



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Patrícia Almeida Soares

**ANÁLISE DE DADOS TÉRMICOS DE DETEÇÃO REMOTA  
PARA A CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES NATURAIS  
E ARTIFICIALIZADAS EM CONTEXTOS DISTINTOS**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências – Especialização em  
Recursos Geológicos orientada pelo Professor Doutor Vasco Manuel Soares  
Mantas e Doutora Sofia Nunes Lorena Ermida apresentada ao Departamento de  
Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de  
Coimbra.**

Outubro de 2020

Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Ciências da Terra

**ANÁLISE DE DADOS TÉRMICOS DE DETEÇÃO  
REMOTA PARA A CARACTERIZAÇÃO DE  
SUPERFÍCIES NATURAIS E ARTIFICIALIZADAS  
EM CONTEXTOS DISTINTOS**

Patrícia Almeida Soares

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências – Especialização em  
Recursos Geológicos orientada pelo Professor Doutor Vasco Manuel Soares  
Mantas e pela Doutora Sofia Nunes Lorena Ermida apresentada ao  
Departamento de Ciências da Terra**

Outubro, 2020



UNIVERSIDADE D  
**COIMBRA**



*Dedico esta dissertação aos  
meus pais e irmão, mas  
especialmente à minha madrinha.*

# Índice Geral

Agradecimentos.....	V
Resumo.....	VII
Abstract.....	VIII
Lista de Símbolos.....	IX
Lista de Abreviações.....	X
Índice de Figuras.....	XII
Índice de Tabelas.....	XIV
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Instituição de Acolhimento.....	4
1.4. Estrutura da Dissertação.....	5
1.5. Estado da Arte.....	6
2. Conceitos de Detecção Remota.....	9
2.1. Componentes de Detecção Remota.....	9
2.1.1. Fontes de energia e princípios da radiação.....	10
2.1.2. Espectro Eletromagnético.....	10
2.1.3. Interações da REM com a atmosfera.....	11
2.1.4. Interações da REM com elementos da superfície terrestre.....	12
2.1.5. Satélites e sensores para a observação da terra.....	13
2.1.6. Tipos de Resoluções.....	15
2.1.6.1. Refletância e assinatura espectral.....	16
2.1.7. Leis da Radiação Térmica.....	17
2.1.7.1. Lei de Plank.....	17
2.1.7.2. Lei de Wein.....	19
2.1.7.3. Lei de Stefan-Boltzan.....	19
2.1.8. Processamento e análise de Imagem.....	20
2.2. Programas e Missões Espaciais.....	21

2.2.1.	Landsat.....	21
2.2.1.1.	Landsat 8 .....	22
2.2.2.	ASTER.....	24
3.	Plataformas de Programação Aplicadas.....	26
3.1.	<i>Radiative Transfer for TOVS</i> .....	26
3.2.	<i>Google Earth Engine</i> .....	27
4.	Descrição da Área de Estudo.....	31
4.1.	Enquadramento Geográfico.....	31
4.2.	Geologia e Geomorfologia.....	33
4.3.	Ocupação do Solo e Análise Urbanística.....	35
5.	Metodologia .....	38
5.1.	<i>Input Data</i> .....	40
5.1.1.	Landsat 8 <i>Dataset</i> .....	41
5.1.2.	Conjunto de Dados da Atmosfera.....	42
5.1.3.	Emissividade de Superfície.....	43
5.2.	Algoritmo <i>Statistical Mono-Window</i> .....	46
5.2.1.	Calibração do Algoritmo.....	47
5.3.	Recolha e Processamento de Imagens.....	48
5.4.	Análise Estatística .....	49
6.	Resultados.....	50
6.1.	Calibração do Algoritmo.....	50
6.2.	Validação do Algoritmo.....	51
6.3.	Processamento de Imagens de satélite.....	52
6.4.	Estimativa da LST.....	55
7.	Análise e Discussão.....	58
7.1.	Análise das variações térmicas do satélite.....	59
7.2.	Correlação de dados com riscos associados.....	62
8.	Considerações Finais.....	65
9.	Referências Bibliográficas.....	68
10.	Anexos.....	80

<b>ANEXO I.</b> Código para gerar a layer referente à Temperatura de Brilho.....	80
<b>ANEXO II.</b> Código para gerar a layer referente ao Vapor de Água Total.....	81
<b>ANEXO III.</b> Código para gerar a layer referente à Emissividade do sensor ASTER.....	83
<b>ANEXO IV.</b> Código para gerar a layer referente ao FVC do LS8.....	83
<b>ANEXO V.</b> Código para gerar a layer referente ao NDVI do LS8.....	84
<b>ANEXO VI.</b> Código para gerar a layer referente à Emissividade do LS8.....	84
<b>ANEXO VII.</b> Código para gerar a layer referente à LST .....	86
<b>ANEXO VIII.</b> Código para gerar os histogramas dos tipos de ocupação do solo em diferentes alturas do ano.....	87
<b>ANEXO IV.</b> Histogramas dos tipos de ocupação do solo em diferentes alturas do ano.....	90
<b>ANEXO X.</b> Resultados estatísticos.....	92

---

# Agradecimentos

---

Ao longo do desenvolvimento desta dissertação e conseqüente finalização do Mestrado em Geociências são várias as pessoas que se cruzaram no meu percurso e a quem quero agradecer. Em primeiro lugar, aos meus orientadores Professor Doutor Vasco Mantas e a Doutora Sofia Ermida a quem dirijo as minhas primeiras palavras.

Ao meu orientador, Professor Vasco Mantas, um sincero obrigada, pelo tema proposto, que me entusiasmou desde o primeiro dia, por toda a ajuda prestada, por todo o conhecimento transmitido, por todo o seu empenho e dedicação neste projeto e por todo o seu profissionalismo demonstrado como orientador de uma Dissertação de Mestrado.

Agradeço igualmente à minha orientadora a Doutora Sofia pelo interesse demonstrado no desenvolvimento deste projeto, todos os ensinamentos que me transmitiu no decorrer desta dissertação, em especial no domínio da programação. Agradeço também por me ter acolhido tão bem nas instalações do Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA).

Posto isto agradeço a ambos pelas experiências que me proporcionaram, enriquecendo-me profissional e pessoalmente. Muito obrigada!

Em seguida gostaria de agradecer à instituição acolhedora da minha dissertação, o IPMA, localizado próximo do aeroporto, pela hospitalidade e por me oferecer as condições de trabalho necessárias à realização desta dissertação, tendo desenvolvido técnicas fundamentais.

Aos meus pais e irmão por terem estado sempre presentes e terem tornado tudo isto possível. Por terem sempre acreditado em mim mesmo quando eu não o fazia e por terem acompanhado de perto todas as minhas conquistas, esta etapa da minha vida é dedicada a vocês. O meu maior obrigado!

A todos os meus amigos que me acompanharam ao longo desta caminhada pela cidade dos estudantes, destacando primeiramente a Ana por ter lá estado desde o primeiro dia e mesmo tendo seguido uma área diferente em mestrado esteve sempre lá a acompanhar de perto todo o meu percurso, apoiando-me sempre. À Margarida por todos os ensinamentos que me transmitiu e pela amizade que este ano de tese consolidou. À Francisca, mais recente mestre em Ciências Jurídico-Processuais, pelo seu percurso brilhante que me motivou imenso e por todo apoio. À Lígia e ao Teles, que me acompanharam ao longo destes dois anos de mestrado, o meu obrigado e a maior sorte a estes futuros Mestres em Geociências!

Quero ainda agradecer aos meus amigos de Viseu, que apesar de serem poucas as vezes em que conseguimos estar todos juntos são pessoas que sei que nunca vou perder, tendo-me apoiado sempre mesmo estando numa área científica tão diferentes da deles.

A todas as pessoas que se cruzaram no meu caminho quer a nível profissional quer a nível pessoal, tendo-me ajudado a ultrapassar todos os momentos, obrigada!

Por fim, a Coimbra que me fez sempre sentir em casa, a eterna cidade dos estudantes!

---

# Resumo

---

A deteção remota (DR), em Portugal é um tema muito recente com possibilidade de ser analisado mais pormenorizadamente, tendo em conta o conjunto de aplicações que pode ter, em diversas áreas científicas. Por esse motivo, esta dissertação veio aprofundar esse assunto através da análise da temperatura da superfície terrestre em contextos distintos.

*Land Surface Temperature* ou temperatura da superfície terrestre (LST), como será referida ao longo da presente dissertação, tem adquirido um reconhecimento cada vez maior ao longo do tempo, levando a um interesse cada vez significativo no desenvolvimento de várias metodologias de modo a efetuar a sua medição a partir do espaço. Assim sendo, a LST é utilizada em estudos relacionados com as variações da superfície terrestre, nomeadamente as ilhas de calor urbano (ICU), a evapotranspiração e o *stress* da vegetação. Estas variações da superfície permitem a criação de várias aplicações relacionadas com os diferentes processos, nomeadamente, a monitorização do clima, o ciclo hidrológico, a avaliação de modelos e a assimilação de dados. O satélite Landsat 8 (LS8) tem o potencial de fornecer estimativas LST com uma alta resolução espacial, o que torna possível realizar este estudo de forma mais eficaz.

De uma forma sucinta, o estudo realizado consistiu numa primeira fase na aplicação de um algoritmo designado *Statistical Mono-Window* (SMW), que permitiu a criação de uma base de dados de calibração e validação, de maneira a garantir uma maior variabilidade das condições atmosféricas e de superfície. Posteriormente, através da aquisição de dados do LS8 e do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) procedeu-se à criação de um repositório que permitisse gerar um conjunto de imagens referente à LST, entre junho de 2016 e junho de 2017, na cidade de Coimbra. Consequentemente, relacionou-se a análise térmica da coleção de imagens obtidas anteriormente com os riscos associados que se possam manifestar, através de modelos de DR especializados. O resultado esperado deste trabalho diz respeito à possibilidade de analisar as variações da superfície da terra a partir da DR, como é o caso do estudo das ICU que corresponde à diferença da LST relacionando as zonas urbanas com as zonas não urbanas vizinhas.

O desenvolvimento do método *machine learning* aliado ao *cloud computing* permitiu que esta análise térmica ocorra com uma alta resolução espacial através da aquisição de dados.

**Palavras-chave:** Temperatura de Superfície da Terra, Landsat 8, ASTER, análise térmica, *machine learning*.

---

# Abstract

---

Remote sensing (DR), in Portugal, is a very recent topic that can be analyzed in more detail, considering the set of applications it can have, in several scientific areas. For this reason, this dissertation has developed this subject through the analysis of the land surface temperature in different national contexts.

Land Surface Temperature (LST) has acquired an increasing recognition over time, leading to an increasingly significant interest in the development of various methodologies in order to make its measurement from space. Therefore, LST is used in studies related to the variations of the land surface, such as urban heat islands (ICU), evapotranspiration and vegetation stress. These surface variations allow the creation of several applications related to different processes, including climate monitoring, hydrological cycle, model evaluation and data assimilation. The Landsat 8 (LS8) satellite has the potential to provide LST estimates with a high spatial resolution, which makes it possible to conduct this study more effectively.

In a short way, the study consisted of a first step in the application of an algorithm called Statistical Mono-Window (SMW), which allowed the creation of a calibration and validation database, in order to provide greater variability in atmospheric and surface conditions. Subsequently, through the acquisition of data from LS8 and the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) sensor, a repository was created to generate a set of images related to LST, between June 2016 and June 2017, in the city of Coimbra. Consequently, the thermal analysis of the previously obtained image collection was related to the associated geological risks and social problems that may manifest themselves, through specialized DR models. The expected result of this work is the possibility of analyzing the variations of land surface from DR, as is the case of the ICU study which corresponds to the difference of LST relating urban areas with neighboring non-urban areas.

The development of the machine learning method allied to cloud computing allowed this thermal analysis to occur with a high spatial resolution through data acquisition.

**Keywords:** Land Surface Temperature, Landsat 8, ASTER, thermal analysis, machine learning.

---

# Lista de Símbolos

---

$\lambda$  – Comprimento de onda

f – Frequência

c – Velocidade da luz

T - Temperatura absoluta [K]

$\epsilon_\lambda$ - Emissividade espectral ( $0 < \epsilon_\lambda < 1$ )

$C_1$  -  $3,7415 \times 10^{20}$  [W. nm<sup>4</sup> /m<sup>2</sup>]

$C_2$  -  $1,4388 \times 10^7$  [nm. K]

b - Constante de dispersão de Wein ( $2,898 \times 10^{-3}$  m K)

$\sigma$  - diz respeito à constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8}$  W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>)

$\epsilon$  – Emissividade do sensor ASTER GEDv3

$\epsilon_{13}$  – Emissividade do sensor ASTER GEDv3 para a banda 13

$\epsilon_{14}$  – Emissividade do sensor ASTER GEDv3 para a banda 14

c<sub>13</sub>, c<sub>14</sub> – Coeficiente de regressão da banda 13 e 14, respetivamente.

$\rho_{NIR}$  – Refletância no comprimento de onda do infravermelho térmico

$\rho_{RED}$  – Refletância no comprimento de onda do visível na região do vermelho

$NDVI_{bare}$  – Valores de NDVI em solo descoberto

$NDVI_{veg}$  – Valores de NDVI em solo com vegetação

$\epsilon_b$  – Emissividade efetiva para uma determinada banda espectral b

$\epsilon_{b,veg}$  – Emissividade efetiva da vegetação para uma determinada banda espectral b

$\epsilon_{b,bare}$  – Emissividade efetiva do solo descoberto para uma determinada banda espectral b

$A_i, B_i, C_i$  – Coeficientes do algoritmo Statistical Mono-Window

---

# Lista de Abreviações

---

ADI – Ambiente de Desenvolvimento Integrado

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection radiometer

ASTER GED – Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection radiometer and Global Emissivity Dataset

BIAS – Inviesamento

CM-SAF – Climate Monitoring Satellite Application Facility

EUMETSAT – European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites

FOV – Field of View

FVC – Fraction of Vegetation Cover

GEE – Google Earth Engine

ICU – Ilhas de Calor Urbano

IPA – Interface de Programação de Aplicações

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

JPL – Jet Propulsion Laboratory

LSA SAF – Satellite Application Facility on Land Surface Analysis

LST – Land Surface Temperature

LULC – Land Use and Land Cover

MDT – Modelo Digital de Terreno

MFG – Meteosat First Generation

ML – Machine Learning

MSG – Meteosat Second Generation

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NCAR – National Centers for Environmental Prediction

NCEP – National Center for Atmospheric Research

ND – Número Digital

NDVI – Normalized Vegetation Index

NWP-SAF – Numerical Weather Prediction Satellite Application Facility

OLI – Operational Land Imager

OLS – Ordinary Least Squares

REM – Radiação Eletromagnética

RMSE – Raiz Quadrada do Erro Médio

RS – Refletância de Superfície

RTTOV – Radiative Transfer for the TIROS Operational Vertical Sounder

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SMW – Statistical Mono-Window

SWIR – Short Wave Infra-Red

Tb – Temperatura de Brilho

TCWV – Total Column Water Vapor

TM – Thematic Mapper

TIR – Thermal Infrared

TIRS – Thermal Infrared Sensor

VNIR – Visible to Near Infra-Red

---

# Índice de Figuras

---

Figura 1. Componentes principais do processo de deteção remota. Adaptado de Tindall (2006).....	9
Figura 2. Espectro eletromagnético e espectro da região do visível.....	11
Figura 3. Esquemas representativos de órbitas. I - órbita geoestacionária; II - órbita heliossíncrona.....	14
Figura 4. Campos de visão observados pelo satélite.....	15
Figura 5. Assinaturas espectrais de diferentes elementos. Adaptado de Tedesco (2003).....	16
Figure 6. Lei de Planck para corpos negros em diferentes temperaturas.....	18
Figura 7. Comparação dos comprimentos de onda entre o Landsat 7 e 8. (USGS, 2019).....	23
Figura 8. Interface do utilizador da plataforma Google Earth Engine.....	28
Figura 9. Representação geográfica da área de estudo.....	32
Figura 10. MDT da área de estudo.....	32
Figura 11. Mapa do declive da área de estudo.....	32
Figura 12. Mapa geológico. Carta Geológica 19-D (Coimbra-Lousã) à escala 1:50.000 (Soares <i>et al.</i> , 2005).....	34
Figura 13. Fluxograma da metodologia utilizada para a produção o processamento de imagens da LST através do satélite Landsat 8.....	39
Figura 14. Coeficientes A (esquerda), B (centro), e C (direita) do algoritmo SMW (Equação (10)) por cada classe de vapor de água total da coluna (TCWV; cm) para LS8 e respetivo erro médio quadrático (RMSE).....	50
Figura 15. Erros referentes à temperatura de superfície da terra (LST) do LS8 para a base de dados de validação do SMW com dez classes de vapor de água total da coluna (TCWV; cm).....	52

Figura 16. *Layers* relativas ao processo de estimativa da LST para a obtenção de imagens do LS8 em Coimbra, no dia 14 de julho de 2016. (a) Composto RGB das bandas vermelha, verde e azul de LS8; (b) Temperatura de brilho (Kelvin) da banda 10 do LS8; (c) Emissividade do ASTER da banda 14; (d) Emissividade da banda 10 do LS8 derivada com a equação (9); (e) *Fraction of Vegetation Cover* do ASTER derivado do NDVI usando a Equação (1); (e) *Fraction of Vegetation Cover* do LS8 derivado do NDVI usando a equação (8).....54

Figura 17. Valores médios estimados da LST em Coimbra derivada para Landsat-8 usando o algoritmo SMW, em diferentes estações do ano. (a) Verão de 2016; (b) Outono de 2016; (c) Inverno de 2016; (d) Primavera de 2017.....56

Figura 18. Mapa do uso e ocupação do solo. Adaptado de Urban Atlas 2012.....57

Figura 19. Variações térmicas em diferentes pontos da cidade de Coimbra (Kelvin; K).....61

Figure 20. Histogramas representativos dos diferentes setores de ocupação do solo na superfície terrestre em função da temperatura de superfície, na cidade de Coimbra, em diferentes estações do ano. (a) Verão (junho a agosto de 2016); (b) Outono (setembro a novembro de 2016); (c) Inverno (dezembro de 2016 a fevereiro de 2017); (d) Primavera (março a maio de 2017).....90

---

# Índice de Tabelas

---

Tabela 1. Descrição de todas as bandas do Landsat 8.....	23
Tabela 2. Descrição de todas as bandas do sensor ASTER. (Adaptado de Abrams & Hook, 2002).....	25
Tabela 3. Descrição de uma pequena parte dos satélites e sensores inseridos na plataforma Google Earth Engine.....	30
Tabela 4. Descrição caracterizada da Em.....	43
Tabela 5. Conjunto de dados da plataforma GEE utilizados para estimar a LST.....	48
Tabela 6. Resultados estatísticos referentes à ocupação do solo.....	92

---

# 1. Introdução

---

## 1.1 Motivação

A detecção remota (DR) é uma disciplina que permite obter informação sobre um objeto, área ou fenómeno através de uma análise dos dados adquiridos por um dispositivo que não está em contacto com o elemento que está a ser investigado.

