dezembro, em Lisboa, nas componentes global (céu real), global (céu limpo) e difusa (dados do PV GIS):

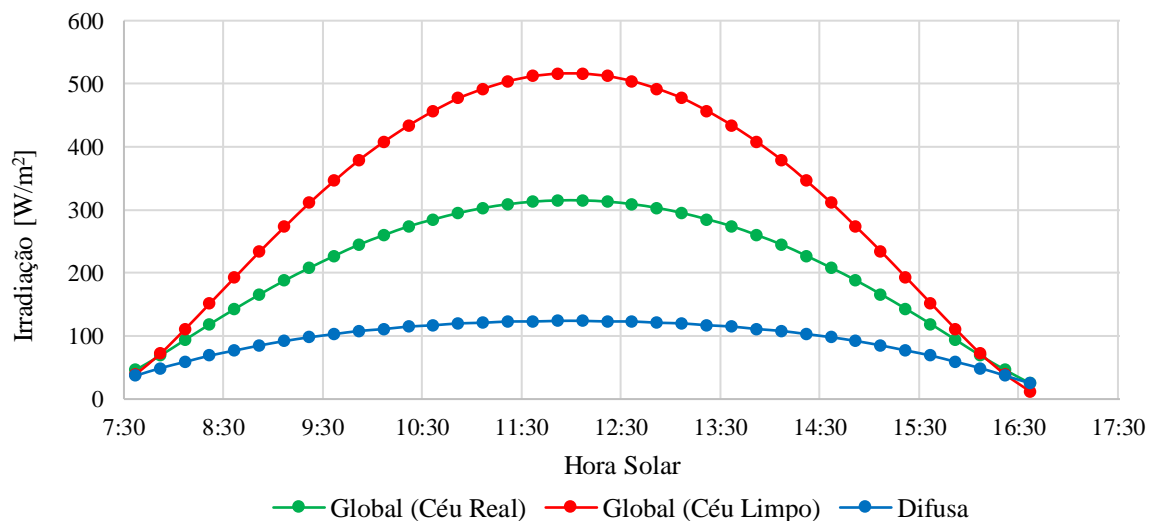


Figura 2.11 – Variação média para a cidade de Lisboa, mês de dezembro, das componentes de radiação global (céu real), global (céu limpo) e difusa.

A radiação global em condições de céu real pode chegar ao valor máximo de 315 W/m², sendo que este valor é atingido ao meio dia solar. Estas condições correspondem à média de nebulosidade verificada para o mês de dezembro.

Já a radiação global em condições de céu limpo, isto é, sem nuvens que provoquem difusão da radiação, pode chegar aos 516 W/m², também ao meio dia solar.

Dados para um ângulo ótimo de inclinação

Dado que os painéis solares fotovoltaicos de cada luminária devem ser aplicados com uma inclinação que maximize a conversão de radiação solar, recorreu-se ao PV GIS para encontrar um ângulo ótimo de inclinação para o mês de dezembro.

O PV GIS considera que a inclinação ótima anual é de 34 graus. Contudo, para cada mês existe uma inclinação ótima, que está expressa na coluna *I_{opt}* da tabela 2.4, mais à direita. Considerando o mês de dezembro, a sugestão do PV GIS de melhor ângulo é 64 graus. Porém, após experimentação de outros valores, chega-se à conclusão de que 65 graus é o ângulo com o qual se maximiza o recurso incidente no mês de dezembro, em Lisboa.

Apesar de o *I_{opt}* para dezembro considerado pelo PV GIS ser 64°, tem-se que (dados do PV GIS):

Tabela 2.4 – Valores de irradiação para os 12 meses do ano.

Month	<i>H_h</i>	<i>H_{opt}</i>	<i>H(65)</i>	<i>DNI</i>	<i>I_{opt}</i>
Jan	2180	3510	3880	3050	61
Feb	3210	4670	4860	4140	54
Mar	4680	5750	5380	4670	41
Apr	5640	6040	5010	5440	26
May	6680	6450	4800	6260	14
Jun	7450	6790	4690	7740	5
Jul	7620	7100	4990	8400	9
Aug	6880	7110	5570	7840	21
Sep	5400	6460	5810	6450	37
Oct	3800	5230	5250	4650	50
Nov	2510	4000	4380	3630	60
Dec	1950	3350	3800	3080	64
Year	4840	5540	4870	5450	34

H_h: Irradiation on horizontal plane (Wh/m²/day)

H_{opt}: Irradiation on optimally inclined plane (Wh/m²/day)

H(65): Irradiation on plane at angle: 65deg. (Wh/m²/day)

DNI: Direct normal irradiation (Wh/m²/day)

I_{opt}: Optimal inclination (deg.)

O facto de o painel estar todo o ano a 65° vai fazer com que nos meses de verão haja um ligeiro subaproveitamento da radiação solar incidente, mas ainda assim, será sempre superior às 4 PSH (horas solares de pico) necessárias, como se vê na tabela 2.4.

2.8 Consumo diário de uma luminária solar

Tomando como exemplo a luminária solar, modelo *iStar*, de potência 10 Watt, com as características listadas na tabela 2.5, é possível calcular qual o seu consumo e a irradiação necessária para se manter funcional.

Tabela 2.5 – Especificações técnicas da luminária solar do modelo *iStar* 10W.

Modelo	<i>iStar</i> 10W
Preço [euros]	988
Potência do Módulo [W]	50
Capacidade da Bateria [Ah]	40
Controlador de Carga	10 A 12/24 V
Potência da Lâmpada [W]	10
Fluxo Luminoso [lm]	900 a 1000
Eficiência Luminosa [lm/W]	100
Tipo de Lâmpada	LED
Vida Útil [horas]	50 000
Garantia [anos]	2

Para estimar o número de horas que uma luminária deve estar ligada, analisou-se o gráfico com os dados da iluminação pública de 2010, da EDP, no horário normal (HN) e no horário reduzido (HR), em que a iluminação é desligada à 01h00:

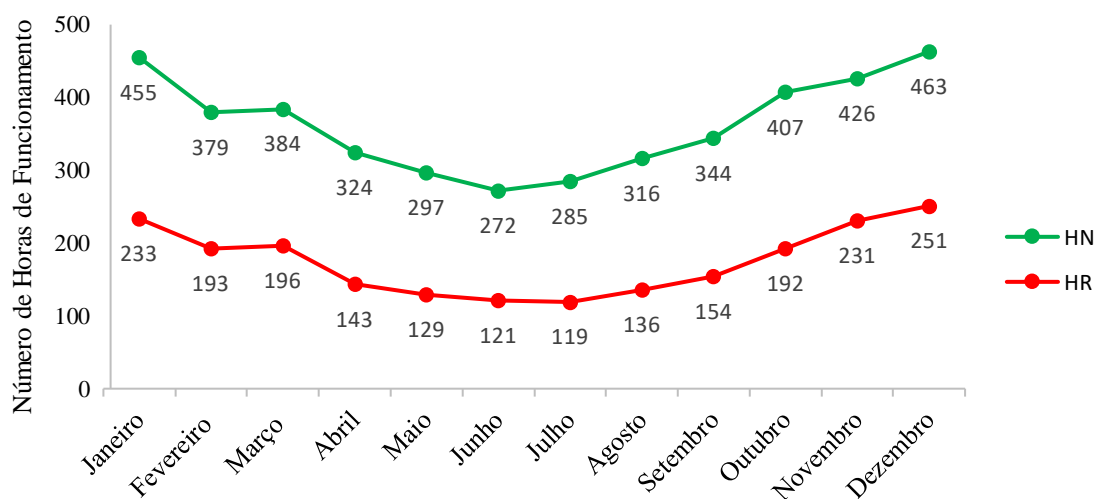


Figura 2.12 – Número de horas mensais de iluminação pública ligada, nos horários normal reduzido.

Em horário normal, para o mês de dezembro, observa-se um total de 463 horas de funcionamento. Dividindo este valor por 31 dias, obtém-se uma média de 14.9 horas para cada dia, o que se pode aproximar para 15 horas diárias.

Na situação de horário reduzido (a desligar à 01h00), obtém-se um total de 251 horas mensais para dezembro, o que dá uma média de 8 horas por dia. [21]

Analisando em particular o dia 21 de dezembro, que tem uma duração de aproximadamente 9 horas e meia, conclui-se que a duração da noite será de 14 horas e meia. Durante estas horas, as luminárias devem estar ligadas, se se optar por um horário normal, que é o que vai ser discutido.

Porém, pode assumir-se que estas se devem ligar também por um período de 45 minutos antes da hora do pôr do Sol e devem manter-se ligadas por mais 45 minutos após o nascer do Sol.

Assim, 14.5 horas + 0.75 horas + 0.75 horas dá um total de 16 horas em que a luminária estará ligada por dia.

Considerando uma potência do LED de 10 Watt, o consumo para um dia será:

$$10 \text{ W} \times 16 \text{ h} = 160 \text{ Wh}$$

O consumo de um LED será de 160 Watt hora ao longo das suas 16 horas de funcionamento.