As técnicas de DR têm desempenhado um papel cada vez mais importante em diversas áreas científicas, entre elas a Geologia. A capacidade de obter informações acerca de uma determinada região, sem que os instrumentos utilizados para recolher essa informação estejam em contacto direto levou a um avanço significativo, possibilitando uma melhor análise dos riscos associados a processos hidrogeomorfológicos associados em diversos contextos, em zonas de difícil acesso para o ser humano, ou mesmo em regiões inacessíveis.

Atualmente, o domínio das ciências e tecnologias está a crescer de uma forma exponencial pelo que é necessário adotar novas perspetivas para acompanhar esse crescimento, principalmente no ramo das Geociências. Assim sendo, esta dissertação tem como propósito estabelecer uma correlação entre a geologia e a DR com o auxílio de técnicas de *machine learning* (ML), inovando assim esta ciência.

A DR tem proporcionado o estudo das variações climáticas a partir da utilização de imagens térmicas de satélites meteorológicos para explorar as alterações térmicas da superfície. A análise da temperatura da superfície em diferentes tipos de solos e coberturas vegetais pode fornecer um ótimo apoio ao planeamento e gestão ambiental.

As informações sobre a temperatura da superfície podem ser obtidas por DR, visto que o calor interno de um objeto é convertido em radiação e para a maioria dos objetos existe uma elevada relação entre a temperatura verdadeira do objeto e o fluxo radiante proveniente dos objetos (Jensen, 2009). Esse fluxo radiante emitido em comprimentos de onda longos pode ser registado utilizando sensores específicos de infravermelho inseridos em plataformas orbitais.

A LST é um parâmetro muito importante para muitos estudos ambientais, nomeadamente as alterações ambientais globais, os modelos climáticos, e as interações entre o homem e o ambiente (Oguz, 2015).

*Análise de dados térmicos de detecção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos*

Um dos impactos ambientais urbanos que pode ser considerado nas variações desta temperatura é a mudança no campo térmico devido à substituição de coberturas superficiais naturais e ao desenvolvimento destes espaços para a utilização antrópica. Esta substituição implica oscilações de temperatura, levando a várias repercussões desde a simples variação térmica até fenômenos mais intensos como os registrados em grandes cidades, designadas de ilha de calor urbano (ICU) (Sousa & Ferreira, 2012).

No caso das cidades, o uso e ocupação do solo reflete também o crescimento de uma mancha urbana, que é responsável por significativas alterações na paisagem. Os materiais urbanos superficiais possuem padrões de refletância que favorecem a absorção da radiação e, conseqüentemente, uma maior emissão de calor.

Os estudos nesta área baseiam-se essencialmente na análise térmica e de determinadas características espectrais através de dados de refletância de satélites e a sua posterior validação de modo a ser possível estudar e discutir os resultados adquiridos.

No que diz respeito às técnicas adotadas é de extrema importância salientar que o campo da DR aplicada ao domínio da geologia e aliado a determinadas metodologias têm dado origem a casos de estudo de enorme sucesso a nível mundial. Essas metodologias consistem num princípio designado de ML que diz respeito à elaboração de algoritmos para estudar determinadas informações através de dispositivos de leitura ótica, abrangendo assim domínios fundamentais como a extração de dados e aplicações de software (Lary *et al.*, 2016).

Os métodos relacionados com esta técnica têm sido largamente aplicados a problemas científicos e de engenharia durante quase duas décadas, enquanto que a aplicação destas técnicas na área das geociências e da DR é bastante nova e limitada (Lary *et al.*, 2016).

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação passa pela análise de dados térmicos de DR para a caracterização de superfícies naturais e áreas artificializadas em contextos distintos e posterior análise de possíveis riscos que possam estar associados.

De forma a tornar possível esse objetivo foi necessário efetuar um conjunto de tarefas igualmente importantes, tais como:

- A aplicação do algoritmo SMW produzido pelo CM-SAF (*Climate Monitoring Satellite Application Facility*) para obtenção de registos de dados meteorológicos relacionados com a LST a partir do MFG (*Meteosat First Generation*) e MSG (*Meteosat Second Generation*);
- Proceder à criação de uma base de dados de calibração e posteriormente de validação, referente ao algoritmo mencionado anteriormente, através de um modelo de transferência radiativa;
- Obtenção da coleção de imagens do L8, compreendida entre junho de 2016 e junho de 2017, sendo que a coleção de imagens utilizada diz respeito à *Landsat Collection 1 Level-1 Quality Assessment Band*.
- Criar um repositório, com o auxílio de vários *datasets*, capaz de reproduzir uma coleção de imagens referente a LST, a partir de uma plataforma de programação específica.
- Analisar as oscilações espaciais referentes à superfície do solo, utilizando as medições térmicas dos sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) do satélite LS8.
- Correlacionar os dados espaciais com os riscos associados a processos hidrogeomorfológicos e urbanos.

### 1.3 Instituição de Acolhimento

Durante o decorrer desta dissertação surgiu a oportunidade de desenvolver competências no domínio da programação, extremamente importantes, no Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), durante o mês de janeiro do presente ano.

Esta componente prática da dissertação teve uma ajuda imprescindível da Dra. Sofia Ermida, integrante da equipa LSA SAF sediada no IPMA. A LSA SAF por sua vez faz parte de uma organização designada EUMETSAT e está relacionada com o desenvolvimento e processamento de conjuntos de dados de satélite que caracterizam as superfícies continentais, tais como produtos de radiação, vegetação, evapotranspiração e incêndios florestais.

O objetivo do LSA SAF é analisar os dados detetados remotamente sobre a terra, as interações da superfície terrestre, bem como as aplicações da biosfera. É dado grande ênfase ao desenvolvimento e implementação de algoritmos que permitam uma utilização eficaz dos dados de satélites. Esta equipa dirige-se a uma vasta comunidade de utilizadores, desde a modelação de processos de superfície, à previsão sazonal e modelos climáticos até aplicações agrícolas e florestais (por exemplo, riscos de incêndio, produção de alimentos e hidrologia).

Como foi referido anteriormente um dos propósitos desta dissertação foi a aplicação do algoritmo SMW a observações do Landsat 8 (LS8). Para isso foi necessário recorrer a um Modelo de Transferência Radiativa designado RTTOV que permitisse fazer a calibração e validação dos coeficientes desse algoritmo, estando esse *software* disponível apenas no IPMA. Por outro lado, este estágio foi uma mais valia no sentido em que foram desenvolvidas competências relacionadas com o processamento digital de imagem e de programação, nomeadamente nos tipos de linguagem Python e JavaScript.

O tempo de vida dos satélites EUMETSAT e a participação dos membros do grupo LSA SAF no *Copernicus Services*, colocam o LSA SAF numa posição privilegiada como fornecedor de serviços para programas internacionais.

## 1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em oito partes principais. A primeira diz respeito à introdução do trabalho a desenvolver tendo em conta os objetivos principais desta dissertação bem como as motivações e o respetivo estado da arte. De seguida, são descritos os conceitos teóricos da DR, contendo uma síntese dos sensores e missões espaciais utilizadas, bem como uma análise do processamento e análise de imagem.

Numa terceira parte é feita uma análise das plataformas de programação aplicadas na presente dissertação. Posteriormente é caracterizada a área de estudo, do ponto de vista geográfico, geológico e urbanístico. Por conseguinte é realizada uma descrição das diferentes metodologias utilizadas.

De seguida, são apresentados os resultados obtidos e é feita uma análise e discussão dos mesmos. Por fim, são referidas as considerações finais, tendo em conta os resultados obtidos nesta dissertação, sendo efetuada uma reflexão construtiva do trabalho e sugestão de investigações futuras.

## 1.5. Estado da Arte

No trabalho que eu desenvolvi ao longo do presente ano letivo a DR no domínio da geologia é utilizada como uma ferramenta para correlacionar os dados térmicos obtidos com as variações da superfície da terra em diferentes contextos e, posteriormente analisar os possíveis riscos associados a processos hidrogeomorfológicos.

O primeiro autor a identificar a possibilidade de utilização da DR para o estudo da temperatura de superfície terrestre (LST) em ambientes urbanos foi Rao em 1972. Este afirma que o uso da DR para o estudo do clima urbano possibilita o levantamento sistemático e contínuo de dados, uma vez que conduz a uma importante vantagem face às análises espaciais realizadas através de estações meteorológicas.

Posteriormente são referidos alguns trabalhos de grande relevo realizados nesta área, salientando:

**a) Validação de um algoritmo para estimar a temperatura da terra** por Qin & Berliner (2020) em que foi utilizada a DR na estimativa da LST a partir dos dados da banda térmica do *Landsat Thematic Mapper* (TM). Para isso foi desenvolvido um algoritmo em que a validação do mesmo foi feita utilizando o programa de simulação atmosférica designado LOWTRAN 7.0 (Kneizys *et al.*, 1988). Os dados foram simulados em diversos contextos, com vários valores de temperatura de superfície terrestre e de temperatura do ar, recorrendo também a sete temperaturas atmosféricas diferentes desenvolvidas através do programa LOWTRAN 7.0, como referido anteriormente (Cole *et al.*, 1965). A posterior validação do algoritmo foi feita através da simulação da radiação térmica ao nível do satélite e de seguida foi usada essa radiação para converter em temperatura de brilho do TM6 de modo a estimar a LST. Os resultados da validação indicam que o algoritmo é capaz de fornecer uma estimativa bastante precisa do LST a partir dos dados do TM6.

**b) Análise dos efeitos provocados pelas ilhas de calor urbano** onde Yin *et al.*, 2018 através de um modelo de regressão espacial foi possível estudar os efeitos tanto da composição do uso do solo como da forma urbana no LST na cidade de Wuhan, China, com base na gestão de planeamento. Foram utilizados dados de imagem do Landsat ETM+ para estimar o LST, e a composição do uso do solo foi calculada através da área de superfície impermeável e da proporção de área coberta por vegetação e por água, enquanto que os indicadores urbanos incluíam o fator de vista do céu, densidade de edifícios, e proporção de área útil. Em primeiro lugar foi testada a correlação espacial do LST urbano, o que confirmou

que a aplicação de método tradicional de regressão seria inválida. Foi então escolhido um modelo de erro espacial devido ao facto de os parâmetros serem melhores do que um modelo de atraso espacial. Os resultados mostraram que a medição urbana deveria ser o foco para a atenuação dos efeitos da ilha de calor urbano (ICU). Além disso, a análise da relação entre a forma urbana e o efeito da ICU com base na unidade de gestão do planeamento foi útil para as correspondentes regras de atenuação do efeito ICU.

Finalmente, o modelo de regressão espacial foi recomendado para ser um método apropriado para lidar com problemas relacionados com o ambiente térmico urbano. Os resultados sugeriram que o impacto da urbanização sobre o efeito ICU pode ser mitigado não só equilibrando vários tipos de uso do solo, mas também otimizando a forma urbana, o que é torna um método ainda mais eficaz.

**c) Determinação da temperatura de superfície do ar** onde através de Benali *et al.*, 2012 foram utilizados elementos de DR para ajudar na obtenção de dados de temperatura do ar fornecendo um maior número de informações sobre padrões espaciais em diversas áreas, algo que não é possível recorrendo apenas a estações metrológicas. O principal objetivo deste estudo foi o de estimar com precisão a variação da temperatura para um período de 10 anos com base em dados de DR obtidos a partir do MODIS e de dados auxiliares utilizando uma abordagem estatística, sendo para isso essencial determinar a LST.

**d) Relacionar a poluição atmosférica com as variações da superfície terrestre** onde Weng & Yang (2006) analisaram a relação entre a poluição atmosférica local e a LST no meio urbano, na cidade de Guangzhou no sul da China, utilizando ferramentas de SIG. Para a realização deste estudo foram utilizadas imagens do satélite Landsat 5 TM. Foram obtidas medições da qualidade do ar atmosférico para o dióxido de enxofre, óxido de azoto, monóxido de carbono, partículas em suspensão, e o nível de poeira entre 1981 e 2000. As imagens do Landsat TM e os mapas derivados de fotografias aéreas foram utilizados para estudar a superfície terrestre da cidade em diferentes alturas e mudanças. Os dados do infravermelho térmico do Landsat foram utilizados para calcular as temperaturas da superfície da terra e para avaliar os padrões térmicos urbanos. Os resultados mostram que os padrões espaciais dos poluentes atmosféricos sondados estavam correlacionados com a densidade urbana construída, e com valores de temperatura da superfície terrestre derivados de satélite, particularmente com medições feitas durante o Verão.

Como foi possível observar nos estudos anteriormente analisados as técnicas de ML aliadas à DR têm contribuído para um novo desenvolvimento no domínio das geociências. No decorrer dos anos foi notória a quantidade de aplicações possíveis com estas técnicas na área das ciências da terra, relativamente às oscilações que se verificam quer na atmosfera que na superfície da terra (Augustine *et al.*, 2005), à análise da emissividade de superfície

(Em) (Hulley *et al.*, 2009), aos índices de vegetação (Carlos & Ripley, 1997), entre outros fatores.

Uma das características que tornam os algoritmos de ML tão úteis é o facto de serem aproximadores universais, sendo possível compreender o comportamento de um sistema se for fornecido um conjunto abrangente de exemplos, num determinado sistema de dados inicial. Uma característica útil adicional é que não é necessário conhecer numa primeira fase a forma funcional do sistema, tal como é exigido normalmente (Lary, 2010).

Segundo Lary (2010) é fundamental o desenvolvimento de três parâmetros, sendo os dois primeiros relacionados com um modelo de regressão e o terceiro pela sua capacitabilidade de classificação, assim sendo:

1. O desenvolvimento de um “código de ativação”;
2. A criação de um modelo empírico que pode ser originado através de dados já existentes;
3. A aprendizagem automática posteriormente utilizada para a classificação.

## 2. Conceitos de Detecção Remota

A detecção remota (DR) é um termo muito genérico que pode abranger um conjunto de processos como a visão humana, a fotografia e o radar. Segundo Reddy (2008) é definida como a ciência e a arte de obter informação sobre um objeto, área ou fenómeno através de uma análise dos dados adquiridos por um dispositivo que não está em contacto com o objeto, área ou fenómeno em investigação. Enquanto Horler e Barber (1981) definiram como o processo de obtenção de informação sobre um objeto sem estar em contacto direto com ele, incluindo medições de energia eléctrica, magnética e eletromagnética.

Contudo, o termo DR é normalmente associado a sistemas que têm por base a energia eletromagnética, e que registam informação sobre a Terra através de sensores inseridos em satélites ou aviões. Nesse sentido, a DR é definida segundo Sabins (1987) como a ciência de aquisição, processamento e interpretação de imagens adquiridas por aviões ou satélites que gravam a interação entre a matéria e a energia eletromagnética.

### 2.1. Componentes de Detecção Remota

O procedimento geral envolvido no sistema de DR para a aquisição de dados abrange um conjunto de fatores distintos, nomeadamente a fonte de energia, a propagação dessa energia através da atmosfera, a sua interação com a superfície terrestre, as plataformas ou sensores utilizados para registar a energia refletida e por fim a obtenção da informação recolhida por esses sensores (Figura 1).