Face ao consumo diário da luminária, o passo seguinte consiste em calcular o número de horas solares de pico – *Peak Sun Hours* (PSH) de que esta necessita, pela equação 2.4:

$$PSH = \frac{\frac{\text{Consumo Diário}}{\text{eficiência do módulo}}}{\text{Potência do Módulo}} \quad (2.4)$$

Considera-se um valor padrão de eficiência do sistema de 80%:

$$PSH = \frac{\frac{\text{Consumo Diário}}{\text{eficiência } 80 \%}}{\text{Potência do Módulo}} = \frac{160}{\frac{0.8}{50}} = 4 \text{ [PSH]}$$

Numa perspetiva mais positiva, com 15 horas de funcionamento (consumo de 15 h × 10 W = 150 Wh) por dia e eficiência de 85%, tem-se:

$$PSH = \frac{\frac{\text{Consumo Diário}}{\text{eficiência } \%}}{\text{Potência do Módulo}} = \frac{150}{\frac{0.85}{50}} = 3.53 \text{ [PSH]}$$

Numa perspetiva de 90% de eficiência e ainda as 15 horas de funcionamento:

$$PSH = \frac{\frac{\text{Consumo Diário}}{\text{eficiência } \%}}{\text{Potência do Módulo}} = \frac{150}{\frac{0.90}{50}} = 3.33 \text{ [PSH]}$$

Autonomia da bateria

Considerando uma bateria com capacidade de 40 Ah, que funciona a 12 V, temos que:

$$40 \text{ Ah} \times 12 \text{ V} = 480 \text{ Wh}$$

Assumindo o consumo diário anteriormente calculado de 160 Wh, conclui-se que:

$$\frac{480 \text{ Wh}}{160 \text{ Wh}} = 3 \text{ [dias]}$$

A bateria da luminária LED escolhida oferece uma autonomia de 3 dias.

3 Resultados

3.1 Radiação Global

Após a execução das simulações solares com os parâmetros a que se chegou à conclusão ser mais favoráveis, obteve-se dados para a radiação global e direta para a zona da Baixa e da Expo, para as alturas do solo de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 metros.

Porém, os valores decorrentes das simulações em *ArcGIS* não têm em conta a inclinação com que os painéis fotovoltaicos são usualmente montados.

Considerando uma inclinação ideal, é possível prever qual o recurso fotovoltaico para o mês de dezembro com um painel posicionado de modo a aproveitar o máximo de radiação incidente.

Pelo PV GIS, concluiu-se anteriormente que o ângulo de inclinação ótima para dezembro seria 65°. Deste modo, ao instalar-se um módulo solar com a inclinação ideal de 65 graus, é possível obter uma maximização do recurso solar, ou seja, um maior rácio de energia convertida. Tal consegue-se multiplicando o recurso existente para o plano horizontal pela razão entre 1 e o cosseno do ângulo de inclinação ideal (α), como se mostra na equação 3.1:

$$\frac{1}{\cos \alpha} = \frac{1}{\cos 65} = 2.37 \quad (3.1)$$

Obtendo-se a razão, pode usar-se a equação 3.2:

$$Recurso\ Total = Rad.\ Direta \times \frac{1}{\cos \alpha} + Rad.\ Difusa \quad (3.2)$$

O valor daqui obtido já irá estar mais próximo ao valor de PSH obtido pelo PV GIS, como se verá de seguida:

Fazendo a condição seguinte, no *Raster Calculator*:

$$\text{“Recurso_Baixa_0m.tif”} = \text{“S_Baixa_Difusa_0m.tif”} + (\text{“S_Baixa_Direta_0m.tif”} * 2.37)$$

Obteve-se de recurso máximo, para a zona da Baixa, a 0 metros, o valor de 3299.44 [Wh/m²].

Para a altura máxima de 35 metros:

$$\text{“Recurso_Baixa_35m.tif”} = \text{“S_Baixa_Difusa_35m.tif”} + (\text{“S_Baixa_Direta_35m.tif”} * 2.37)$$

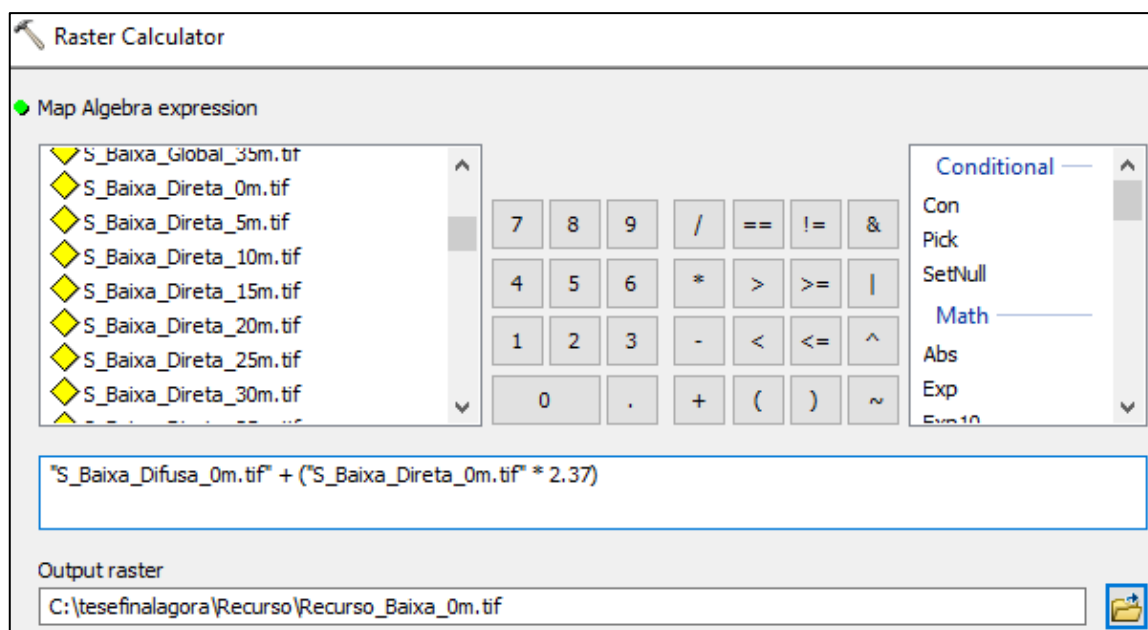


Figura 3.1 – Condição usada no *Raster Calculator*.

Obteve-se de recurso máximo o valor de 3309.31 Wh/m² para o dia 21 de dezembro.

3.2 Reclassificação

Procedeu-se à reclassificação do recurso disponível, definindo-se daqui para a frente três classes de sombreamento, a que se chamará zona verde, zona amarela e zona vermelha.

Decidiu-se numa primeira instância que o ideal para uma luminária solar ser viável, é localizar-se numa zona com menos de 5% de sombreamento, dado que deste modo se garantiria uma quase totalidade de incidência de radiação solar direta. As áreas com esta característica correspondem à “zona verde”.

Em segunda instância, considerou-se importante fazer o estudo para as zonas com sombreamento de 5 a 50%, com o intuito de identificar assim as zonas que poderiam ser viáveis se se instalasse o dobro da área de módulos. Visto que, a nível de custo, os módulos solares têm vindo a tornar-se cada vez mais acessíveis, poderá ser uma alternativa a considerar. A estas áreas chamou-se “zona amarela”.

Por último, designou-se por “zona vermelha” as áreas que registam mais de 50% de sombreamento, e que serão excluídas para a instalação de luminárias solares.

Nas figuras 3.2 e 3.3 apresenta-se a distribuição das áreas da Baixa de Lisboa e da Expo, respetivamente, pelas três classes de sombreamento definidas: menos de 5%, que seria a situação ideal; de 5 a 50%, uma situação possível para a instalação de luminárias com módulos do dobro da área; e mais de 50% de sombreamento, situações onde a implementação de luminárias é desaconselhada.

Baixa de Lisboa

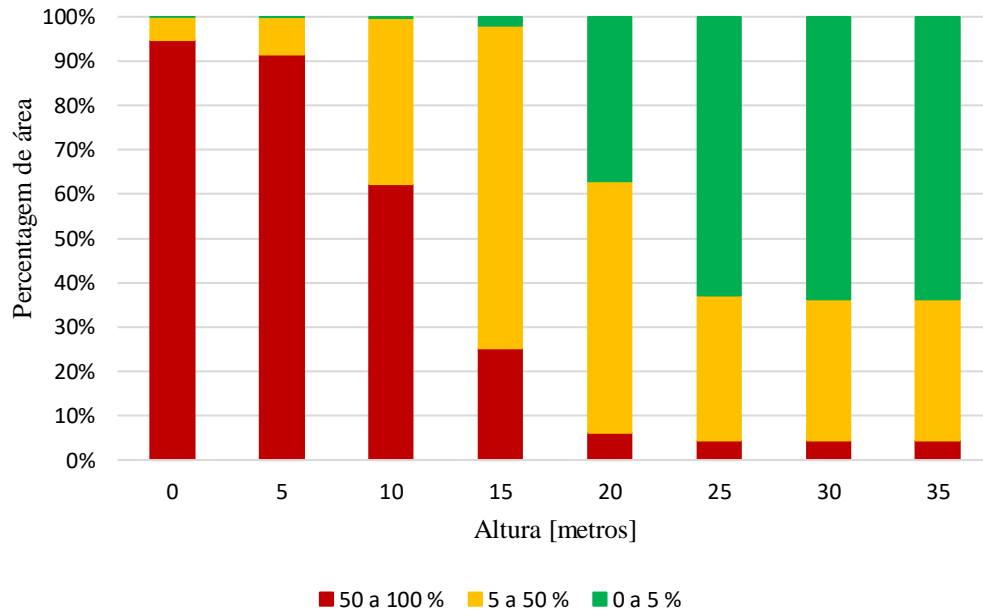


Figura 3.2 – Área distribuída pelas classes de sombreamento na zona da Baixa, nas várias alturas.

Parque das Nações

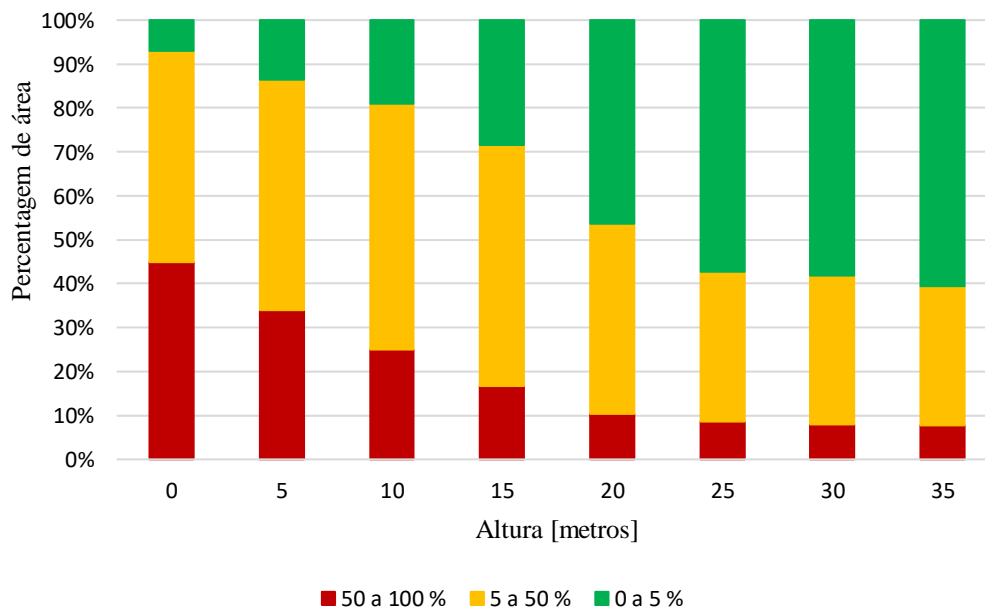


Figura 3.3 – Área distribuída pelas classes de sombreamento na zona do Parque das Nações, nas várias alturas.

Por análise dos gráficos, percebe-se que, a 35 metros de altura, as duas zonas têm uma distribuição de áreas nos três diferentes níveis de sombreamento similar.

A 5 metros de altura, a zona do Parque das Nações tem uma percentagem de área maior nas gamas de sombreamento mais favoráveis (a amarelo e a verde), o que faz desta zona a mais favorável à implementação do projeto pretendido. A Baixa de Lisboa apresenta valores quase nulos de área disponível com menos de 5% de sombreamento.

Complementando a informação dos gráficos com a observação dos mapas de radiação solar a diferentes alturas para as duas zonas em estudo (nas páginas seguintes – figuras 3.4 e 3.5), e tendo em conta também a malha urbana muito apertada da Baixa de Lisboa, percebe-se que esta zona não apresenta viabilidade para o projeto de luminárias solares, por quase toda a área disponível sem edifícios a 5 metros de altura se encontrar na zona a vermelho, com 50 a 100% de sombreamento ao longo do dia.

Deste modo, proceder-se-á à análise da possível localização de luminárias apenas para a zona do Parque das Nações, por esta apresentar mais área de espaço público disponível e também mais área com sombreamento aceitável para o projeto.

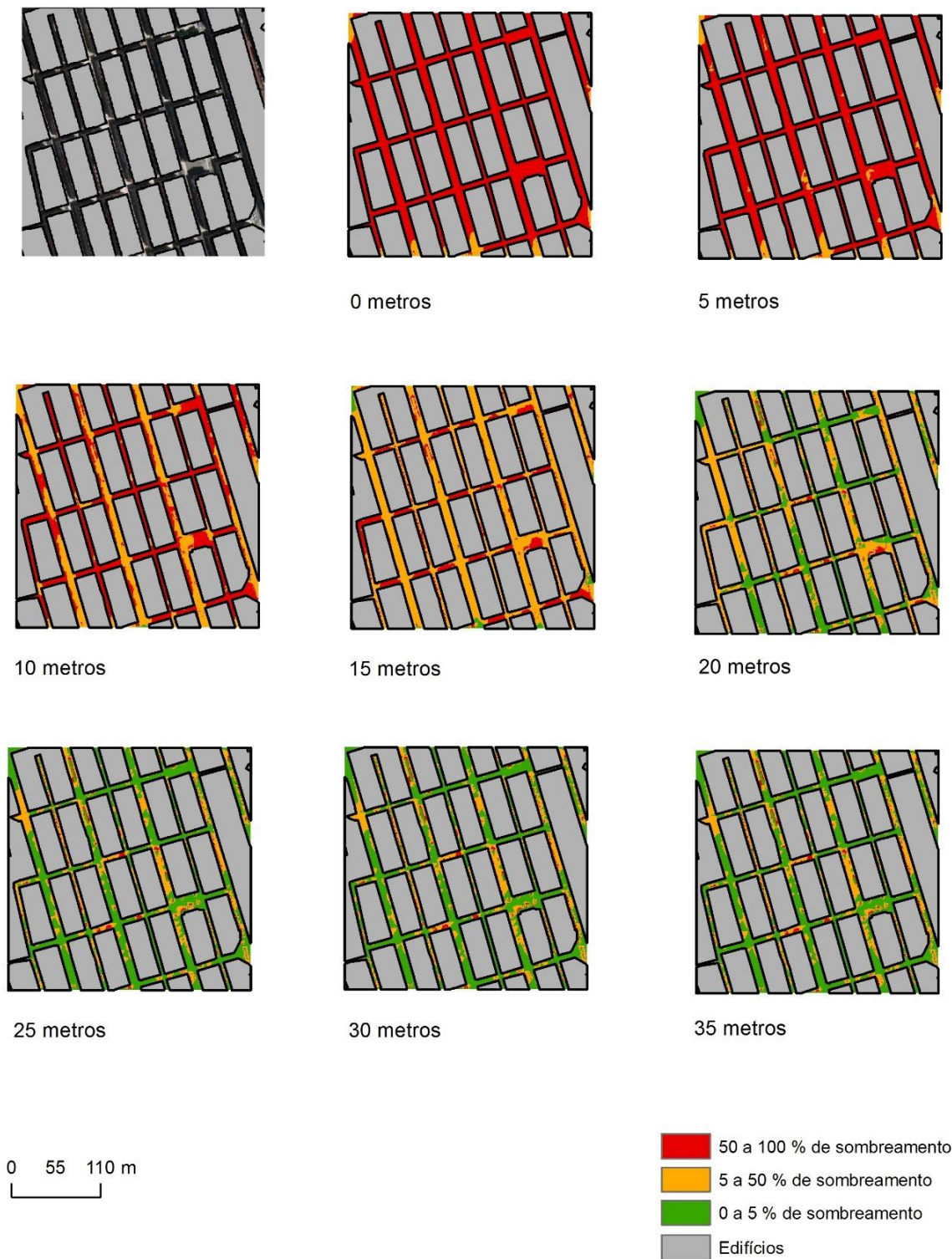
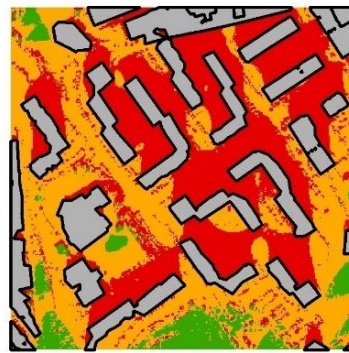
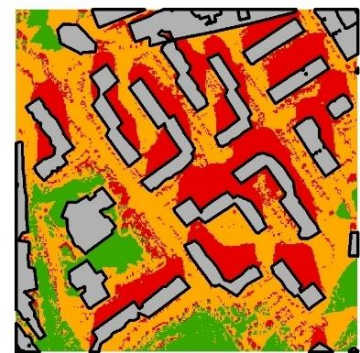


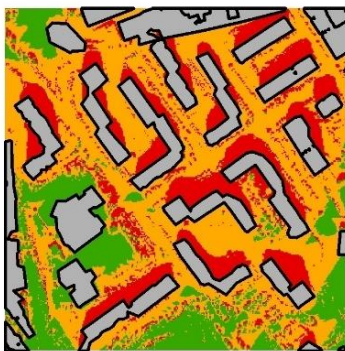
Figura 3.4 – Mapas de Sombreamento para a Baixa de Lisboa, nas várias alturas testadas.