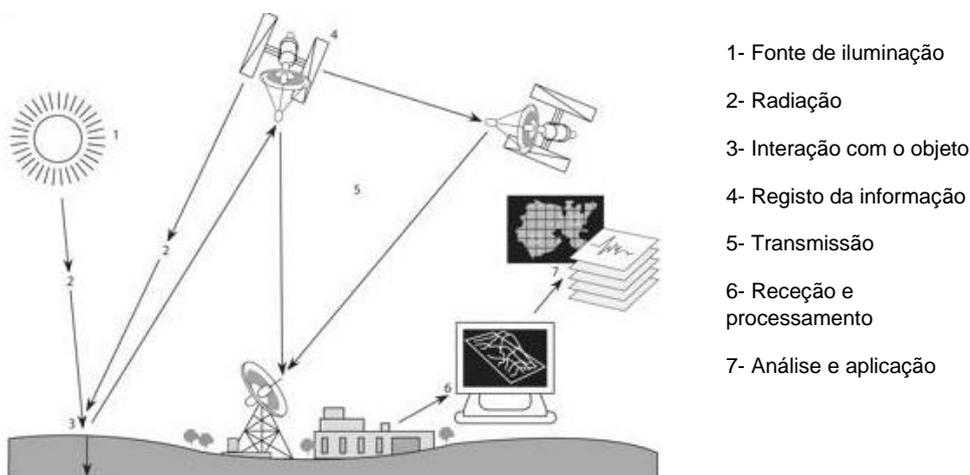


Figura 1. Componentes principais do processo de detecção remota. Adaptado de Tindall (2006).

### 2.1.1. Fonte de energia e princípios da radiação

A aquisição de imagens na área da DR ocorre devido ao facto de os objetos que se encontram na superfície terrestre emitirem energia que está na forma de radiação eletromagnética (REM).

No caso da DR é necessário que essa detecção possa ser realizada na ausência de qualquer matéria que se encontre entre o objeto e o observador. Consequentemente, a informação sobre o objeto, área ou qualquer fenómeno deve estar disponível de modo a ser transmitida através de um vácuo transmissor. Esse transmissor de informação, ou ligação de comunicação, é a REM (Reddy, 2008).

A partir da REM provenientes de certos objetos da superfície terrestre é possível determinar as características físicas e químicas desses objetos e regista-las através de sensores abordo de satélites da Terra, designados satélites de DR (Fonseca & Fernandes, 2004).

### 2.1.2. Espectro Eletromagnético

As oscilações que ocorrem no campo eletromagnético são designadas por ondas eletromagnéticas. Estas ondas propagam-se no vácuo e obedecem-se ao seguinte princípio:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Onde a frequência ( $f$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) apresentam uma relação de proporcionalidade inversa com uma velocidade constante de  $c$ . Isto significa que a quantidade de energia conduzida pela onda é inversamente proporcional ao comprimento da mesma.

O conjunto de ondas eletromagnéticas é designado por espectro eletromagnético, que por sua vez enquadra um conjunto de ondas eletromagnéticas que vão desde as ondas de rádio até às ondas de raios-X e gama, variando entre um intervalo de  $10^3$  m e  $10^{-12}$  m, respetivamente (Figura 2). Dentro desses intervalos existem várias subdivisões designadas por bandas espectrais. Na presente dissertação, o intervalo que será estudado diz respeito ao infravermelho térmico.

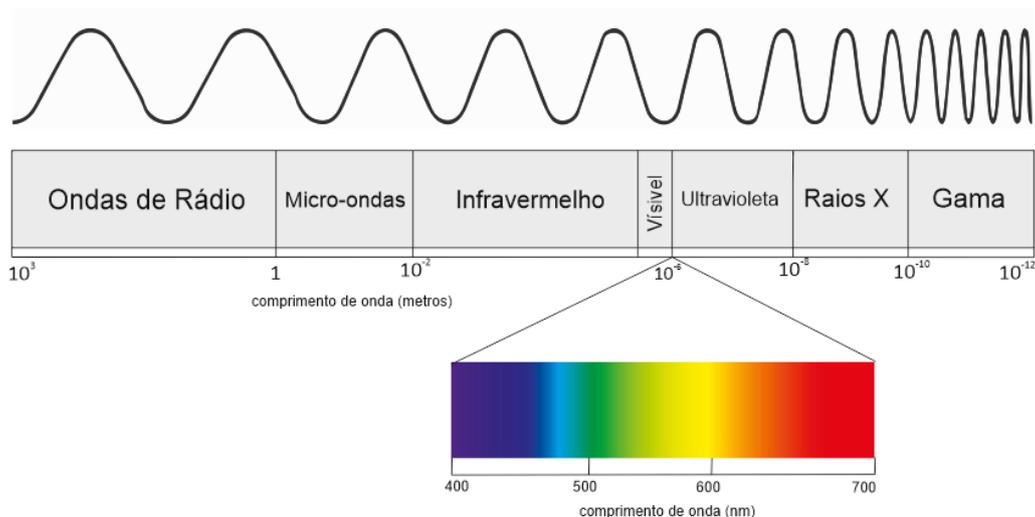


Figura 2. Espectro eletromagnético e espectro da região do visível.

### 2.1.3. Interações da REM com a atmosfera

Independentemente da fonte de emissão, toda a radiação detetada pelos sensores de DR atravessa uma camada de atmosfera até atingir o alvo e retorna aos sensores interagindo novamente com a atmosfera. Este fenómeno é designado por interação da REM com a atmosfera (Fonseca & Fernandes, 2004). Na passagem da REM pela atmosfera ocorrem dois tipos de interações com partículas de matéria suspensas na atmosfera: a dispersão e a absorção. A dispersão atmosférica ocorre quando os gases e partículas existentes na atmosfera interagem com a radiação e fazem com que esta seja dispersa na atmosfera. A absorção atmosférica resulta numa perda efetiva de energia para os constituintes atmosféricos. Os principais absorventes são: vapor de água, dióxido de carbono e ozono. Os efeitos dos processos de dispersão e absorção diminuem a nitidez das imagens reduzindo assim o contraste.

Durante a absorção existem comprimentos de onda da radiação eletromagnética que são mais absorvidos do que outros. As regiões do espectro que estão relativamente livres de absorção são chamadas de janelas atmosféricas. A radiação eletromagnética nestas regiões passa através da atmosfera sem sofrer tantas modificações quanto as que ocorreriam noutros comprimentos de onda.

O conhecimento das janelas atmosféricas é de extrema importância em DR, visto que esta deteção é impossível em zonas do espectro que sejam seriamente afetadas pela dispersão e/ou absorção. Por outro lado, a DR também deve ser feita em comprimentos de onda onde a radiação solar tenha uma elevada energia.

#### 2.1.4. Interações da REM com elementos da superfície terrestre

A razão pela qual as imagens de satélite podem ser utilizadas em DR, mais especificamente na produção de mapas de ocupação do solo, está relacionada com a maneira como as várias ocupações do solo refletem a energia solar. Esta quantidade de energia refletida pela área coberta por cada pixel e captada pelo sensor, e é posteriormente convertida em números digitais (ND) através de modelos de calibração internos do sensor. Estes ND, podem depois ser submetidos a uma interpretação visual ou a análises estatísticas para a identificação da classe de ocupação do solo ou para quantificação de uma característica da superfície terrestre.

A REM ao incidir sobre os objetos que se encontram na superfície terrestre faz com que a energia seja absorvida, refletida ou transmitida. A absorção ocorre quando a energia é retida pelo objeto provocando alterações nesse objeto, enquanto que a reflexão ocorre quando a radiação que incide no objeto é reenviada pelo objeto, sendo assim redirecionada. Por fim, a transmissão consiste na passagem da radiação através do objeto. A radiação solar ao incidir sobre os objetos existentes na superfície da Terra pode ser absorvida, refletida, ou transmitida, em função das propriedades dos materiais que os compõem e das características da radiação incidente. Analisando a equação 1 é possível observar que a soma das radiações refletida, absorvida e transmitida é igual à energia incidente, para um determinado comprimento de onda.

$$E_{inc} = E_{abs} + E_{trans} + E_{refl} \quad (2)$$

Em DR, o foco principal é a radiação refletida pelos elementos, pois é esta que chega ao sensor e que é posteriormente convertida em ND. A quantidade de energia refletida que alcança o sensor depende da estrutura da superfície, do ângulo incidente e da refletância da superfície dos objetos.

Os dois tipos principais de como é refletida a energia são a reflexão especular e reflexão difusa. O comportamento espectral da superfície depende assim da sua irregularidade, relativamente ao comprimento de onda da radiação incidente. Se os comprimentos de onda são muito menores do que as variações da superfície, ou do que dimensões das partículas que a constituem, a reflexão difusa domina.

### 2.1.5. Satélites e sensores para a observação da terra

Atualmente encontra-se disponível um elevado número de sensores para a utilização em DR, adaptados a diferentes finalidades, podendo ser classificados segundo um conjunto de fatores, nomeadamente: o tipo de aplicação pretendido, o carácter ativo/passivo do sensor, o tipo de órbita e o tipo de resolução.

Relativamente ao tipo de sensores estes podem ser sensores ativos ou passivos. Os sensores passivos detetam radiação exterior a eles e que se encontra disponível no meio natural. Os sensores ativos, por outro lado, providenciam a sua fonte de energia. Assim, estes sensores emitem radiação que irá interagir com os elementos, tendo a vantagem de poder captar energia em qualquer altura do dia ou do ano, já que não depende de qualquer fonte exterior de energia. Para além disso podem também utilizar zonas do espectro eletromagnético que não existem em quantidade suficiente na energia solar, como é o caso das ondas micro-ondas.

O percurso percorrido por um satélite designa-se por órbita, que se pode caracterizar pela altitude, orientação e rotação relativamente à Terra. A inclinação da órbita é o ângulo entre o plano orbital e o plano do equador, e determina a área da Terra que será observada pelo sensor. A altitude da órbita está obviamente relacionada com a velocidade do satélite necessária para uma volta completa à Terra: quanto mais baixa for a órbita maior será a velocidade e menor será o tempo necessário para dar essa.

Os satélites, podem apresentar uma órbita geoestacionária (Figura 3. I) ou heliossíncrona (Figura 3.II). No caso da órbita geoestacionária, os satélites deslocam-se a altitudes de 36 000 Km sendo possível observar continuamente um hemisfério quase na sua totalidade, recolhendo continuamente informação em áreas específicas de grandes dimensões, como é o caso dos satélites meteorológicos, em que para realizar o rastreio das nuvens sobre os continentes, não é necessária uma resolução espacial elevada. O período de uma órbita geoestacionária a é igual ao período de rotação da Terra, ou seja, um dia.

No caso das orbitas heliossíncronas, encontram-se inseridas as órbitas quase-polares, isto é, planos ligeiramente inclinados relativamente ao eixo da Terra, que permitem cobrir a maior parte da superfície terrestre, à exceção das zonas junto aos polos, passando no mesmo local a intervalos constantes, mantendo o mesmo ângulo de incidência da fonte de luz relativamente aos objetos e cobrindo menores extensões por imagem do que os geoestacionários, mas permitindo captar maior detalhe. Neste caso, as observações são sempre feitas nas mesmas condições de iluminação solar.

*Análise de dados térmicos de detecção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos*

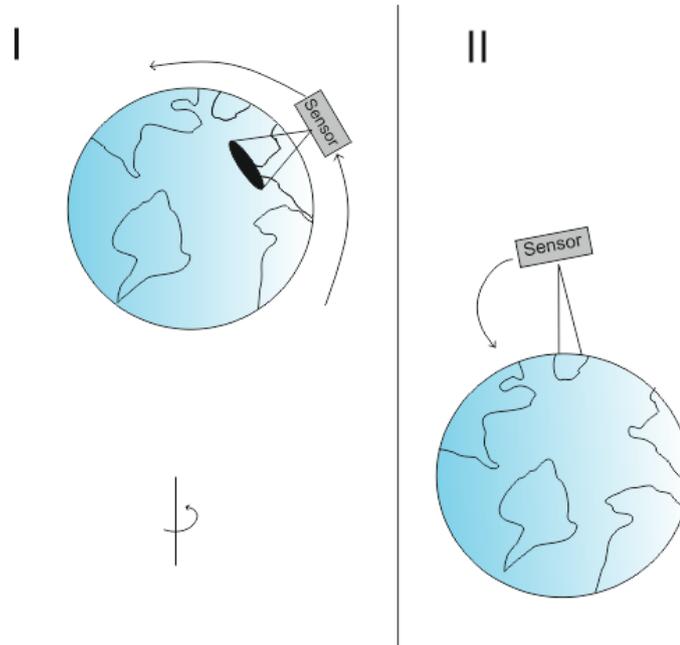


Figura 3. Esquemas representativos de órbitas. I - órbita geoestacionária; II - órbita heliossíncrona.

### 2.1.6. Tipos de Resoluções

A quantidade de informação contida numa imagem depende em grande parte da sua resolução, que por sua vez pode ser definida em quatro dimensões: espacial, espectral, radiométrica e temporal.

A resolução espacial é definida como o objeto mais pequeno que pode ser detetado a partir de um determinado ponto. A distância entre o alvo e o sensor tem um papel importante na determinação do detalhe da informação obtida. A resolução espacial de um sensor depende principalmente do seu campo de visão instantânea (IFOV) (Figura 4). O IFOV é a área na superfície vista pelo satélite a partir de uma determinada altitude e num determinado momento.

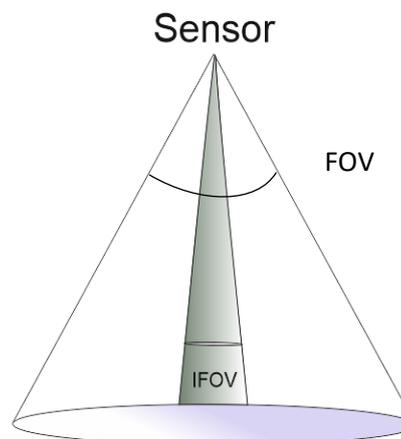


Figura 4. Campos de visão observados pelo satélite.

A área visualizada que é determinada multiplicando o IFOV pela distância do sensor à superfície é denominada de célula de resolução, e determina a resolução espacial máxima de um sensor. Para que um objeto seja detetado, a sua dimensão tem de ser, normalmente, igual ou superior à da célula de resolução.

A resolução temporal de um sistema de DR consiste no período de tempo decorrido entre duas observações consecutivas do mesmo local, ou seja, o tempo que um satélite leva a concluir um ciclo orbital completo.

Por fim, a resolução radiométrica descreve a capacidade para discriminar pequenas variações de energia, ou seja, é o número de níveis distintos em que um sinal pode ser dividido. Quanto mais elevada a resolução radiométrica de um sensor, mais sensível é esse sensor na deteção de pequenas diferenças de energia refletida.

A resolução espectral diz respeito à dimensão e ao número de intervalos de comprimento de onda específicos do espectro eletromagnético que o sensor é capaz de distinguir. Este tipo de resolução é medido através das larguras das bandas espectrais, medidas em micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) ou nanómetros (nm). Quanto mais estreita for a banda melhor a resolução espectral, logo é possível produzir uma assinatura espectral mais rigorosa.

### 2.1.6.1. Refletância e assinatura espectral

A razão entre a energia refletida pelos objetos e a energia que incide nos mesmos designa-se por refletância e depende do comprimento de onda, do ângulo de incidência da luz, da natureza do corpo e das suas características físicas.

Cada objeto é único do ponto de vista espectral, visto que possui o seu próprio padrão de refletância nas diferentes bandas do espectro eletromagnético, ou seja, a sua própria assinatura espectral, que pode variar ao longo do tempo, como é o caso da vegetação.

Analisando as refletâncias de determinados elementos da superfície terrestre em diferentes intervalos do espectro eletromagnético obtém-se a assinatura espectral desses elementos, permitindo assim distingui-los (Figura 5).

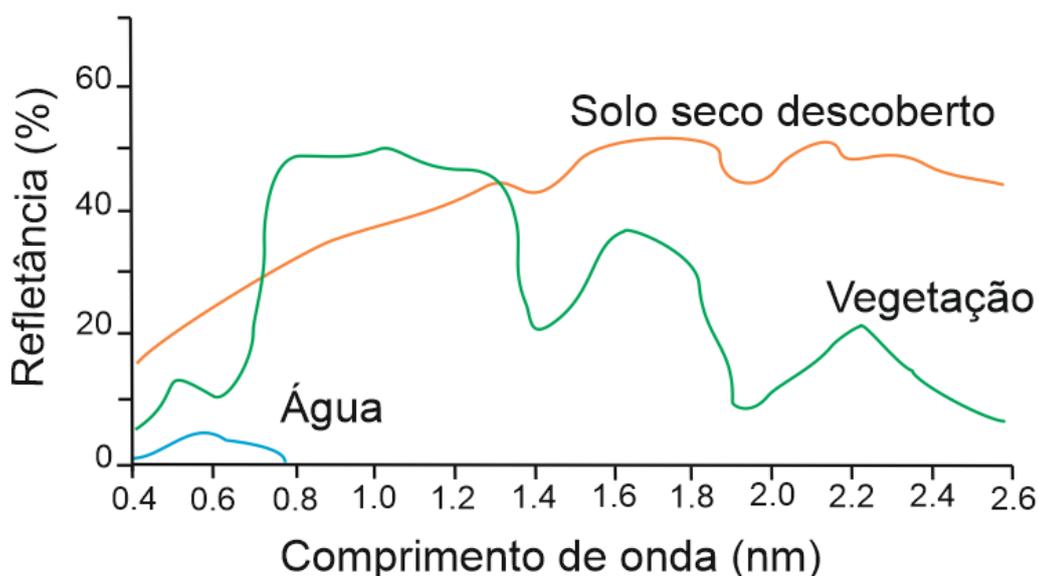


Figura 5. Assinaturas espectrais de diferentes elementos. Adaptado de Tedesco (2003).