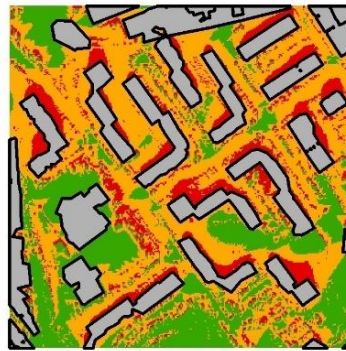
0 metros



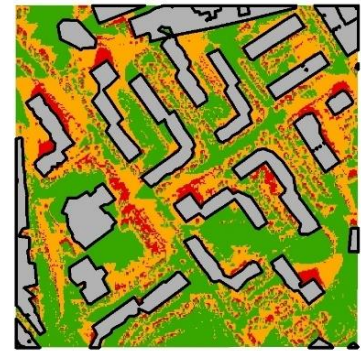
5 metros



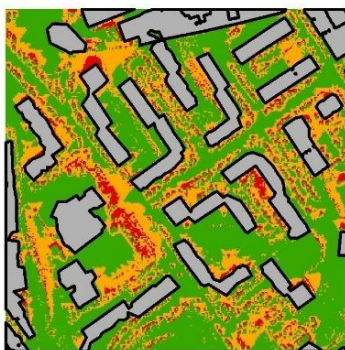
10 metros



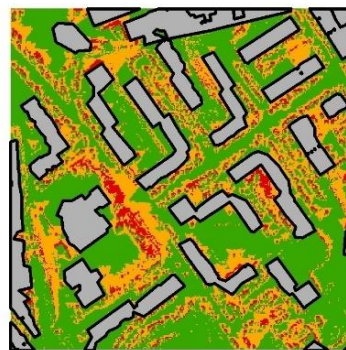
15 metros



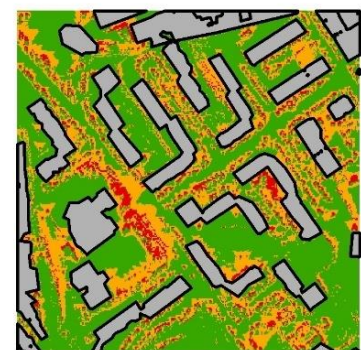
20 metros



25 metros



30 metros



35 metros

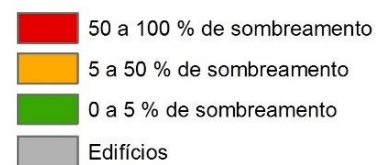


Figura 3.5 - Mapas de Sombreamento para o Parque das Nações, nas várias alturas testadas.

Luminárias no Parque das Nações

De modo a explorar a viabilidade da zona do Parque das Nações, simulou-se o recurso solar para as alturas de 3, 4 e 5 metros, visto a altura indicada para luminárias solares da potência de 10 Watt em estudo ser entre 3 a 5 metros do solo. [29]

Feitas as simulações, recorreu-se à base de dados da Câmara Municipal de Lisboa para encontrar o registo das luminárias existentes na zona, que se mostra na figura 3.6: [30]

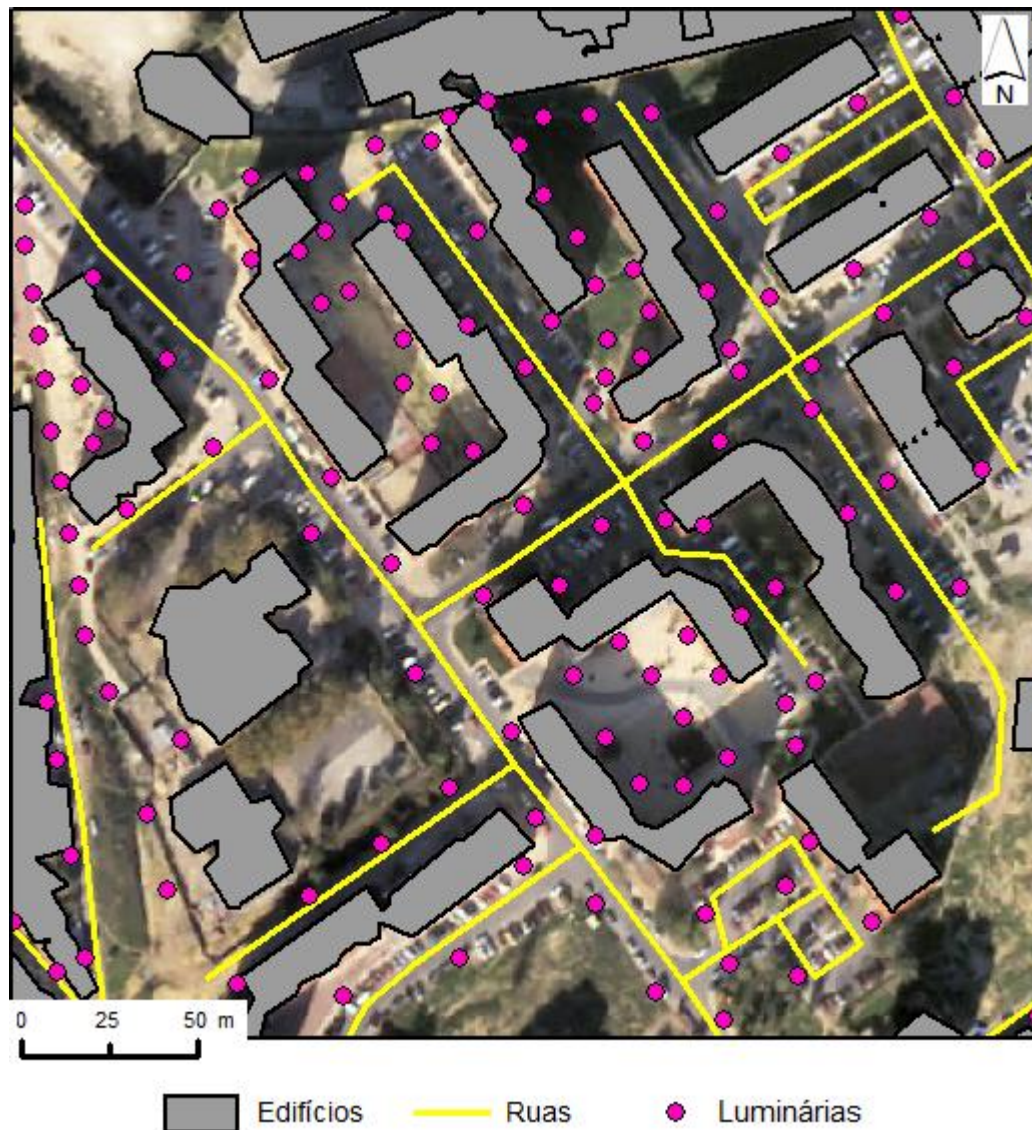


Figura 3.6 – Localização das luminárias atualmente existentes na área do Parque das Nações em estudo.

Na zona em estudo existem 136 luminárias. Sabendo a localização das luminárias já existentes, o procedimento seguinte foi analisar a percentagem de sombreamento que recebiam, de modo a estabelecer quais as que seriam substituíveis por luminárias solares.

Para tal, no *ArcGIS*, fez-se a sobreposição da *layer* correspondente às luminárias com cada *layer* de sombreamento de cada nível de altura do solo, o que possibilitou a contagem dos elementos existentes em cada classe de sombreamento, que se mostra na figura 3.7:

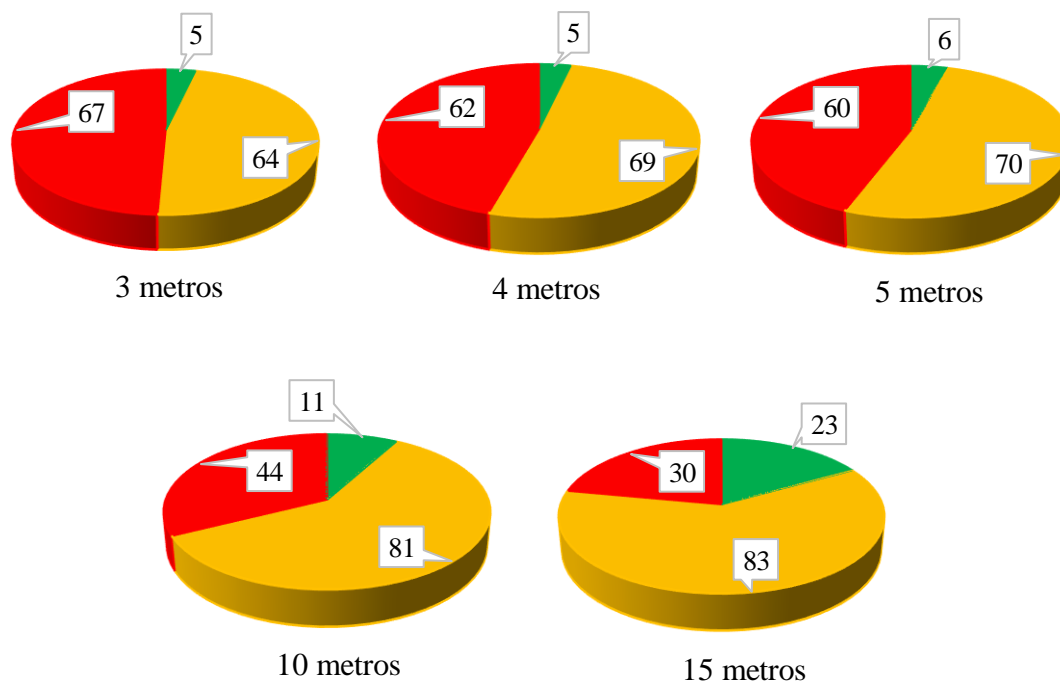


Figura 3.7 - Número de luminárias existentes por classe de sombreamento e por altura em relação ao nível do solo.

São viáveis as luminárias solares em zonas com menos de 5% de sombreamento, porém nas zonas com sombreamento entre 5 e 50% (zona amarela) também podem ser instaladas luminárias solares, desde que com o dobro da área do módulo.

Assim, o número de localizações possíveis para luminárias solares para cada altura do solo é a soma do número de luminárias das zonas verde e amarela.

Tabela 3.1 – Percentagem de luminárias existentes nas categorias definidas.

Altura do Solo	Luminárias Viáveis	Luminárias Viáveis [%]	Luminárias em zona verde [%]	Luminárias em zona amarela [%]
3 metros	69	50.7	3.7	47.1
4 metros	74	54.4	3.7	50.7
5 metros	76	55.9	4.4	51.5
10 metros	92	67.6	8.1	59.6
15 metros	106	77.9	16.9	61

Em todas as alturas do solo estudadas consegue obter-se mais de 50% de localizações possíveis de luminárias, ou seja, mais de 50% das luminárias convencionais existentes podem ser substituídas por luminárias solares (com a área do módulo normal ou em dobro).

Abaixo apresenta-se a figura 3.8 com a compilação dos resultados obtidos para as 5 alturas testadas. Em anexo encontram-se as mesmas figuras, em formato individual e aumentado, para uma melhor visualização (Anexos 2, 3, 4, 5 e 6).

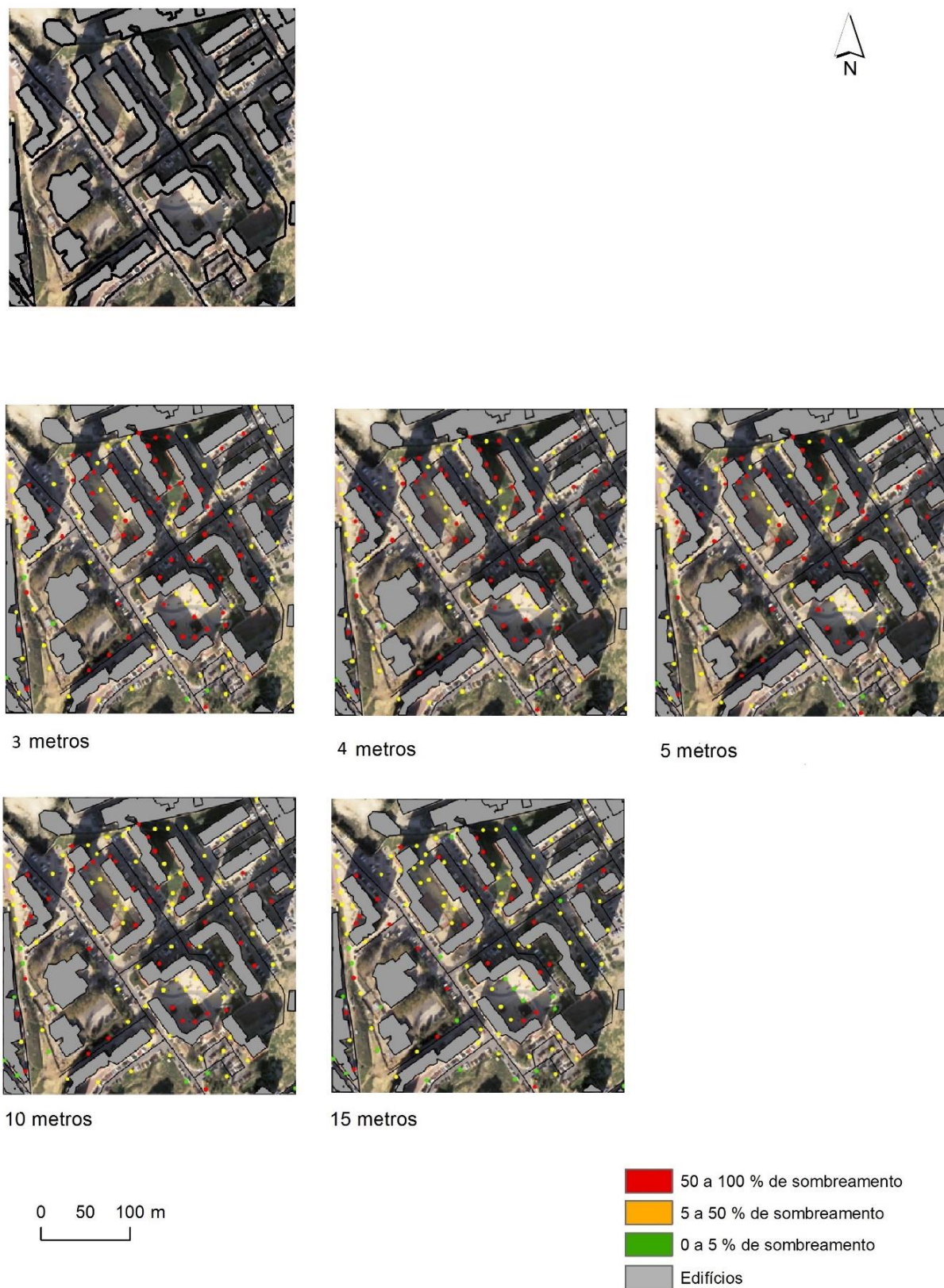


Figura 3.8 – Luminárias distribuídas pelas três classes de sombreamento definidas, para as várias alturas testadas no Parque das Nações.

4 Considerações Finais

Neste projeto começou por se estudar a radiação solar disponível nas zonas da Baixa de Lisboa e Parque das Nações. Após uma análise mais detalhada da previsão do potencial solar, e também devido às características da malha urbana existente (muito apertada no caso da Baixa), considerou-se apenas viável o estudo na zona do Parque das Nações.

Dado que as alturas a que ficariam as luminárias solares seria entre 3 e 5 metros, fez-se corresponder as luminárias existentes com o mapa reclassificado consoante a viabilidade para aí se instalar as luminárias (zonas verde, amarela e vermelha). Através desta correspondência, foi possível perceber que, para as alturas em estudo, mais de 50% das luminárias existentes podem ser substituídas por luminárias solares.

Só faz sentido dimensionar um equipamento tendo por base o mês de dezembro (e o ângulo ótimo de inclinação dos módulos para dezembro) se for um equipamento concebido para funcionar todo o ano. Deste modo, dimensiona-se tendo como base o mês menos favorável, de forma a garantir que satisfaz as necessidades nos restantes meses. Caso o equipamento tenha uma utilização específica em certos momentos do ano, como por exemplo os meses de verão, não faz sentido nem é rentável dimensioná-lo com base em dezembro, pois embora por esse método as necessidades sejam cumpridas, existe sempre um subaproveitamento do recurso nos meses de maior radiação, dado que o ângulo de inclinação ótima de dezembro é muito diferente do dos meses de verão. Sendo assim, ao dimensionar-se um equipamento que só funcione nos meses de verão, o seu dimensionamento deve ser feito com base no mês do verão com menos horas de sol, que é setembro. Deste modo, há poupança no investimento inicial (a dimensão do módulo será menor, não precisará de equipamentos de apoio), e as necessidades continuarão a ser supridas na sua totalidade.

Com a conclusão deste projeto, percebe-se que o estudo da radiação solar em meio urbano tem um papel crucial a fim de otimizar e maximizar o investimento em luminárias solares (ou outro tipo de mobiliário urbano solar). Revela-se uma ferramenta válida no apoio à decisão, fundamentando a viabilidade de implantação deste tipo de luminárias numa determinada área, e, dentro dessa área, permitindo a escolha dos melhores locais para a implantação das mesmas.