No caso da vegetação, a curva da refletância espectral apresenta valores baixos nas regiões do vermelho e do azul do espectro visível e um pico na banda espectral do verde. Este comportamento deve-se à absorção de radiação azul e vermelha pela clorofila, sendo bastante frequente quando as plantas estão em stress. Muitas vezes, a refletância na zona do vermelho aumenta tanto que fica ao nível do verde, fazendo com que as plantas se tornem amareladas, devido à junção do verde com o vermelho. Há diferentes espécies vegetais que podem contribuir, indiretamente, para estudos geológicos, visto que a vegetação varia consoante o tipo de substrato.

Relativamente à água esta caracteriza-se por refletir muito pouco da REM na parte do infravermelho, ou seja, a identificação de corpos de água numa imagem de satélite é feita mais facilmente em zonas do infravermelho. Contudo a sua caracterização deve ser feita sobretudo na parte do visível visto que a refletância de um corpo de água é bastante afetada pelos materiais nela existentes. Por exemplo, um aumento de concentração de clorofila leva a um aumento de refletância no verde e uma diminuição no azul. Esta relação pode ser utilizada para monitorizar a presença de algas em corpos de água. Outro exemplo é, para uma determinada região, a água com elevada concentração de sedimentos resultantes da erosão dos solos, tem uma maior refletância no visível do que a água limpa.

A curva da refletância espectral do solo apresenta menos variações do que a da vegetação e apresenta um aumento da refletância com o comprimento de onda. Alguns dos fatores que controlam a refletância dos solos são: humidade, textura e conteúdo em matéria orgânica e presença de óxido de ferro. Por exemplo, a refletância do solo diminui com o aumento de humidade. A humidade nos solos e a quantidade de matéria orgânica influenciam a sua capacidade de refletância (Mather, 2004).

### 2.1.7. Leis da Radiação Térmica

Todos os elementos ou objetos tem a capacidade de emitir radiação derivada de vários processos, como é o caso de descargas elétricas (ondas de rádio). Neste contexto em particular, essa radiação pode ser emitida, onde qualquer objeto com uma temperatura absoluta acima dos 0 Kelvin emite radiação térmica. Este processo pode ser analisado e estudado segundo as leis de Planck, Wien e Stefan-Boltzmann.

#### 2.1.7.1. Lei de Planck

A lei de Planck exprime a radiância espectral hemisférica para um determinado comprimento de onda ( $M_\lambda$ ), que é emitida por qualquer objeto em equilíbrio, como resultado da sua temperatura interna:

$$M_\lambda = \frac{\epsilon_\lambda \cdot C_1}{\lambda^5 \cdot (\exp(C_2(\lambda.T)) - 1)} \quad [\text{W/m}^2 / \text{nm}] \quad (3)$$

Em que:

$\lambda$  comprimento de onda [mm]

*Análise de dados térmicos de detecção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos*

T = Temperatura absoluta [K]

$\epsilon_\lambda$  = emissividade espectral ( $0 < \epsilon_\lambda < 1$ )

$C_1 = 3,7415 \times 10^{20}$  [W. nm<sup>4</sup> /m<sup>2</sup>]

$C_2 = 1,4388 \times 10^7$  [nm. K]

Com esta equação é possível estimar a radiância hemisférica de um objeto em qualquer comprimento de onda  $\lambda$ , se a sua temperatura T for conhecida, assim como a sua emissividade  $\epsilon_\lambda$ , nesse determinado comprimento onda (Figura 6).

Na presente dissertação, a Lei de Planck foi fundamental para fazer a calibração e posterior conversão da radiação em temperatura, um procedimento necessário para a estimativa da temperatura de superfície da terra (LST).

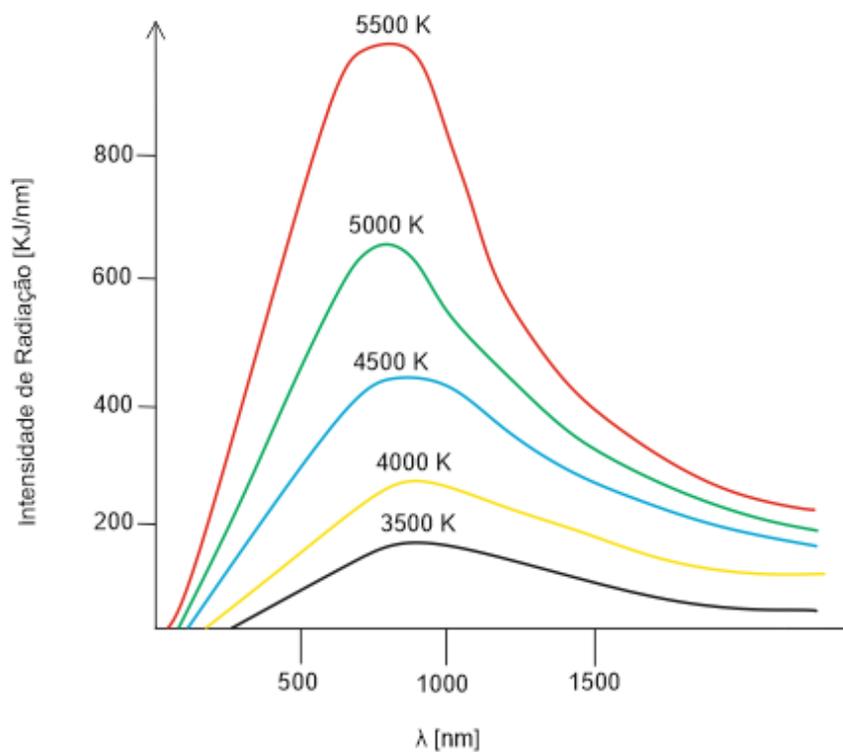


Figure 6. Lei de Planck para corpos negros em diferentes temperaturas.

### 2.1.7.2. Lei de Wien

A Lei de Wien, ou Lei do Deslocamento de Wien, explicita a relação entre o comprimento de onda em que um corpo emite radiação eletromagnética com maior intensidade ( $\lambda_{max}$ ) e a temperatura desse corpo (T).

A temperatura absoluta de um corpo, T, é inversamente proporcional ao comprimento de onda ( $\lambda_{max}$ ), ou seja, quando maior for a temperatura do corpo (T) menor será o comprimento de onda ( $\lambda$ ).

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (4)$$

Em que b diz respeito à constante de proporcionalidade designada constante de dispersão de Wien ( $2,898 \times 10^{-3} \text{ m K}$ ).

### 2.1.7.3. Lei de Stefan-Boltzmann

A lei de Stefan-Boltzmann expressa a relação entre a temperatura de um corpo negro (T) e o total de radiação eletromagnética emitida por esse corpo (I).

O total de radiação emitido por um corpo negro é proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta, ou seja:

$$I = \sigma T^4 \quad (5)$$

Em que  $\sigma$  diz respeito à constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ).

### 2.1.8. Processamento e análise de imagens

O processamento de imagens de DR tem como objetivo fazer a extração, manipulação e quantificação da informação necessária para certas aplicações relacionadas com DR, como é o caso da ocupação do solo urbano ou a realização de cartografia. Atualmente a maior parte das imagens são disponibilizadas em formato digital, o que leva a um processamento automático, aumentando assim a qualidade e a quantidade de informação disponível.

O processamento digital pode ser dividido em três fases, de acordo com Fonseca e Fernandes (2004). A primeira diz respeito a operações de pré-processamento, em que são eliminadas as possíveis distorções radiométricas ou geométricas existentes resultantes de vários fatores no momento de aquisição. A segunda em operações de transformação, em que são realçadas algumas características úteis para o objetivo do estudo. E por fim, a fase de exploração, em que é extraída da imagem a informação qualitativa e/ou quantitativa necessária à análise a efetuar.

## 2.2. Programas e Missões Espaciais

A partir dos anos 90 iniciou-se o lançamento de uma série de satélites com o objetivo de recolher dados para diversas finalidades, nomeadamente para estudos no âmbito da geologia e cartografia, para analisar a dinâmica da atmosfera, dos oceanos e da superfície terrestre, e para a avaliação de recursos naturais. Para isso foram criados vários programas de observação da Terra através da DR.

### 2.2.1. Landsat

O programa espacial Landsat foi criado no Estados Unidos da América enquanto decorria a missão Apollo à Lua nos anos 60 do século XX, tendo sido motivado pelas fotografias terrestres que foram tiradas a partir do espaço, pela primeira vez. Em 1965, o diretor da *U.S. Geological Survey* (USGS), William Pecora, propôs então a criação de um programa de satélites de DR com o objetivo de recolher dados sobre os recursos naturais do planeta Terra. Embora já existissem satélites meteorológicos a monitorizar a atmosfera terrestre desde os anos 60 estes não captavam dados da superfície terrestre (Landsat Science, NASA, 2014).

Assim sendo, o programa espacial desenvolvido pela NASA teve início em 1972 com o lançamento do satélite ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*), mais tarde designado Landsat-1. Este programa esteve em fase experimental até 1983, e só depois foi declarado operacional, iniciando assim a fase de comercialização das imagens recolhidas pelos satélites (Fonseca & Fernandes, 2004). Em 2008, a política de dados do Landsat mudou e o arquivo Landsat tornou-se gratuito e público (Woodcock *et al.*, 2008). Isto resultou em novos modelos de processamento de dados e desencadeou num período importante de inovação e conhecimento (Wulder *et al.*, 2012).

Atualmente, o sistema Landsat tem contribuído significativamente para a compreensão do ambiente da Terra, proporcionando utilizações revolucionárias de dados espaciais. A maior amplitude das aplicações do Landsat aceleraram após o lançamento de Landsat 8 (LS8), com melhorias significativas na qualidade dos dados (Wulder *et al.*, 2019) (Figura 7).

### 2.2.1.1. Landsat 8

O satélite LS8 foi lançado no dia 11 de fevereiro de 2013, na Califórnia. Este satélite é o mais recente inserido no programa de observação da Terra pela NASA e transporta dois sensores: o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). O sensor OLI armazena dados para nove bandas inseridas no campo VNIR (*Visible to Near Infra-Red*) - SWIR e o sensor TIRS é composto por duas bandas térmicas muito úteis no fornecimento de temperaturas de superfície mais precisas (Tabela 1).

Estes sensores permitem quantificar os dados em 12 bits, em vez de 8 bits como o caso do Landsat ETM+, permitindo assim a medição da variabilidade das condições da superfície terrestre. O alcance dinâmico do OLI é melhorado em comparação com os sensores Landsat anteriores, reduzindo a saturação da banda sobre superfícies altamente refletoras, como é o caso das nuvens (Roy *et al.*, 2014).

O LS8 melhorou as capacidades de registo e de transmissão via satélite para terra, em comparação com os sistemas Landsat anteriores. Os dados são transmitidos para três estações de receção terrestres primárias localizadas em GilmoreCreek no Alasca, Svalbard na Noruega, e no *USGS Earth Resource Observation and Science Center (EROS)* (Roy *et al.*, 2014). Ao contrário de missões Landsat anteriores, todos os dados do LS8 disponíveis para as estações de receção do cooperador internacional foram armazenados e transmitidos diretamente para as estações recetoras e adicionados ao arquivo Landsat (Loveland & Dwyer, 2012). Por dia, são adquiridas mais 60% de cenas do LS8 em comparação com o Landsat 7. Esta aquisição de dados melhorada proporciona uma cobertura quase global do mar e a possibilidade de gerar conjuntos de dados Landsat globais com trajetórias adjacentes, sem nuvens (Kovalsky & Roy, 2013).

Este satélite apresenta uma órbita heliosíncrona, quase polar, com uma altitude de 705 Km e completa uma órbita terrestre a cada 99 minutos. Os dados do LS8 são adquiridos em faixas de 185 Km e o tamanho de uma cena tem é de 185 Km x 180 Km definidas segundo o sistema de referência mundial (WRS-2). O satélite adquire cerca de 740 cenas por dia e tem um ciclo de repetição de 16 dias com um tempo de passagem equatorial por volta das 10 horas da manhã (USGS, 2019).

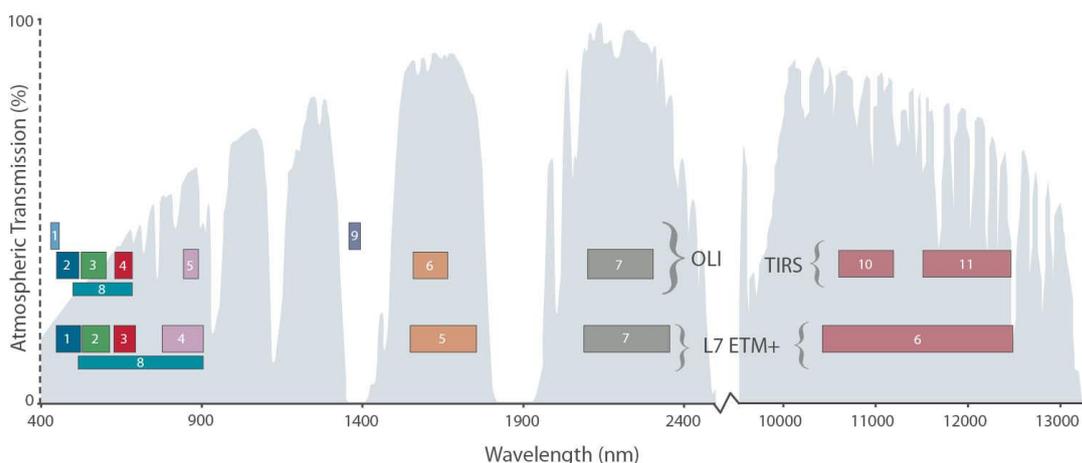


Figura 7. Comparação dos comprimentos de onda entre o Landsat 7 e 8. (USGS, 2019).

Tabela 1. Descrição de todas as bandas do Landsat 8.

	<i>Bandas Espectrais</i>	<i>Comprimento de Onda (nm)</i>	<i>Aplicações de cada banda</i>
Sensor OLI	Banda 1	0.43 – 0.45	Estudo das zonas costeiras.
	Banda 2	0.45 – 0.51	Distinção entre o solo e a vegetação.
	Banda 3	0.53 – 0.59	Análise do estado de saúde da vegetação e os seus riscos.
	Banda 4	0.64 – 0.67	Determina a presença de encostas e vegetação.
	Banda 5	0.85 – 0.88	Estudo das zonas costeiras e de biomassa.
	Banda 6	1.57 – 1.65	Identificar a humidade do solo e vegetação.
	Banda 7	2.11 – 2.29	
	Banda 8	0.50 – 0.68	Deteta nuvens de elevada altitude.
	Banda 9	1.36 – 1.38	
Sensor TIR	<b>Banda 10</b>	<b>10.6 – 11.19</b>	<b>Muito úteis no fornecimento de dados de temperatura e de superfície mais precisas.</b>
	<b>Banda 11</b>	<b>11.5 – 12.51</b>	

## 2.2.2. ASTER

O dispositivo ASTER, designado por *Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer* inserido no satélite Terra e desenvolvido pela NASA, tem sido muito utilizado em análises geológicas e outros estudos científicos (Ducart *et al.*, 2006; Hellman & Ramsey, 2004; Hubbard & Crowley, 2005; Rockwell & Hofstra, 2008; Rowan *et al.*, 2003; Vaughan *et al.*, 2005, 2008; Zhang *et al.*, 2007).

O ASTER incorpora três instrumentos que permitem gerar imagens multiespectrais, que fornecem observações entre o visível e o infravermelho próximo (0.4-1.0  $\mu\text{m}$ ), no infravermelho médio (SWIR, 1.0-2.4  $\mu\text{m}$ ) e no infravermelho térmico (TIR, 8-12  $\mu\text{m}$ ) do espectro eletromagnético (Pour, Hashim & Park, 2017) (Tabela 2).

Com o objetivo de desenvolver estudos relacionados com o ASTER, foi criada uma biblioteca com mais de 2000 espectros de elementos naturais e artificiais, como é o caso da Biblioteca Espectral ASTER v1.2, disponível online. A biblioteca insere dados do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), *Johns Hopkins University* (JHU) e do *United States Geological Survey* (USGS). Alguns exemplos são os espectros de rochas, minerais, solos lunares, solos terrestres, meteoritos, vegetação, neve e gelo. A primeira versão da biblioteca, a versão 1.2 foi lançada em julho de 1998, tendo posteriormente sido atualizada a parte JPL da biblioteca espectral e o número da versão aumentou para a Versão 2 (Baldrige *et al.*, 2009).