O uso de informação geográfica – e o respetivo *software* – revela-se uma mais-valia para estimar o potencial solar em espaço público. A informação geográfica de grande resolução espacial – como os dados *LiDAR* – assume um papel de destaque por ter um grande potencial de uso num mundo mais digital e tecnológico, onde o conceito de *smart cities* vai estando cada vez mais presente. O uso de informação geográfica adequa-se ao estudo do potencial em espaço público urbano (como também se adequa ao estudo do potencial solar em telhados e coberturas, por exemplo), que de outro modo seria difícil e dispendioso estimar, dado o detalhe necessário para modelar, com rigor, todas as estruturas existentes numa cidade.

Uma análise semelhante à que foi efetuada neste projeto pode ser transposta para outro tipo de aplicações em meio público urbano a operar a energia solar, como sinais rodoviários luminosos, painéis informativos, pontos de carga de baterias para aparelhos eletrónicos pessoais, telefones públicos, etc., pondo assim este tipo de energia e tecnologia ao dispor do utilizador da cidade.

O estudo foi efetuado para uma área relativamente restrita da cidade de Lisboa, pelo que, para se estender este tipo de análise a uma cidade com as dimensões de Lisboa, seria necessária uma maior capacidade ao nível do processamento de dados (processadores/computadores mais rápidos), e

também a disponibilidade de dados de grande resolução espacial com o detalhe e atualização compatíveis.

Esta tecnologia pode ser posta ao serviço da eficiência de uma cidade, e da segurança das populações (veja-se o exemplo das luminárias solares de Kabul), trazendo inevitavelmente ganhos para a entidade gestora, quer a um nível nacional (governo), quer a um nível mais local (câmara municipal, freguesia).

Os ganhos podem concretizar-se não só em termos de custos, mas também ao nível da segurança e fiabilidade. É conferida uma maior segurança à população; menores custos no que toca à interligação das luminárias à rede já existente (nos casos em que as luminárias são implantadas em locais isolados); possibilidade de aproveitamento ou extensão para outras soluções do tipo (pontos de carregamento de baterias de aparelhos eletrónicos pessoais, etc.); efeitos positivos ao nível da imagem de uma entidade gestora junto da sua população (imagem sustentável, *marketing*); melhoria da experiência do utilizador da cidade; menor preocupação em caso de apagão generalizado, falha ou sobrecarga na rede elétrica, catástrofe natural, etc., havendo possibilidade de ser mantida a iluminação pública.

Por todas estas razões, obtêm-se ganhos importantes ao nível da sustentabilidade, segurança, consumo e produção sustentáveis e no acesso da população à energia, ao mesmo tempo que se contribui para a descarbonização das cidades, o que vem de encontro a alguns dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável definidos como meta pelas Nações Unidas, e referidos no começo desta dissertação.

Referências

- [1] Direção-Geral de Energia e Geologia, Direção de Serviços de Planeamento Energético e Estatística, e Divisão de Planeamento e Segurança de Abastecimento, (2018, Acedido: 16-Set-2018). Energia em Portugal - 2016 [Online], Disponível em: www.dgeg.gov.pt
- [2] APREN - Associação Portuguesa de Energias Renováveis, (Acedido: 16-Set-2018). APREN - Produção [Online]. Disponível em: <http://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao>
- [3] APREN - Associação Portuguesa de Energias Renováveis, (2018, Acedido: 16-Set-2018). Eletricidade Renovável em Revista - 2017 [Online]. Disponível em: <http://www.apren.pt/contents/files/2017-eletricidade-renovavel-em-revista.pdf>
- [4] APREN - Associação Portuguesa de Energias Renováveis, (Acedido: 24-Jun-2018). APREN - Destaques. [Online]. Disponível em: <http://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/destaques>
- [5] Solar Power Europe, (Acedido: 24-Out-2017). Home: SolarPower Europe [Online]. Disponível em: <http://www.solarpowereurope.org/home/>
- [6] INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, (Acedido: 24-Jun-2018). Energias endógenas de Portugal [Online]. Disponível em: <http://e2p.inegi.up.pt/>
- [7] Sistemamid, (Acedido: 24-Out-2017). Acciona, Central Solar Fotovoltaica de Amareleja - Referência Mundial no Desenvolvimento das Energias Renováveis, Amareleja - Moura [Online]. Disponível em: https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2015-04-26_12-53-25120484.pdf
- [8] P. Dal Maso, (Acedido: 24-Jun-2018). Serpa Solar Plant [Online]. Disponível em: http://www.c3p.org/Workshop%202007%20Documents/Piero%20Dal%20Maso_%20Serpa%20Solar%20Plant%20.pdf
- [9] Portal-Energia, (2017, (Acedido: 24-Jun-2018). Guia Técnico - Manual de Energia Fotovoltaica [Online]. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>
- [10] Solargis, (Acedido: 24-Out-2017). Download free solar resource maps [Online]. Disponível em: <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/>
- [11] C. Ramos, *A Energia Solar em Portugal: Potencialidades e Diferenciação Regional*. Lisboa: Associação Portuguesa de Geógrafos, 1998.

- [12] J. Pinto Peixoto, *A Radiação Solar e o Ambiente. Coleção O Ambiente e o Homem*. Lisboa: Secretaria de Estado do Ambiente, 1981.
- [13] CYPE Ingenieros, (Acedido: 24-Out-2017). Software para Engenharia e Construção [Online]. Disponível em:
http://www.cype.pt/cype_ingenieros/#inicio
- [14] CYPE Ingenieros, (Acedido: 24-Out-2017). Gerador de Preços para a construção com previsões de custos [Online]. Disponível em:
<http://geradordeprecos.cype.pt/>
- [15] T. Santos, N. Gomes, S. Freire, M. C. Brito, L. Santos, e J. A. Tenedório, «Applications of solar mapping in the urban environment», *Appl. Geogr.*, vol. 51, pp. 48–57, Jul. 2014.
- [16] C. Catita, P. Redweik, J. Pereira, e M. Brito, «Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades», *Comput. Geosci.*, vol. 66, 2014.
- [17] P. Redweik, C. Catita, e M. Brito, «Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape», *Sol. Energy*, vol. 97, pp. 332–341, Nov. 2013.
- [18] M. C. Brito, N. Gomes, T. Santos, e J. A. Tenedório, «Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data», *Sol. Energy*, vol. 86, n. 1, pp. 283–288, Jan. 2012.
- [19] VTree Energy, (Acedido: 24-Out-2017). Building your solar future! [Online]. Disponível em:
<http://www.vtree.solar/>
- [20] Revista Smart Cities, (2017, Acedido: 24-Out-2017). Sharing Cities “planta” uma árvore tecnológica solar em Lisboa [Online]. Disponível em:
<http://www.smart-cities.pt/pt/noticia/arvore-solar-emlisboa1402/>
- [21] C. R. A. Santos, «Iluminação Pública e Sustentabilidade Energética», Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, 2011.
- [22] Energy Matters, (2010, Acedido: 03-Nov-2017). Solar Powered Street Lights Brighten Kabul [Online]. Disponível em:
<http://www.energymatters.com.au/renewable-news/em1260/>
- [23] ArcGIS for Desktop, (Acedido: 15-Set-2018). Using Viewshed and Observer Points for visibility analysis [Online]. Disponível em:
<http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/3d-analyst/using-viewshed-and-observer-points-for-visibility.htm>
- [24] ArcGIS for Desktop, (Acedido: 03-Nov-2017). Area Solar Radiation [Online]. Disponível em:
<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/area-solar-radiation.htm>

- [25] T. Santos, *Producing Geographical Information for Land Planning using VHR Data. Local Scale Applications*. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011.
- [26] C. M. J. M. Rodrigo, «Potencial Solar no espaço urbano», Tese de Mestrado, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.
- [27] N. M. P. Gomes, «Integração de Dados LIDAR com Imagens de Muito Alta Resolução Espacial para Determinação de Áreas Urbanas com Potencial Solar», Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.
- [28] PVGIS - Solar radiation - Europa EU (Acedido: 03-Nov-2017). PV potential estimation utility [Online]. Disponível em:
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>
- [29] Luxconcept (Acedido 05-Nov-2017). Luxconcept Verona EN [Online]. Disponível em:
https://luxconcept.pt/Produtos/ProdID/592/Luminária_Solar_LED_Verona_
- [30] Câmara Municipal de Lisboa (Acedido: 06-Nov-2017). Iluminação | Câmara Municipal de Lisboa - Spatial Open Data [Online]. Disponível em:
http://geodados.cm-lisboa.pt/datasets?q=ilumina%C3%A7%C3%A3o&sort_by=relevance

Anexos

Anexo 1 – *Tool Area Solar Radiation* com os parâmetros usados, no ArcGIS.