No caso das oscilações da superfície terrestre o ASTER foi utilizado com o propósito de desenvolver ferramentas capazes de auxiliar na estimativa da LST, especialmente no índice de vegetação normalizada (NDVI) e na emissividade de superfície ( $E_m$ ). Um caso de estudo relacionado com estes fatores, foi um método desenvolvido por Jimenez-Munoz & Sobrino (2007) em que foi utilizado um algoritmo designado *Split-Window* (SW) para fazer a estimativa da LST das imagens ASTER, onde as emissividades podem ser calculadas a partir do NDVI (Jimenez-Munoz *et al.*, 2006).

Relativamente ao índice de vegetação normalizada para uma determinada imagem do sensor ASTER este é calculado utilizando as bandas 2 e 3N. O procedimento de correção atmosférica deve ser feito antes do cálculo NDVI devido ao facto de os efeitos atmosféricos contaminarem os sinais NDVI (Song *et al.* 2001). Por conseguinte, as imagens ASTER são corrigidas atmosféricamente utilizando o método de correção atmosférica baseado em imagens desenvolvido por Chavez (1996) antes do cálculo de NDVI.

Jimenez-Munoz *et al.*, (2006) afirmam que a emissividade é um fator de proporcionalidade, que mede a radiância do corpo negro, através da lei de Planck, de modo

a estimar a radiância emitida e, por conseguinte, a emissividade deve ser obtida previamente para recuperar a LST, de forma precisa. Ao longo dos anos, foram propostas várias abordagens para estimar a emissividade da superfície terrestre (Van de Griend & Owe 1993; Valor & Caselles 1996; Sobrino & Raissouni 2000; Jimenez-Munoz *et al.*, 2006). Neste estudo, foi adotada uma abordagem de estimativa da emissividade da superfície terrestre utilizando valores de NDVI, uma vez que este método foi testado por comparação com medições *in situ*. Os resultados indicaram que este método apresentou um erro médio quadrático (RMSE) inferiores a 0,005 sobre áreas cobertas com vegetação (Jimenez-Munoz *et al.*, 2006).

Tabela 2. Descrição de todas as bandas do sensor ASTER. (Adaptado de Abrams & Hook, 2002).

Instrumentos	Bandas Espetrais	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolução Espacial (m)
VNIR	1	0.52-0.60	15
	2	0.63-0.69	
	3N	0.78-0.86	
	3B	0.78-0.86	
SWIR	4	1.60-1.70	30
	5	2.145-2.185	
	6	2.185-2.225	
	7	2.235-2.285	
	8	2.295-2.365	
	9	2.360-2.430	
TIR	10	8.125-8.475	90
	11	8.475-8.825	
	12	8.925-9.275	
	13	10.25-10.95	
	14	10.95-11.65	

---

## 3. Plataformas de Programação Aplicadas

---

### 3.1. *Radiative Transfer for TOVS*

O *Radiative Transfer for TOVS* (RTTOV) é um modelo de transferência radiativa rápida com o propósito de simular radiações no topo da atmosfera medidas a partir de satélites no campo do infravermelho e micro-ondas. Isto torna-o uma ferramenta útil para o desenvolvimento de estimativas físicas provenientes de radiações de satélite, para a simulação de futuros instrumentos, e para o treino ou ensino com uma interface gráfica de utilizador (Saunders *et al.*, 2018).

Nas últimas 2 décadas, os modelos de transferência radiativa rápida tornaram-se uma ferramenta essencial em diversas aplicações, entre elas a assimilação de dados em modelos estatísticos de previsão meteorológica (Eyre *et al.*, 1993), permitindo determinar estimativas físicas de dados de satélite (Li *et al.*, 2000) e produzindo simulações de imagens a partir de modelos estatísticos de previsão do tempo (Blackmore *et al.*, 2014; Lupu e Wilhelmsson, 2016).

O modelo RTTOV foi desenvolvido para permitir a assimilação direta de radiações durante os anos 90 no Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF). O desenvolvimento do RTTOV foi posteriormente assumido no âmbito de um projeto designado *Satellite Application Facility on Numerical Weather Prediction* (NWP SAF), financiado pela EUMETSAT, em 1998. Atualmente existem mais de mil utilizadores em todo o mundo, sendo utilizado em muitos centros de previsão numérica do estado do tempo como parte do seu sistema de assimilação de dados, tanto para previsão meteorológica como para produção de reanálises atmosféricas (Saunders *et al.*, 2018).

Atualmente o RTTOV consegue simular cerca de noventa sensores de satélite diferentes que efetuam medições nas regiões do espectro de ondas micro-ondas, infravermelhos e visíveis. Alguns destes instrumentos voaram na década de 1970, e agora o RTTOV permite que as suas radiações sejam assimiladas em reanálises atmosféricas históricas explorando estes dados com métodos modernos de assimilação de dados (Poli *et al.*, 2017). O RTTOV também pode ser usado em simulações de modelos climáticos para

fornecer radiações do topo da atmosfera de modo a avaliar esses modelos, como demonstrado por Turner e Tett (2014).

### 3.2. *Google Earth Engine*

Os sistemas informáticos de alto desempenho estão a tornar-se cada vez mais abundantes (Cossu *et al.*, 2010) e os sistemas informáticos baseados em *cloud computing* cada vez mais acessíveis. Ao mesmo tempo, os arquivos de dados de deteção remota (DR) tornaram-se livremente disponíveis através de várias agências governamentais incluindo a NASA, o U.S. *Geological Survey*, a Agência Espacial Europeia, entre outras.

Contudo, o aproveitamento total destes recursos requer conhecimentos técnicos, entre eles a aquisição e armazenamento de dados e a utilização de inúmeras estruturas de processamento de dados geoespaciais. Estas técnicas podem colocar estas ferramentas fora do alcance de muitos investigadores, restringindo o acesso à informação contida em vários conjuntos de dados de DR de grande dimensão (Gorelick *et al.*, 2017).

O *Google Earth Engine* (GEE) é uma plataforma que recorre aos sistemas de informática baseados em *cloud computing* para fornecer competências analíticas no domínio geoespacial, à escala global (Patel *et al.*, 2015). Esta plataforma reúne capacidades informáticas por parte da Google para tratar de uma variedade de questões ambientais, incluindo desflorestação, seca, catástrofe, gestão dos recursos hídricos, monitorização climática e proteção ambiental (Gorelick *et al.*, 2017).

Uma vantagem na sua utilização é o facto de facilitar o acesso a recursos informáticos de alto desempenho permitindo o processamento de grandes conjuntos de dados. Além disso, este sistema foi também concebido para ajudar os investigadores a divulgar facilmente os seus resultados. Uma vez desenvolvido um algoritmo, os utilizadores podem criar produtos sistemáticos de dados ou implementar aplicações interativas (Gorelick *et al.*, 2017).

O GEE é acedido através da Internet e controlado a partir de uma interface de programação de aplicações (API), dando posteriormente origem a um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), o que permite uma rápida elaboração de projetos e visualização dos resultados obtidos. Na Figura 8 é possível observar a interface do utilizador mencionando de seguida alguns aspetos importantes desta interface, de modo a compreender melhor esta plataforma.

Análise de dados térmicos de deteção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos

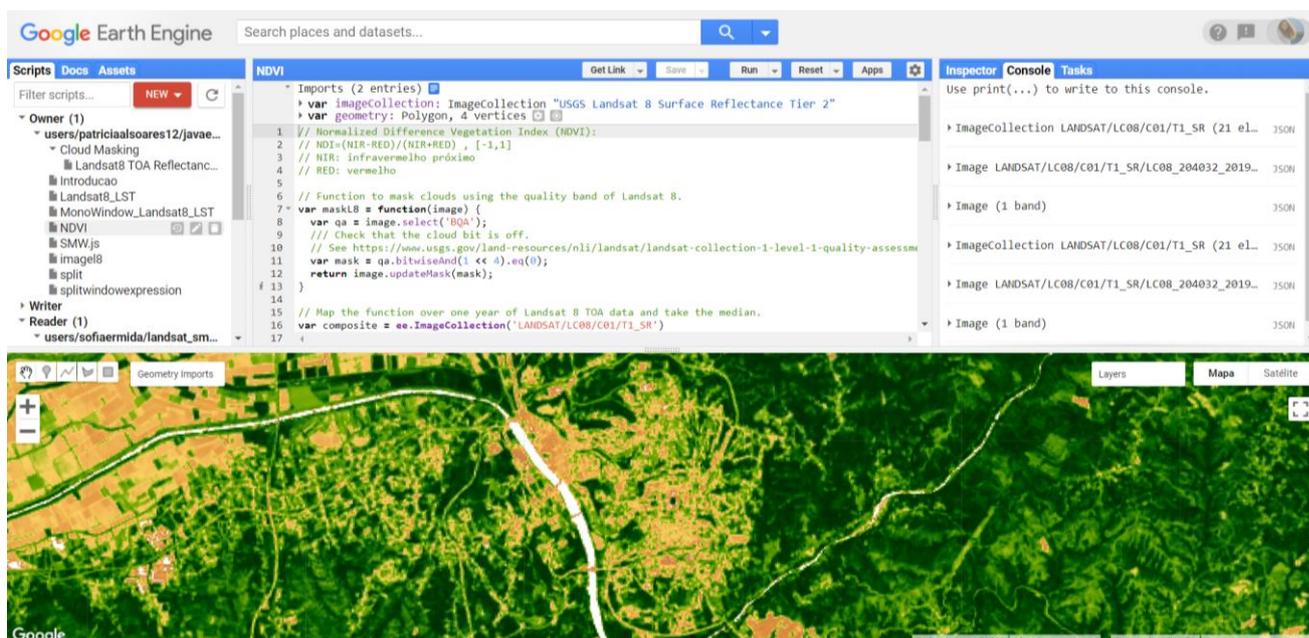
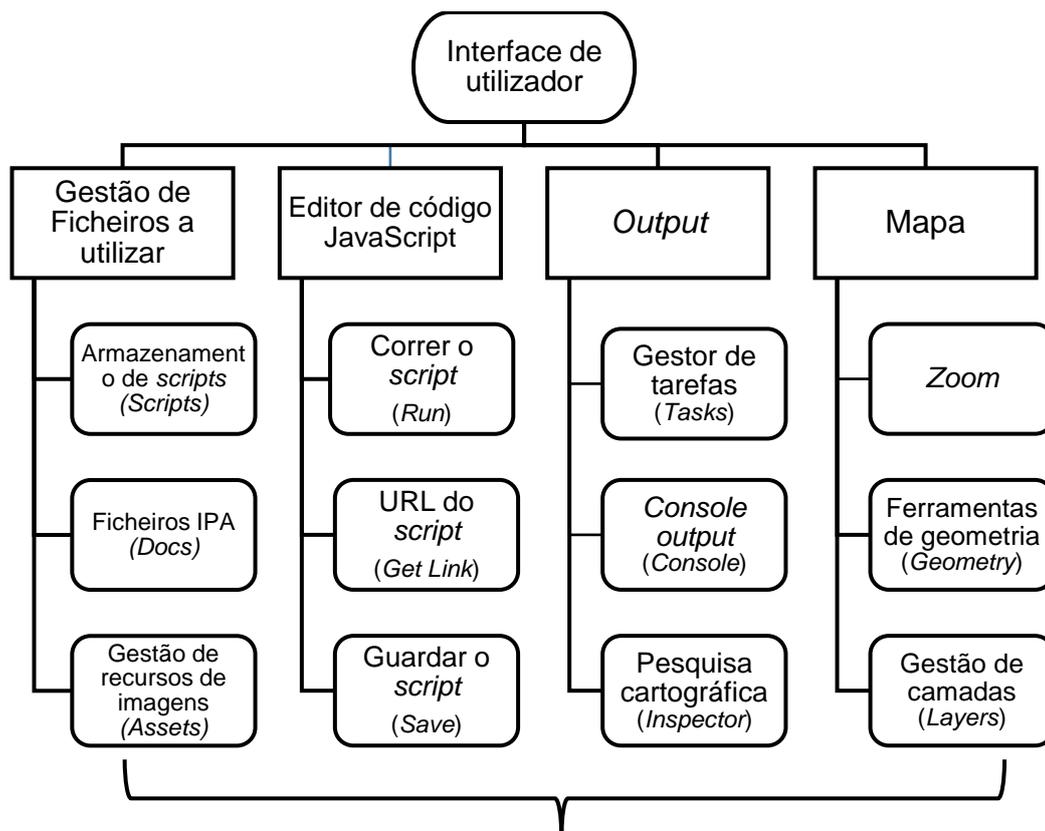


Figura 8. Interface do utilizador da plataforma Google Earth Engine.

O conjunto de dados disponíveis do GEE é uma coleção de elementos geoespaciais constituído por imagens de DR, incluindo todo o arquivo Landsat, bem como arquivos completos de dados de Sentinel-1 e Sentinel-2. Também inclui previsões climáticas, dados de ocupação do solo e muitos outros conjuntos de dados ambientais, geofísicos e urbanos. (Tabela 3). O catálogo é atualizado com quase 6000 cenas por dia de missões ativas, e um intervalo de tempo de 24 horas a partir do tempo de aquisição da cena. Os utilizadores podem solicitar a adição de novos conjuntos de dados para o catálogo, ou podem carregar os seus próprios conjuntos de dados privados dados (Gorelick *et al.*, 2017).

Esta plataforma utiliza um modelo de dados simples e generalizado baseado em bandas rasterizadas. Os pixéis inseridos numa banda individual devem ser homogéneos quanto ao tipo de dados, resolução e projeção. No entanto, as imagens podem conter qualquer número de bandas e essas bandas quando inseridas numa determinada imagem não precisam de ter tipos de dados ou projeções uniformes. Cada imagem pode conter informações relativamente à localização, tempo de aquisição, e as condições sobre a qual a imagem foi recolhida ou processada (Gorelick *et al.*, 2017).

Todas as imagens produzidas por um único sensor, são definidas como uma "coleção". As coleções proporcionam capacidades de filtragem e classificação rápidas facilitando a sua pesquisa. Por exemplo, um utilizador pode escolher determinadas imagens do sensor Landsat 8 (LS8) que cobrem uma parte da cidade do Porto, recolhidas no dia do ano 80 a 104, dos anos 2015 a 2017, com menos de 80% de cobertura de nuvens (Gorelick *et al.*, 2017).

Devido ao facto de ser uma plataforma de DR, o GEE tem a capacidade de analisar dados à escala global rapidamente, permitindo que seja uma ferramenta valiosa para o estudo do crescimento das zonas urbanas (Patel *et al.*, 2015).

*Análise de dados térmicos de detecção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos*

Tabela 3. Descrição de uma pequena parte dos satélites e sensores inseridos na plataforma Google Earth Engine.

<b>DATASET</b>	<b>RESOLUÇÃO ESPACIAL</b>	<b>RESOLUÇÃO TEMPORAL</b>	<b>COBERTURA TEMPORAL</b>	<b>COBERTURA ESPACIAL</b>
<b>LANDSAT</b>				
LANDSAT 8 OLI/TIRS	30 metros	16 dias	2013 – Ativo	Global
LANDSAT 7 ETM +	30 metros	16 dias	2000 – Ativo	Global
LANDSAT 5 TM	30 metros	16 dias	1984 – 2012	Global
LANDSAT 4-8 – REFLEXÃO DE SUPERFÍCIE	30 metros	16 dias	1984 – Ativo	Global
<b>SENTINEL</b>				
SENTINEL-1A	10 metros	6 dias	2014 – Ativo	Global
SENTINEL-2A E SENTINEL-2B	10/20/60 metros	10 dias com a constelação dos dois satélites	2015 – Ativo	Global
<b>ASTER</b>				
L1T RADIANCE	15/30/90 metros	Uma vez	2000 – Ativo	Global
GED	100 metros	Uma vez	2000 – 2008	Global
<b>METEOROLOGIA E ATMOSFERA</b>				
NCEP REANÁLISE	2,5°	6 horas	1948 – Ativo	Global

---

## 4. Descrição da Área de Estudo

---

### 4.1. Enquadramento Geográfico

A área de estudo analisada é referente à cidade de Coimbra, situada no sector Centro Litoral de Portugal, com uma latitude de 40°12' norte e uma longitude de 8° 25' oeste, aproximadamente (Figura 9). Esta cidade é sede de município e está subdividida em 31 freguesias com 319,4 Km<sup>2</sup> de área e 143 396 habitantes segundo o Instituto Nacional de Estatística, com base nos Censos realizados em 2011. Cerca de 57% dos habitantes apresentam idades entre os 24 e 65 anos, estando logo a seguir representados os habitantes com mais de 65 anos de idade, ocupando cerca de 20% da população. A densidade populacional é de 449 habitantes por Km<sup>2</sup>.