Area Solar Radiation

Input raster
DSM_Expo_1m.tif

Output global radiation raster
C:\tesearcgis\Solar_Expo\Expo_solar_1m.tif

Latitude (optional)
38.7703715002502

Sky size / Resolution (optional)
4000

Time configuration (optional)
Within a day

Date/Time settings
Day number of the year: 355
Start time: 7 End time: 18

Day interval (optional)
14

Hour interval (optional)
0.5

Create outputs for each interval (optional)

Topographic parameters
Z factor (optional)
1
Slope and aspect input type (optional)
FLAT_SURFACE
Calculation directions (optional)
360

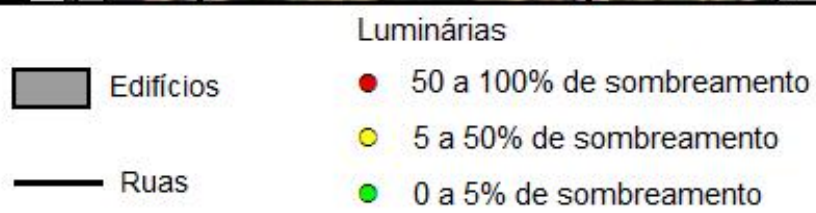
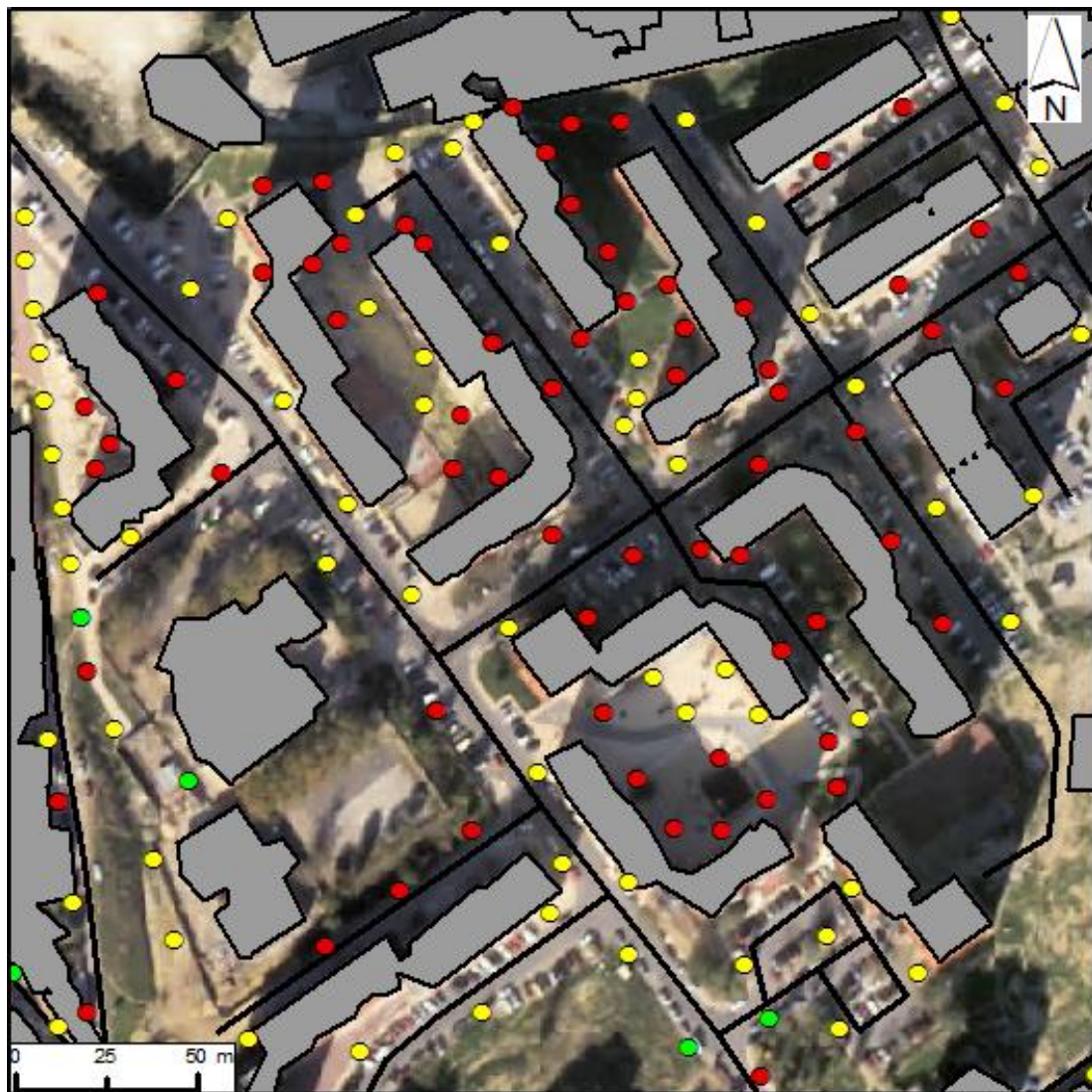
Radiation parameters
Zenith divisions (optional)
8
Azimuth divisions (optional)
8
Diffuse model type (optional)
UNIFORM_SKY
Diffuse proportion (optional)
0.25
Transmittivity (optional)
0.65

Optional outputs

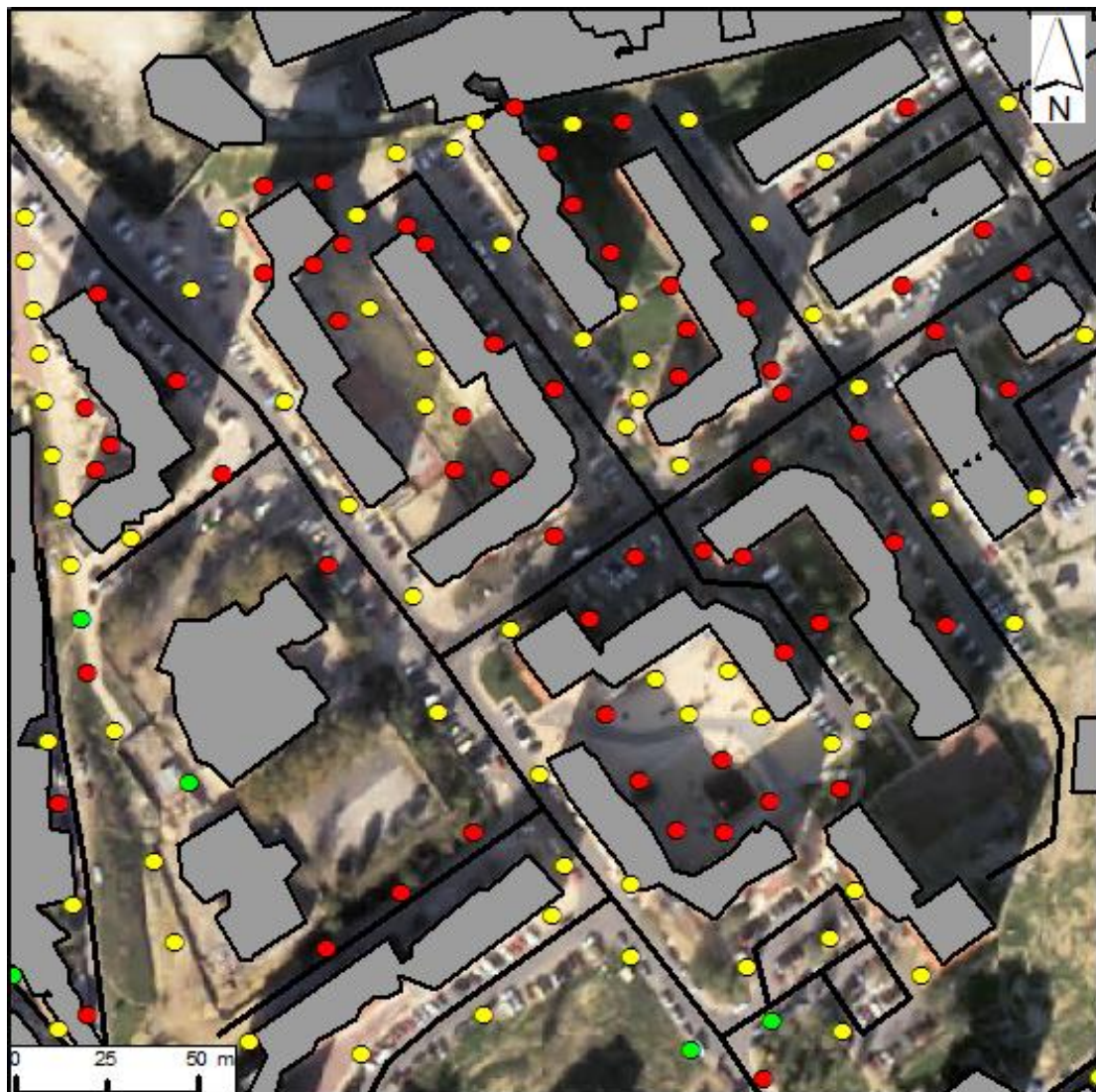
OK Cancel Apply << Hide Help Tool Help

Area Solar Radiation
Derives incoming solar radiation from a raster surface.