A região de estudo encontra-se delimitada a norte pelo município da Mealhada, a sul pela vila de Condeixa-a-Nova, a oeste por Montemor-o-Velho e a Este por Miranda do Corvo e Vila Nova de Poiares.

A cidade de Coimbra apresenta um clima mediterrânico de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger. No Inverno as temperaturas variam entre 15°C diurnos e 5°C noturnos, enquanto que no Verão as temperaturas oscilam entre os 29°C diurnos e 16°C noturnos.

Segundo Cunha e Dimuccio (2002), a posição geográfica de Coimbra favorece a existência de diversos tipos de solos, bem como uma morfologia contrastada com declives acentuados associados ao confronto entre as planícies do litoral com as serras e planaltos, como é possível observar nas Figuras 10 e 11. Essa posição geográfica é influenciada na ocorrência de chuvas quando os ventos sopram de Oeste e Noroeste.

Este município apresenta uma localização geográfica que resulta da sua inserção de duas unidades estruturais, o Maciço Hespérico e a Orla Meso Cenozoica ocidental, que por sua vez apresentam morfologias particulares e atravessam o rio Mondego e alguns dos seus afluentes.

Análise de dados térmicos de deteção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos

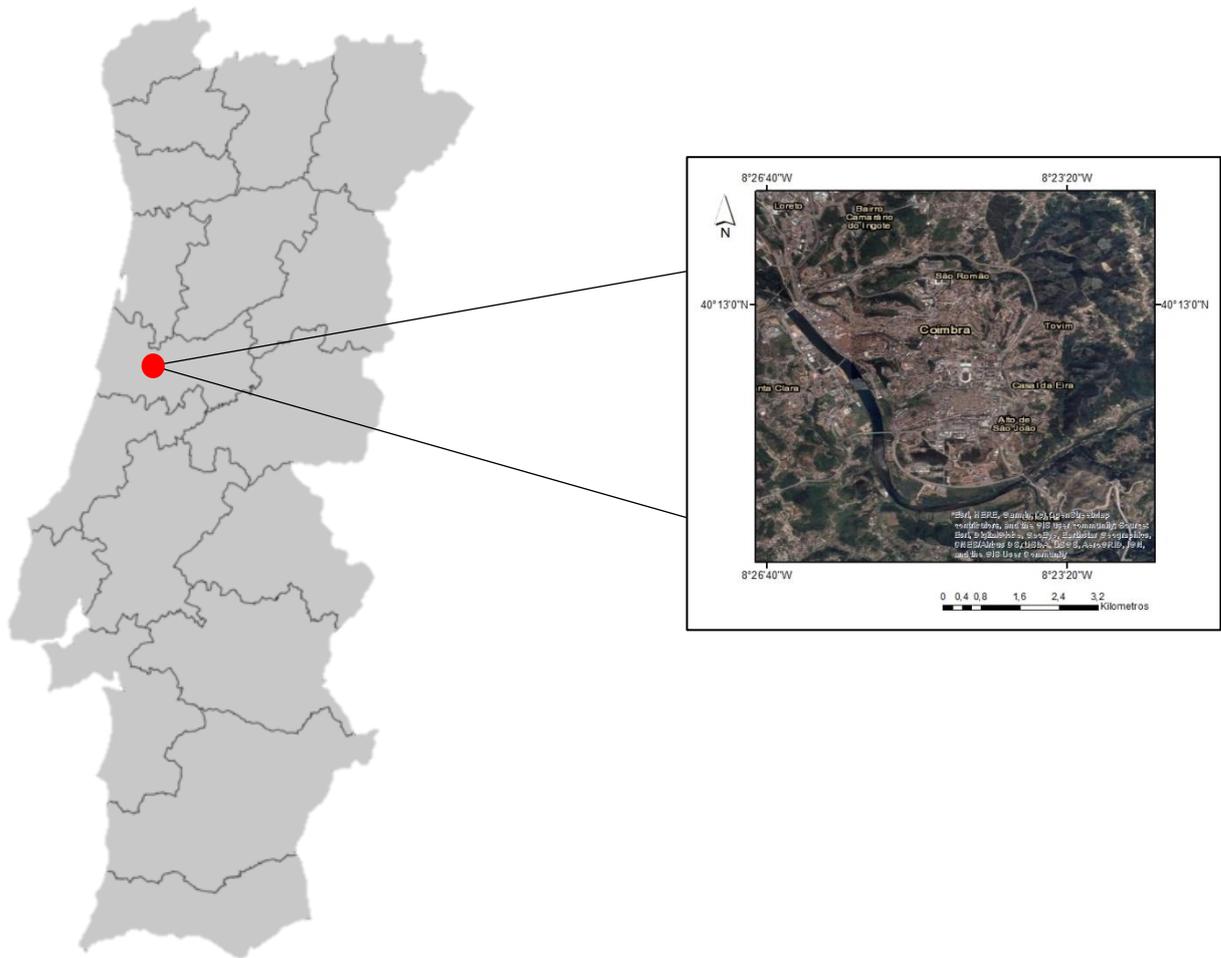


Figura 9. Representação geográfica da área de estudo.

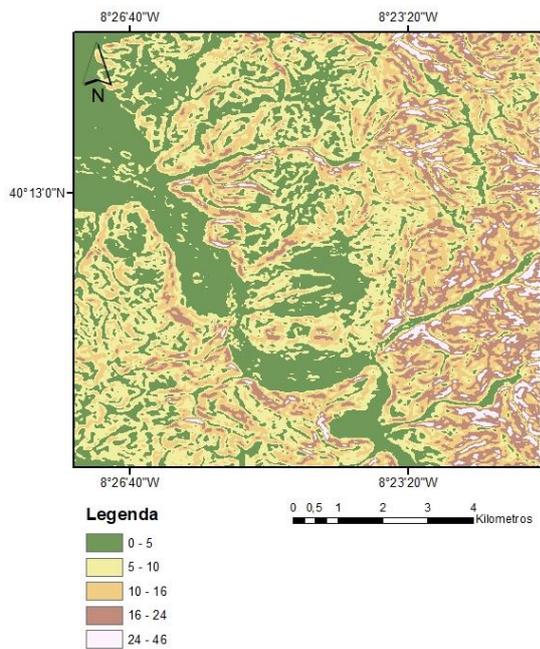


Figura 10. MDT da área de estudo.

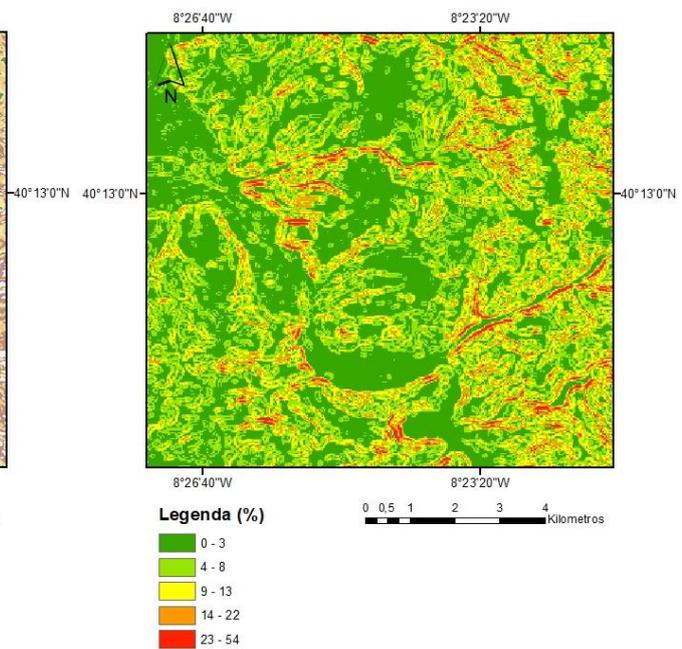


Figura 11. Mapa do declive da área de estudo.

## 4.2. Geologia e Morfologia

Relativamente à geologia, Coimbra encontra-se inserida na Bacia Lusitânica. Esta bacia sedimentar desenvolveu-se na Margem Ocidental Ibérica (MOI) durante a Era Mesozoica, estando a sua dinâmica enquadrada da fragmentação da Pangeia, mais especificamente da abertura do Atlântico Norte. Caracteriza-se por ser uma bacia distensivo, pertencente a uma margem continental do tipo atlântico com rift não vulcânico (Kullberg *et al.*, 2013). Os sedimentos da Bacia depositaram-se principalmente sobre as unidades da Zona de Ossa Morena (ZOM), pertencentes ao Maciço Hespérico (Dias & Ribeiro, 1995; Ribeiro *et al.*, 1979).

O município de Coimbra está inserido num contexto geológico e geomorfológico muito peculiar (Figura 12), visto que se encontra inserido no contacto de duas grandes unidades sedimentares, a Orla Meso Cenozoica Ocidental, representada por cerca de 5000 m de sedimentos, e as unidades metassedimentares do Maciço Hespérico (A. Soares & Gomes, 1997; Soares *et al.*, 1985), como foi referido anteriormente. O Maciço Hespérico está inserido na parte leste de Coimbra e é constituído maioritariamente por xistos e meta grauvaques do Câmbrico e pré-Câmbrico. A área urbana de Coimbra, e todos os setores que se encontram a ocidente, possuem um substrato Meso-Cenozoico, composto por materiais conglomeráticos, como é o caso do Grés de Silves, margas, calcários e dolomites. Morfologicamente, é bem evidente um contraste com o setor do Maciço Hespérico, predominando aqui relevos menos elevados, com topos aplanados e vertentes com pouco declive.

Esta análise, confere a presença de um relevo diversificado quer na cidade, quer na sua envolvente periurbana, integrando áreas com declives reduzidos e vertentes com algum significado topográfico. O relevo mais ondulado com cumeadas mais aplanadas potenciou, ao longo do tempo uma forte urbanização (Fialho *et al.*, 2010).

Tendo em conta a geomorfologia presente na cidade de Coimbra é de destacar os movimentos de instabilidade em vertentes e taludes, os processos de erosão hídrica, alguns movimentos de subsidência e colapso de fundamentação cársica, e episódios de cheias e inundações, na dependência do rio Mondego e dos seus afluentes (Tavares & Cunha, 2008).

Análise de dados térmicos de deteção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos

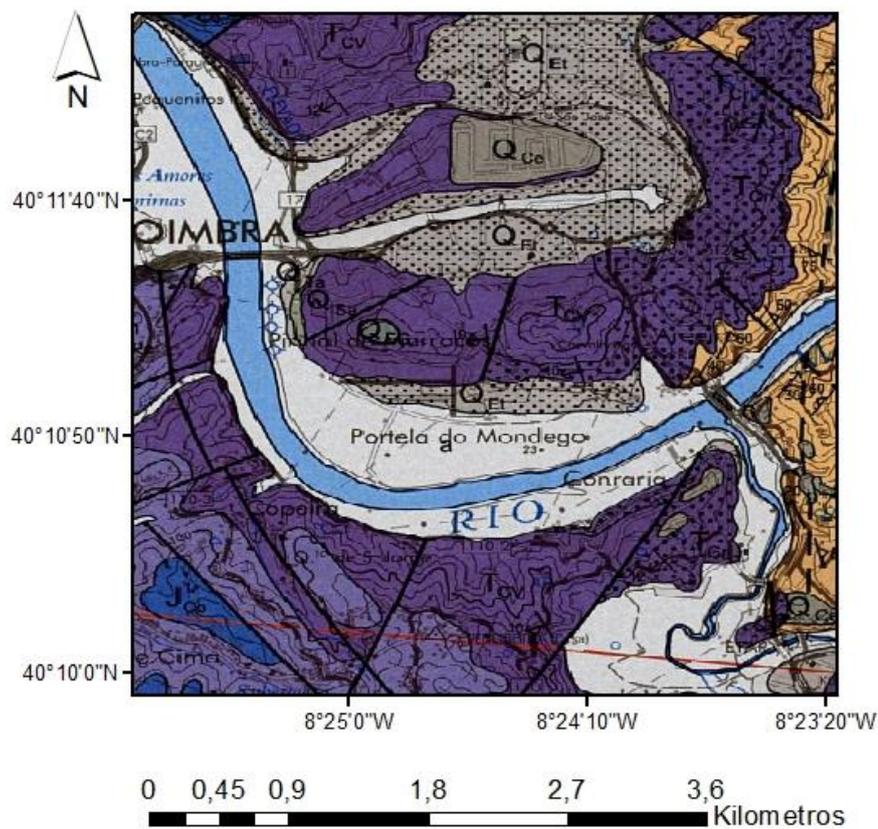


Figura 12. Mapa geológico de Coimbra. Carta Geológica 19-D (Coimbra-Lousã) à escala 1:50.000 (Soares *et al.*, 2005).

### 4.3. Ocupação do Solo e Análise Urbanística

A ocupação do solo no município de Coimbra apresenta algumas discrepâncias, nomeadamente em relação à ocupação artificializada da região. Com o passar dos anos verificaram-se alterações profundas no domínio da urbanização, através de processos de peri e rurbanização, com o crescimento de infraestruturas na cidade, com a alteração das atividades industriais, comerciais e agroflorestais e com a construção de novos equipamentos (Tavares & Cunha, 2004).

O processo de periurbanização surge para descrever algumas mudanças estruturais em determinados locais dentro do espaço urbano de uma determinada região. Segundo Allen (2003), a interface periurbana constitui um fenómeno geralmente caracterizado ou pela perda de aspetos 'rurais' (perda de solo fértil, terrenos agrícolas, paisagem natural, etc.) ou pela falta de atributos 'urbanos' (baixa densidade, falta de acessibilidade, falta de serviços e infraestruturas, etc.). Assim sendo, o termo periurbanização refere-se à expansão da mancha urbana em direção às periferias da região em estudo (Ojima & Hogan, 2008).

Por outro lado, o processo rurbanização diz respeito a formas de alojamento que tendem a recriar o modelo rural tradicional e que se desenvolvem na periferia das cidades e de outros aglomerados urbanos. É um processo que resulta do crescimento urbano, onde coexistem de diferentes formas as atividades económicas urbanas e as atividades agrícolas.

Atualmente verificou-se um crescimento exponencial das áreas urbanas passando de 47 Km<sup>2</sup> para 95 Km<sup>2</sup>, com o aumento da ocupação em encosta, bem como, a alteração da ocupação florestal.

Nos dias de hoje, mais de metade da população mundial habita em áreas urbanas (ONU, 2014), sendo que na Europa, este número é ainda mais elevado, com 80% da população a viver em cidades (EEA, 2006). Um crescimento semelhante foi observado em Portugal nas últimas décadas, onde a população urbana atingiu 42% da população total (INE, 2014).

Relativamente à cidade de Coimbra, verifica-se uma elevada taxa de ocupação urbana, dividida em áreas urbanas exteriores e áreas com características rurais. Nas últimas décadas, a urbanização ocupou um lugar de destaque, onde através de uma análise comparativa de Tavares (2004) é possível afirmar que face a décadas passadas a área urbana municipal duplicou, passando de 42 Km<sup>2</sup> para 95 Km<sup>2</sup>, estando este facto correlacionado com os processos de periurbanização e de urbanização.

O crescimento urbano nem sempre é acompanhada pelo desenvolvimento de políticas de planeamento urbano eficientes (Marinoni *et al.*, 2013). Assim sendo, é urgente desenvolver indicadores ambientais que possam ser utilizados de modo a monitorizar os ecossistemas

urbanos à escala regional e global (Tiner, 2004). A relação entre o Homem e o ambiente exige novas perspetivas (Turner *et al.*, 2007), para fomentar o desenvolvimento de políticas de gestão originais centradas na sustentabilidade, ao mesmo tempo que acomoda o crescimento da população (Marques *et al.*, 2009).

As dinâmicas de *Land Use and Land Cover* (LULC) traduzem um conceito de mudança, que pode ser monitorizada para avaliar o impacto sobre a saúde dos ecossistemas terrestres e aquáticos, o clima, e o território (Loveland *et al.*, 2002; Grove and Burch Jr., 1997). Contudo, tal monitorização não é isenta de desafios, uma vez que o espaço urbano e periurbano é complexo e altamente heterogéneo (Xian, 2007; Xian, 2008; Bauer *et al.*, 2008; Andrieu e Chocat, 2004). Esta complexidade leva a uma realidade multidimensional, com impactos diretos e indiretos sobre múltiplas variáveis bióticas e abióticas (Mantas *et al.*, 2016).

Contudo, o impacto da urbanização está diretamente ligado a uma diminuição da distribuição da vegetação em ambientes naturais. Por sua vez, o ambiente urbano influencia as condições térmicas, originando as ilhas de calor urbano (ICU) (Yuan e Bauer, 2007; Xian, 2008b) mesmo nas cidades em recessão (Emmanuel e Krüger, 2012). Estas ilhas consistem no aumento da temperatura da superfície, evidenciado nas áreas urbanas e que está fortemente ligada ao tipo de desenvolvimento e materiais utilizados (Stathopoulou e Cartalis, 2007). Isto é o resultado de uma acumulação de uma quantidade significativa de energia térmica, que pode, por sua vez, gerar uma "resposta de escoamento térmico" (Kim *et al.*, 2008).

Curiosamente, e apesar do aumento da população urbana global, vastas extensões da Europa e América do Norte estão sujeitas a fenómenos de redução generalizada (Panagopoulos e Barreira, 2013). No caso de Portugal, até 2060, prevê-se que a população diminua para 8,6 milhões (INE, 2014). Paralelamente, e mesmo antes do declínio da população do país, as mudanças ao nível das cidades levaram à deslocalização dos habitantes para as periferias da cidade. Os municípios portugueses tendem a reagir ao declínio através do investimento, especialmente quando o declínio está associado à população jovem (Panagopoulos e Barreira, 2013), o que significa que a urbanização pode não diminuir ao nível da população, mas sim acelerar. Por sua vez, isto significa que a longo prazo, em Portugal e noutros locais, as infraestruturas terão de ser apoiadas por uma população mais reduzida. Este é, portanto, um momento de particular importância na Europa, onde o desenvolvimento de estratégias de monitorização integradas dedicadas aos terrenos desenvolvidos assume um papel central.

Face ao cenário cada vez mais complexo, as cidades e comunidades estão a lutar para melhorar os padrões ambientais através do estabelecimento de objetivos de sustentabilidade urbana (Duh *et al.*, 2008). A informação, nomeadamente sobre as superfícies impermeáveis que caracterizam os ambientes urbanos, torna-se central para o desenvolvimento de tais estratégias de planeamento e mitigação (Bauer *et al.*, 2008; Young *et al.*, 2013). Este contexto de extremos está a motivar uma maior sensibilização para o facto de que os utilizadores de dados necessitem de produtos de cobertura do solo capazes de oferecer uma representação precisa do ambiente urbano (Xian e Homer, 2010). A utilização generalizada das tecnologias de DR e SIG abriu um novo capítulo na caracterização das tendências de cobertura do solo, planeamento da bacia hidrográfica, e modelação (Tiner, 2004; Brabec *et al.*, 2002).

---

## 5. Metodologia

---

Neste capítulo são descritos todos os processos metodológicos que conduziram à realização desta dissertação. Para isso encontra-se representado de seguida todas as etapas executadas, de uma forma resumida.

A Figura 13 ilustra a metodologia utilizada para a produção do processamento de imagens da temperatura de superfície (LST) através do satélite *Landsat 8* (LS8). A primeira etapa passa por selecionar o intervalo de tempo pretendido e a região de estudo, e posteriormente o desenvolvimento do índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI) com o objetivo de aplicar a correção baseada a este índice relativamente à emissividade. Com base nesta informação, a determinação das temperaturas de superfície através do LS8 é feita com as respetivas coleções de temperaturas de brilho (Tb) no topo da atmosfera (TOA) e de refletância de superfície (RS), aplicando uma máscara de nuvens (*cloudmask*) em ambas.

Para cada imagem da Tb TOA, são selecionados dois tempos mais próximos de análise para o vapor de água e interpolados para o tempo de observação do LS8. Os dados da RS são, por sua vez, utilizados para calcular NDVI, que é depois convertido em valores de *Fractional Vegetation Cover* (FVC). Estes valores FVC são então utilizados juntamente com valores de emissividade ASTER previamente calculados para solo descoberto para obter a emissividade do LS8 correspondente. Finalmente, o algoritmo SMW é aplicado à temperatura de brilho no topo da atmosfera referente à banda TIR do LS8. Os coeficientes do algoritmo são mapeados através da coleção de imagens do LS8 com base no vapor de água total da atmosfera (TCWV) e utilizando a metodologia adaptada de Martins et al. 2016. O código que contém os coeficientes estará disponível posteriormente no repositório referido posteriormente.

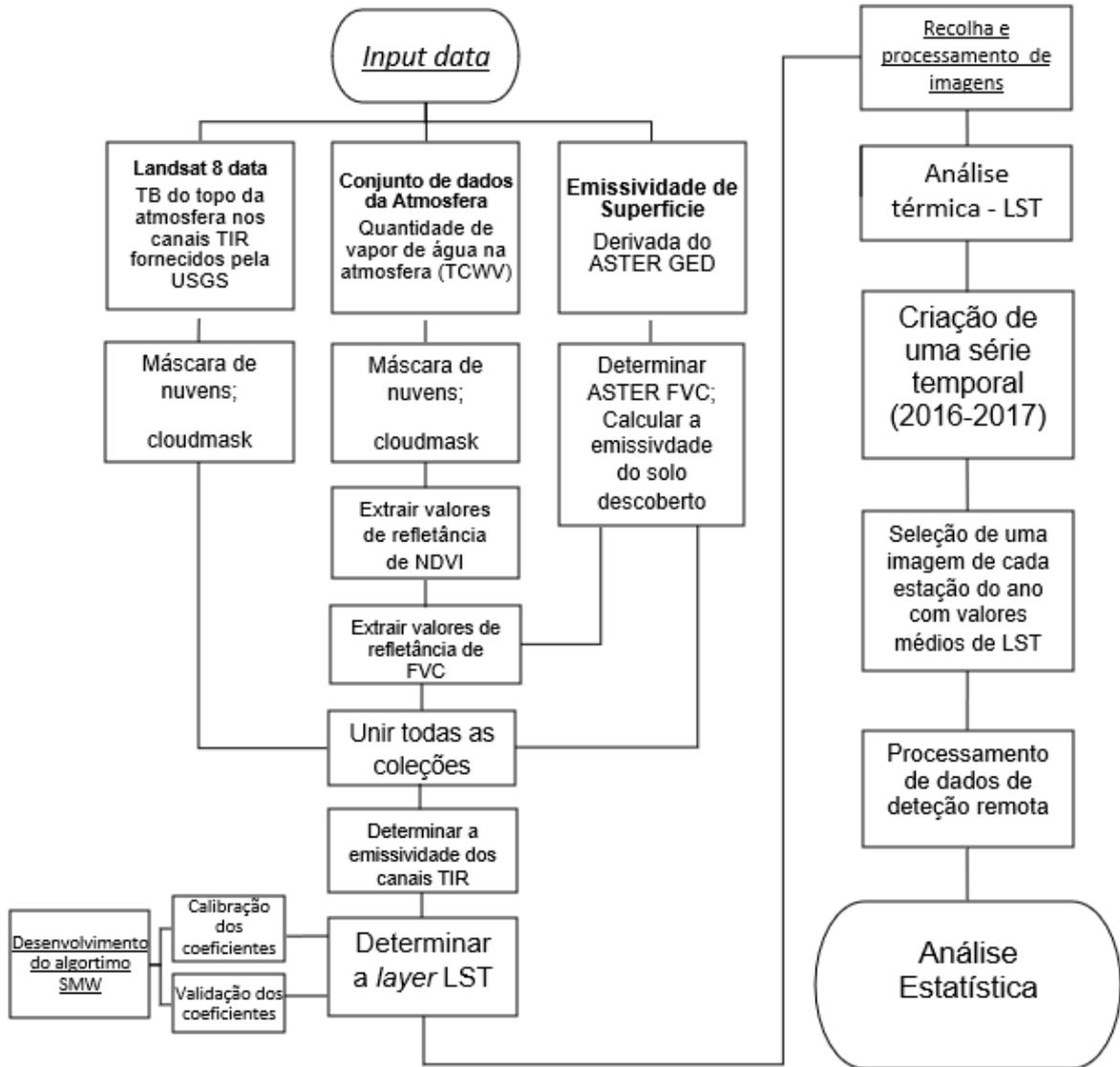


Figura 13. Fluxograma da metodologia utilizada para a produção o processamento de imagens da LST através do satélite Landsat 8.

## **5.1. *Input Data***

O *input data* consiste na entrada de um conjunto de dados para um determinado sistema ou organismo, sendo que esta coleção de dados será processada para posteriormente dar origem a um novo conjunto de informações que saem do sistema, designado *output data*.

O algoritmo SMW aplicado é baseado numa regressão linear entre as quantidades de REM medidas no TOA e a LST, através de dados auxiliares como é o caso da emissividade espectral e da quantidade de TCWV. A quantidade de REM medida no topo da atmosfera é designada por  $T_b$ , que por sua vez diz respeito à radiância que é medida pelo sensor. Se for possível conhecer a emissividade de um corpo e medir o brilho emitido, então determinar-se-á a verdadeira temperatura de superfície do corpo.

Assim sendo, é essencial numa primeira fase analisar este conjunto de dados introduzidos no algoritmo mencionado anteriormente, de modo a compreender as oscilações da superfície da terra.

Consequentemente, procedeu-se à recolha de um conjunto de elementos:

- 5.1.1. *Landsat 8 Dataset*,
- 5.1.2. Conjunto de dados da Atmosfera;
- 5.1.3. Emissividade de Superfície ( $E_m$ ).

### 5.1.1. *Landsat 8 Dataset*

Como já foi referido anteriormente a  $T_b$  diz respeito à radiação micro-ondas que é transmitida no TOA para o satélite, expressa em unidades de temperatura.

Relativamente ao LS8 este é composto por dois sensores, o sensor *Operational Terra Imager* (OLI) que adquire dados na região dos infravermelhos visíveis e de ondas curtas, e o sensor *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) que mede a temperatura da superfície terrestre em duas bandas térmicas, em que desse modo a temperatura de brilho é determinada através desse sensor.

Os sensores TIR do satélite medem as radiações no TOA a partir das quais as temperaturas de brilho (também conhecidas como temperaturas do corpo negro) podem ser obtidas usando a lei de Plank (Dash *et al.*, 2002). As radiações no TOA são o resultado da combinação de três frações de energia: a radiância emitida da superfície da Terra, a radiância que ascende da atmosfera, e a radiância descendente do céu (Weng & Schubring, 2004). A diferença entre as temperaturas TOA e a radiação da superfície terrestre varia geralmente de 1 a 5 K, sujeita à influência das condições atmosféricas (Prata *et al.*, 1995). Portanto, os efeitos atmosféricos, incluindo absorção, emissão ascendente, e irradiação descendente refletida da superfície (Franca & Cracknell, 1994), devem ser corrigidos antes de se obterem as temperaturas de brilho da superfície terrestre. Estas temperaturas devem ser corrigidas com valores de emissividade espectral antes do cálculo para estimar a LST de modo a ter em conta as propriedades de rugosidade da superfície do terreno, a quantidade e natureza da cobertura vegetal, bem como as propriedades térmicas e o teor de humidade do solo (Friedl, 2002).

Na metodologia adotada para o respetivo trabalho, a  $T_b$  para os canais TIR do LS8 foram fornecidas pelo USGS. A USGS deriva os valores retirados do TOA em números digitais orto retificados, utilizando os respetivos coeficientes de calibração (Chander *et al.* 2009). O conjunto de dados da série LS8 são considerados consistentes, e todas as bandas TIR foram novamente ampliadas para uma resolução espacial de 30 metros.

Os dados estão organizados em camadas, com base na sua qualidade. As cenas LS8 com a melhor qualidade de dados disponíveis são inseridas no Nível 1, sendo adequadas para análise de séries temporais, enquanto as restantes são atribuídas ao Nível 2. Os resultados apresentados neste trabalho são inteiramente baseados em dados de Nível 1. Por conseguinte o compósito utilizado designa-se *Landsat Collection 1 Level-1 Quality Assessment Band* e fornece uma descrição da qualidade dos pixels, possibilitando também que os dados temporários sejam processados imediatamente após serem descarregados de forma a serem utilizados rapidamente. A este conjunto de imagens foi atribuída uma função

para mascarar as nuvens – *cloudmask* - usando a banda de controlo de qualidade, *QA-Quality Assessment Band*, como referida anteriormente. Esta banda indica quais são os píxeis que podem ser afetados pelas condições da superfície, contaminação das nuvens ou condições do sensor. Por exemplo, se o índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI) for calculado sobre píxeis que contenham nuvens irá mostrar valores incorretos. Os valores dos píxeis da banda de controle de qualidade de Nível 1 devem ser convertidos para a forma binária de 16 bits de maneira a ser utilizados de forma eficiente.

### 5.1.2. Conjunto de dados da Atmosfera

Numa segunda fase, foi necessário recorrer a um conjunto de dados atmosféricos, mais precisamente o vapor de água, essencial para contabilizar melhor as contribuições atmosféricas nas observações dos canais TIR.

Os valores do TCWV são fornecidos pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), e encontram-se disponíveis na plataforma *Google Earth Engine* (GEE). Atualmente, a reanálise NCEP/NCAR é o único conjunto de dados globais de TCWV que cobre todo o período de operações da série LS8.

O NCEP/NCAR estão a cooperar num projeto designado por “reanálise” que consiste na produção de análises globais dos campos atmosféricos, de modo a apoiar as necessidades das comunidades de investigação e monitorização climática. Este projeto envolve entre outros elementos a estimativa de dados de superfície terrestre e o controlo de qualidade e consolidação dos mesmos com um sistema de assimilação de dados que se mantém inalterado durante o período de reanálise. Isto elimina desvios climáticos associados a mudanças no sistema de assimilação de dados (Kalnay *et al.*, 1996).

Os dados do TCWV estão disponíveis globalmente desde 1948 até hoje, com uma resolução temporal de seis horas e resolução espacial de 2,5 graus. Os dados TCWV das duas análises mais próximas (disponíveis às 00, 06, 12 e 18 UTC) são interpolados linearmente para cada tempo de aquisição de imagem LS8.

### 5.1.3. Emissividade de Superfície

O algoritmo desenvolvido para determinar a LST requer valores predefinidos da  $Em$ , tendo esse parâmetro sido determinado a partir do conjunto de dados designado *ASTER Global Emissivity Dataset (ASTER GEDv3)* desenvolvido pelo *Jet Propulsion Laboratory (JPL)*. O JPL é um centro tecnológico criado pela NASA, que através do sensor ASTER criou um mapa de emissividade mais detalhado da Terra, ASTER GEDv3. Este conjunto de dados inclui a emissividade para as cinco bandas do sensor ASTER na região TIR e é determinado através de um algoritmo designado *Temperature-Emissivity Separation (TES)*, sendo que todas as cenas incluem técnicas de ocultação de nuvens. Na Tabela 4 é possível observar as principais características da  $Em$ .

Tabela 4. Descrição caracterizada da  $Em$ .

<i>Em</i>	
Precisão	± 0,01
Resolução Espacial	100*100 m <sup>2</sup>
Resolução Temporal	2000 até 2018

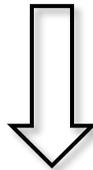
Para determinar a  $Em$  as bandas espectrais no ASTER GEDv3 precisam primeiro de ser ajustadas espectralmente para a banda 10 (10.5-11.5  $\mu\text{m}$ ) do LS8. Este procedimento é feito usando os coeficientes fornecidos por Malakar et al. 2018, em que foi realizado um ajuste espectral utilizando os valores de emissividade das bandas 13 (10.6  $\mu\text{m}$ ) e 14 (11.3  $\mu\text{m}$ ) do radiômetro ASTER, em que:

$$\epsilon_{10.5-11.5} = c_{13}\epsilon_{13} + c_{14}\epsilon_{14} + c \quad (6)$$

Os coeficientes de regressão  $c_{13}$  e  $c_{14}$  em são obtidos usando um conjunto de dados de rochas, solos, vegetação, água e espectros de emissividade do gelo a partir da biblioteca espectral do ASTER, da biblioteca espectral do MODIS, e amostras de areia de 10 locais dunares para validar o ASTER GED. Assim sendo:  $c_{13} = 0,6820$ ;  $c_{14} = 0,2578$ ;  $c = 0,0584$ .

O conjunto de dados do ASTER GEDv3 corresponde à média de todas as estimativas realizadas durante um período de oito anos, portanto, as variações de emissividade ao longo do tempo, por exemplo, devido a variações anuais da densidade da vegetação, necessitam de ser contabilizadas. Posteriormente, é aplicado um ajustamento da vegetação usando o NDVI derivado do LS8 e o NDVI médio derivado do ASTER GEDv3. O NDVI é normalmente utilizado para calcular a FVC. Neste caso, é utilizada a relação proposta por Carlson e Ripley (1997):

$$NDVI = \left( \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \right), [-1,1] \quad (7)$$



$$FVC = \left( \frac{NDVI - NDVI_{bare}}{NDVI_{veg} - NDVI_{bare}} \right)^2 \quad (8)$$

Após estudos anteriores,  $NDVI_{bare} = 0,2$  e  $NDVI_{veg} = 0,86$ , e embora alguns estudos utilizem  $NDVI_{veg} = 0,5$ , Jiménez-Muñoz *et al.*, (2009) mostrou que para imagens de alta resolução, os valores entre 0,8 e 0,9 são mais apropriados. Pixels com NDVI abaixo de  $NDVI_{bare}$  são considerados completamente descobertos, enquanto pixels com NDVI acima de  $NDVI_{veg}$  são completamente vegetados.

Os valores de emissividade das áreas com vegetação num determinado período de tempo, podem então ser derivados recorrendo ao método de Cobertura Vegetal, que é definido como:

$$\varepsilon_b = FVC\varepsilon_{b,veg} + (1 - FVC)\varepsilon_{b,bare} \quad (9)$$

A emissividade das superfícies vegetativas mostra tipicamente as variações relativamente pequenas na região TIR e, portanto, este valor é prescrito para  $\varepsilon_{veg} = 0,99$ .