Anexo 2 – Localização de hipotéticas luminárias solares a 3 metros de altura do solo



Anexo 3 – Localização de hipotéticas luminárias solares a 4 metros de altura do solo.



Edifícios

Ruas

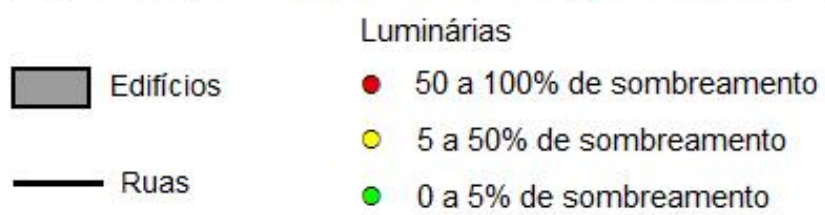
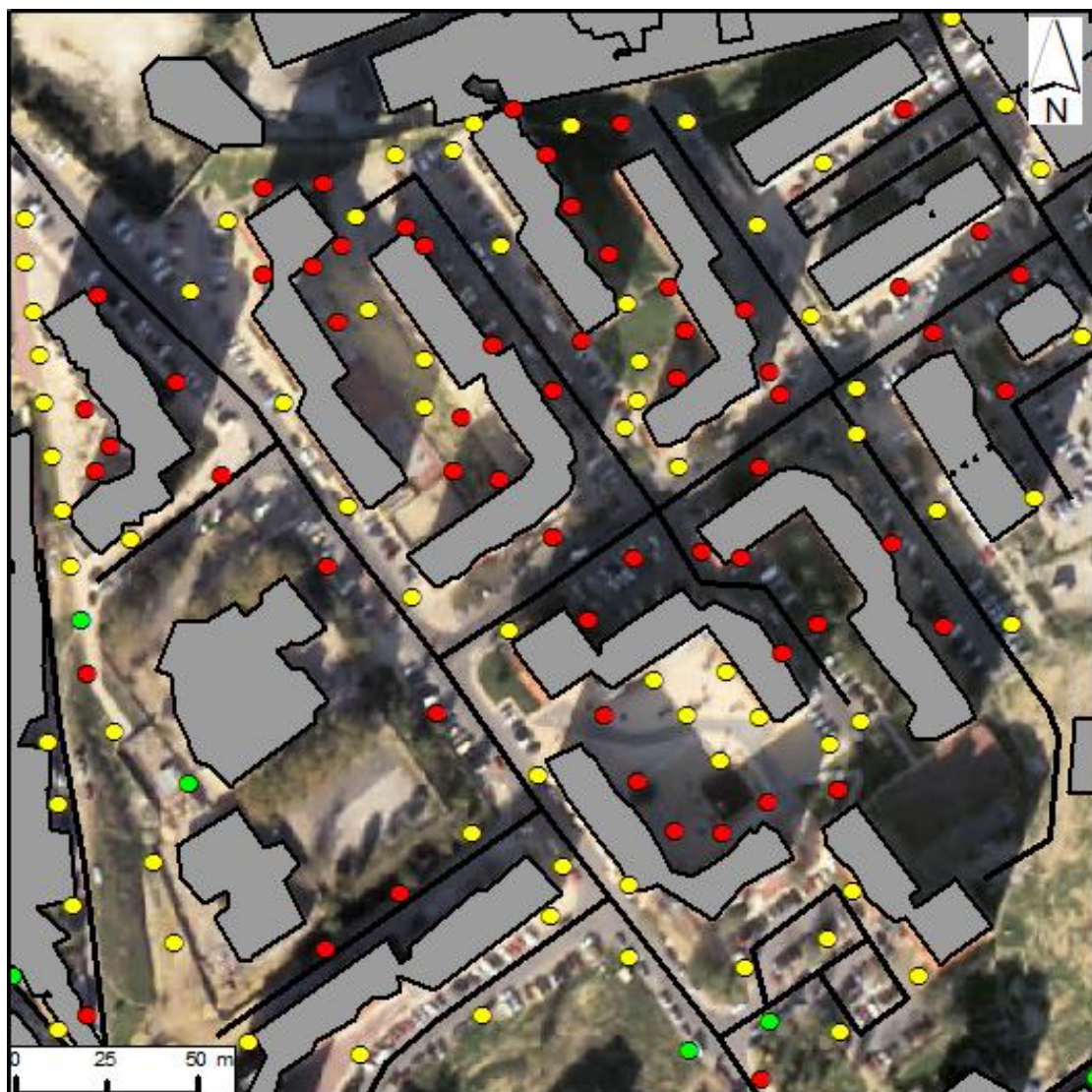
Luminárias

● 50 a 100% de sombreamento

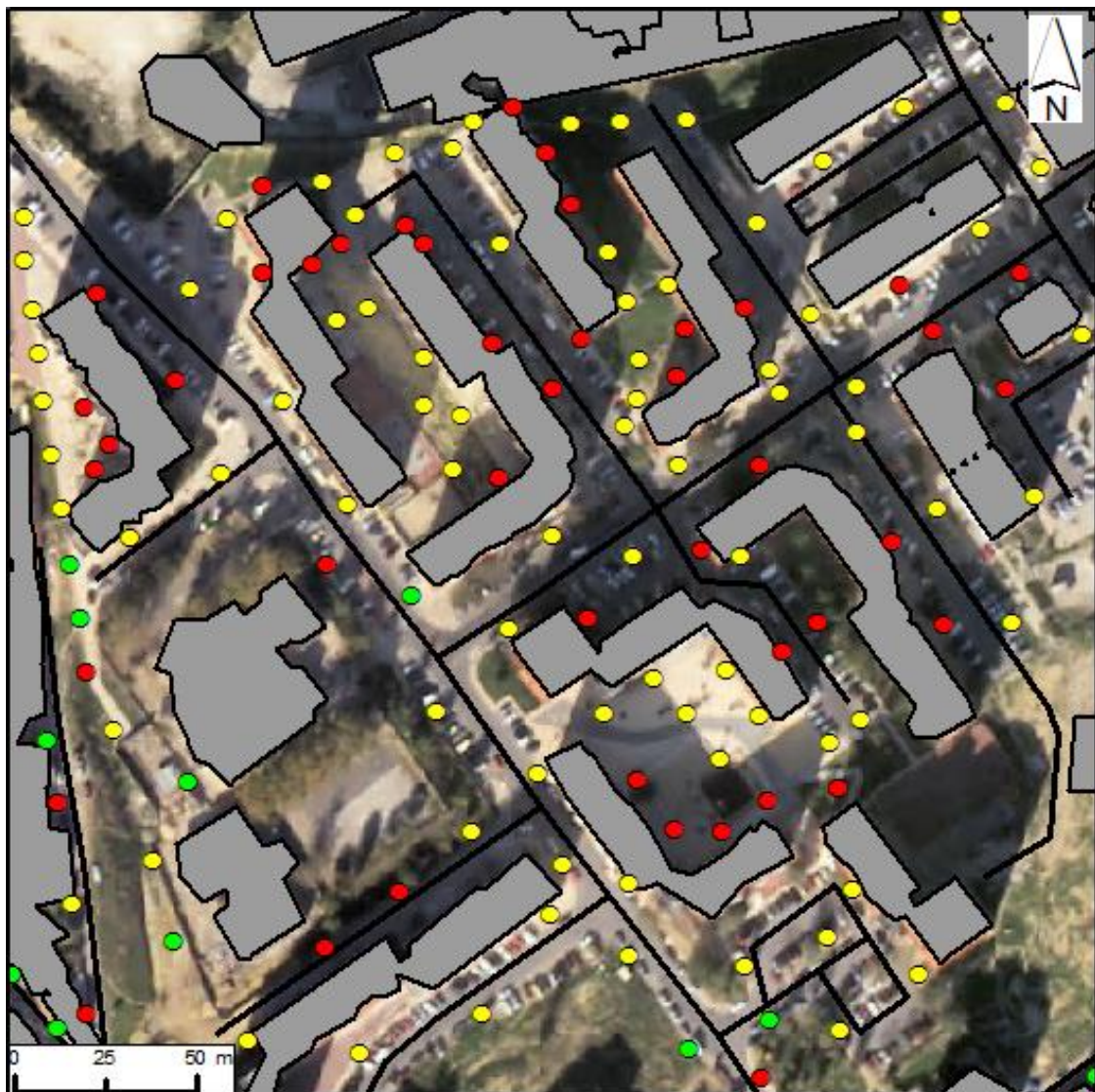
● 5 a 50% de sombreamento

● 0 a 5% de sombreamento

Anexo 4 – Localização de hipotéticas luminárias solares a 5 metros de altura do solo.



Anexo 5 – Localização de hipotéticas luminárias solares a 10 metros de altura do solo.



Anexo 6 – Localização de hipotéticas luminárias solares a 15 metros de altura do solo.