Para cada pixel, a emissividade efetiva para cada banda do LS8 é determinada da seguinte forma:

- Os valores de FVC adquiridos através do ASTER são obtidos a partir do NDVI utilizando a equação (7);
- A emissividade do solo descoberto para cada banda do ASTER é determinada através da emissividade original do ASTER ( $\epsilon_b$ ) e do correspondente FVC, recorrendo à Equação (8), com o valor estabelecido de  $\epsilon_b, \text{veg} = 0,99$ ;
- A emissividade de solo descoberto ( $\epsilon_b, \text{bare}$ ) para cada banda do sensor TIR do LS8 é obtida a partir da emissividade de solo descoberto ASTER usando os coeficientes fornecidos por Malakar et al. 2018;
- Os valores de FVC para a coleção de imagens do LS8 são calculadas a partir dos respetivos valores de NDVI usando a Equação (7);
- Por fim, o método da Cobertura Vegetal – Equação (9) - é usado para obter a emissividade real da superfície para o Landsat.

## 5.2. Algoritmo *Statistical Mono-Window*

A LST é calculada com base no algoritmo SMW desenvolvido e utilizado pela CM-SAF para a obtenção de registos de dados relativos à LST a partir das séries de satélites MFG e MSG. A abordagem baseia-se numa relação empírica entre a  $T_b$  no TOA presentes num único canal TIR e a LST, utilizando uma regressão linear simples. O modelo consiste numa linearização da equação de transferência radiativa que mantém uma dependência explícita da  $\epsilon$ :

$$LST = A_i \frac{T_b}{\epsilon} + B_i \frac{1}{\epsilon} + C_i \quad (10)$$

onde  $T_b$  é a temperatura de brilho inserida no canal TIR, e  $\epsilon$  é a  $\epsilon$ , para o mesmo canal. Os coeficientes do algoritmo ( $A_i$ ,  $B_i$ , e  $C_i$ ) são determinados a partir de regressões lineares de simulações de transferência radiativa realizadas para 10 classes de TCWV ( $I = 1, \dots, 10$ ), variando de 0 a 6 cm em intervalos de 0,6 cm, sendo os valores de TCWV acima de 6 cm atribuídos à última classe. Ao contrário dos algoritmos análogos desenvolvidos pela CM-SAF para MFG e MSG, aqui os coeficientes não são estratificados pelo ângulo de visão do satélite, pois os sensores do LS8 têm um campo de visão (FOV) consideravelmente mais estreito.

O modelo de transferência radiativa utilizado é designado RTTOV (Radiative Transfer for TOVS) versão 12 desenvolvida pela *Numerical Weather Prediction Satellite Application Facility* (NWP-SAF).

Neste caso de estudo, este modelo permite simular radiâncias no topo da atmosfera e perfis de transmissividade atmosférica, no caso de serem conhecidas as temperaturas desses perfis, as concentrações dos gases ativos radiactivamente que constituem a atmosfera seca e as propriedades relacionadas com as nuvens e a superfície do solo. Através destes dados é possível determinar a radiância bem como a temperatura de brilho.

Relativamente ao trabalho que eu desenvolvi com recurso a este modelo, este foi dividido em duas partes. A primeira parte consistiu na criação de um base de dados de calibração e a segunda parte na criação de um base de dados de validação.

### 5.2.1. Calibração do Algoritmo

A criação de uma base de calibração tem como objetivo fazer o ajuste do algoritmo. Uma boa calibração dos coeficientes do modelo só pode ser alcançada se esse conjunto de dados for definido cuidadosamente, cobrindo o intervalo de variações que afetam o problema.

A base de dados de calibração utilizada para obter os coeficientes da Equação (10) foi derivada usando um conjunto de dados referentes à temperatura do ar, vapor de água e perfis de ozono compilados por Borbas et al (2005) (*SeeBor*) e seguindo a metodologia de Martins et al., (2016), de forma a garantir que os coeficientes do modelo sejam capazes de lidar com qualquer combinação de parâmetros. Para isso, é necessário calibrar o modelo para uma área mais ampla de condições atmosféricas e de superfície e garantir uma elevada cobertura geográfica. Esta calibração é feita com a intenção de que os perfis cubram todas as condições possíveis entre a LST e TCWV.

O conjunto de dados retirado de Borbas et al (2005) compreende mais de 15.000 perfis e inclui parâmetros auxiliares, como pressão superficial, emissividade espectral, temperatura da superfície e elevação. De maneira a restringir o número de combinações possíveis para alcançar uma cobertura uniforme das condições superficiais e atmosféricas na posterior calibração do algoritmo, foi selecionado um subconjunto de perfis da seguinte forma:

- Foram definidas classes de LST que vão de 210 K a 280 K a variar em valores de 5 K, e classes de TCWV de 0 a 6 cm, em intervalos de 0,6 cm, sendo que os valores de TCWV acima de 6 cm são atribuídos à última classe.
- Para cada classe LST-TCWV vai ser selecionado na base de dados da *SeeBor*, um perfil céu limpo que obedeça a esses intervalos e tenha uma distância espacial entre perfis superior a 15 graus. O pretendido é selecionar um perfil para cada uma das classes que obedeça a essas condições, garantindo assim uma cobertura geográfica mais extensa.
- Para cada um dos perfis selecionados, as condições de superfície são variadas para garantir que uma ampla faixa de condições seja incluída na base de dados: o LST é definido em relação à temperatura do ar ( $T_{air}$ ), ou seja, a diferença entre LST e  $T_{air}$  ( $LST - T_{air}$ ) varia de -15 K a +15 K em intervalos de 5 K. Os valores de emissividade da superfície variam entre 0,9 e 0,99 em intervalos de 0,01.

Assim sendo, quando multiplicados todos os valores existem 490 condições de superfície associadas.

### 5.3. Recolha e Processamento de Imagens

A terceira fase, consistiu na recolha e no processamento da coleção de imagens relativas à LST.

A presente etapa foi realizada com recurso à plataforma *Google Earth Engine* (GEE) onde o objetivo foi recorrendo ao algoritmo *Statistical Mono-Window* (SMW) desenvolvido anteriormente, bem como aos coeficientes determinados com o auxílio do procedimento de calibração e dos conjuntos de dados apresentados na secção 5.1., criar uma função que me permitisse gerar uma *layer* referente à LST.

Para além da *layer* relacionada com a LST foram também criados um conjunto de módulos que me permitissem ter uma análise mais precisa da região de estudo.

Todos os códigos que permitiram a criação dos módulos descritos anteriormente bem com o código que permitiu gerar a estimativa da LST, na cidade de Coimbra, encontram-se descritos no final da presente dissertação (Anexo I-VIII).

Na Tabela 5 encontra-se representado o conjunto de *dados* da plataforma GEE utilizados para estimar a LST, de modo a ser possível descarregar as imagens e realizar a sua análise.

Tabela 5. Conjunto de dados da plataforma GEE utilizados para estimar a LST.

<i>Dataset</i>	Identificação do <i>dataset</i> utilizado no GEE
Temperatura de brilho da banda 10, referente ao LS8	LANDSAT/LC08/C01/T1_TOA
NCEP/NCAR com resolução temporal de 6 horas do vapor de água total	NCEP_RE/surface_wv
Imagem global do ASTER-1 referente à emissividade entre 2000-2008 da banda 14	NASA/ASTER_GED/AG100_003
Refletância de superfície do LS8	LANDSAT/LC08/C01/T1_SR

## 5.4. Análise Estatística

O último procedimento realizado relativamente à metodologia passou pela análise de quatro imagens referente às quatro estações do ano, entre junho de 2016 e junho de 2017, como referido anteriormente. A cada uma destas imagens foi atribuído um código, através da plataforma GEE de modo a serem calculados os valores medianos de LST para cada banda, em cada pixel, na respetiva cidade de Coimbra:

```
// Compute the median in each band, in each pixel.
```

```
var exImage = LandsatColl.median()
```

Este código para além de ter sido aplicado à temperatura de superfície do solo, a principal condicionante desta dissertação, foi também inserido noutras variáveis, igualmente importantes que permitiram a determinação da LST, como é o caso da Em, TCWV e o NDVI.

Uma vez criado este conjunto de imagens foi necessário fazer a sua exportação de modo a ser possível analisa-las, para isso foi aplicado um código desenvolvido para com essa finalidade, como é possível observar em seguida.

```
// Export an image band to your drive.
```

```
Export.image.toDrive({  
    image: exImage.select('LST'),  
    description: 'LST',  
    scale: 30,  
    region: geometry,  
    fileFormat: 'GeoTIFF',  
});
```

## 6. Resultados

### 6.1. Calibração do Algoritmo

Os coeficientes do algoritmo adquiridos na equação (10) foram obtidos através de um modelo estatístico designado *Ordinary Least Square* (OLS). Esta técnica consiste numa ferramenta matemática que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados com o objetivo de minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados.

A base de dados é subdividida em classes de vapor de água total da atmosfera (TCWV) entre 0 a 6 cm, com intervalos de 0,6 cm, criando assim um total de 10 conjuntos de coeficientes (A, B, C). A Figura 14 mostra os coeficientes obtidos para o algoritmo SMW.

Como geralmente se verifica nos algoritmos de estimativa da LST, a incerteza da estimativa (indicada aqui pela raiz quadrada do erro médio – RMSE) aumenta com o acréscimo do TCWV (Figura 14). Este aumento da incerteza está relacionado com um aumento da contribuição de componentes atmosféricas (radiação emitida pela atmosfera e a atenuação na atmosfera) para a temperatura de brilho no topo da atmosfera observada pelo satélite.

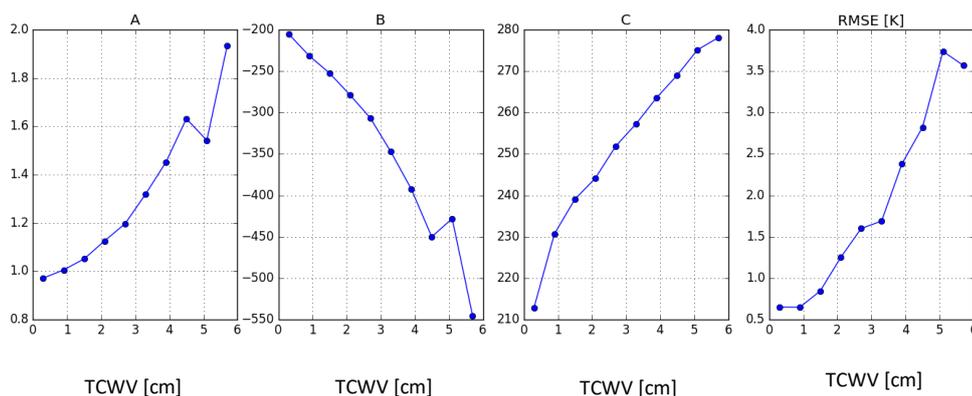


Figura 14. Coeficientes A, B e C do algoritmo SMW (Equação (10)) por cada classe de vapor de água total da coluna (TCWV; cm) para LS8 e respetivo erro médio quadrático (RMSE).

## 6.2. Validação do Algoritmo

A validação é um processo de avaliação independente da incerteza dos dados provenientes dos resultados do sistema. Sem a validação, os algoritmos ou parâmetros derivados de dados de detecção remota (DR) não podem ser utilizados com confiança.

Como os dados da LST estimados a partir de dados de satélite envolvem correções às radiações observadas de modo a contabilizar os efeitos atmosféricos, é necessário avaliar a exatidão dessa estimativa para fornecer informações fiáveis sobre a qualidade do produto e fornecer um *feedback* viável dos algoritmos utilizados para LST (Li *et al.*, 2013).

Na base de dados de validação o objetivo é aplicar o algoritmo e os respetivos coeficientes que foram calibrados na base de dados da calibração para estimar a LST a partir de dados sintéticos e comparar com as LST originais desses mesmos dados.

Para fazer a validação dos coeficientes foram utilizados todos valores disponíveis na base de dados SeeBor, com as condições de superfície iniciais originais. O grande objetivo aqui é ter duas bases de dados independentes, garantindo que não ocorre um sobre ajuste do algoritmo à base de dados de calibração. Por sua vez, nos gráficos relativos à validação é possível observar que a raiz quadrada do erro médio (RMSE) é parecido com o obtido na calibração do algoritmo (Figura 15) e o enviesamento (BIAS) é baixo, indicando que o algoritmo será adequado para obter LST em diferentes condições atmosféricas e de superfície. Por fim, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) diminui com o aumento do vapor de água, o que está também associado à contribuição atmosféricas na  $T_b$ .

O coeficiente de determinação pode tomar valores entre 0 e 1, podendo estar também representado em valores percentuais. Quanto maior o valor de  $R^2$ , mais explicativo é o modelo em estudo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. Neste caso de estudo, este valor não é inferior a 0.92, o que o torna assim num valor favorável.

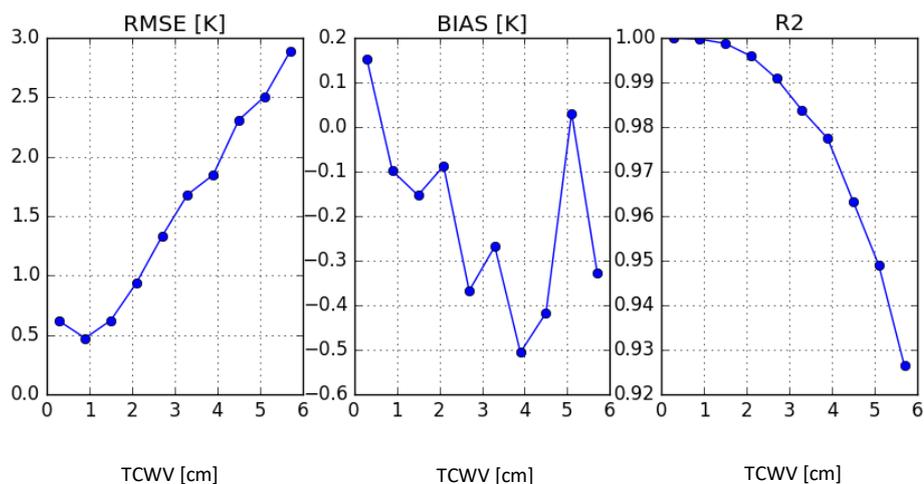


Figura 15. Erros referentes à temperatura de superfície da terra (LST) do LS8 para a base de dados de validação do SMW com dez classes de vapor de água total da coluna (TCWV; cm).

### 6.3. Processamento de Imagens de Satélite

Relativamente ao processamento de imagens de satélite, mais precisamente do Landsat 8 (LS8), o objetivo foi criar um conjunto de imagens geradas a partir do LS8 (Figura 16a), relativas ao *input data* descrito anteriormente de maneira a produzir, em seguida, uma coleção de imagens referentes à LST, nas várias estações do ano, na cidade de Coimbra. As imagens são referentes ao dia 14 de julho de 2016, tendo sido escolhida esta data devido ao facto de não se terem verificado a presença de nuvens, o que possibilita uma análise mais precisa.

O primeiro passo na produção das *layers* referentes à LST passou por relacionar as estimativas da quantidade de TCWV dos dados recolhidos da *National Center for Atmospheric Research* (NCEP) com o tempo de observação do Landsat 8 (LS8). Contudo, devido à resolução do modelo os valores de TCWV são praticamente constantes sobre a área selecionada e, portanto, não foram mostrados.

A Figura 16b) mostra os valores de temperatura do Landsat 8 referentes à temperatura de brilho (Tb) no topo da atmosfera (TOA).

Relativamente à emissividade de superfície (Em) necessária para calcular LST esta é derivada a partir do conjunto de dados do *Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection radiometer and Global Emissivity Dataset* (ASTER GEDv3). Na Figura 16c) encontra-se

representada essa emissividade, tendo sido escolhida a banda 14 do sensor ASTER por ser a banda que melhor se aproxima das bandas TIR do LS8.

Os valores do sensor ASTER referentes ao NDVI foram utilizados para calcular o respectivo FVC que posteriormente, e como descrito no capítulo referente às metodologias é convertido para cada imagem do LS8. O mapa obtido de FVC para Landsat mostra uma maior variabilidade do que para o sensor ASTER, sendo possível observar essa comparação nas Figuras 16e) e 16f), respectivamente. As áreas cultivadas mostram um padrão claro no mapa FVC, e além disso, os campos de arroz na parte mais ocidental do rio tinham valores muito baixos de NDVI tipicamente associados à água e, portanto, foram mascarados. As áreas com baixa densidade de vegetação têm valores próximos de 0,97, enquanto os valores de emissividade das áreas densamente vegetativas atingem valores próximos de 0,99, ambos de acordo com os valores típicos das bibliotecas espectrais (Peres & DaCamara, 2005). Este exemplo enfatiza a importância de utilizar a cobertura vegetal para obter valores de emissividade dinâmicos.

Análise de dados térmicos de deteção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos

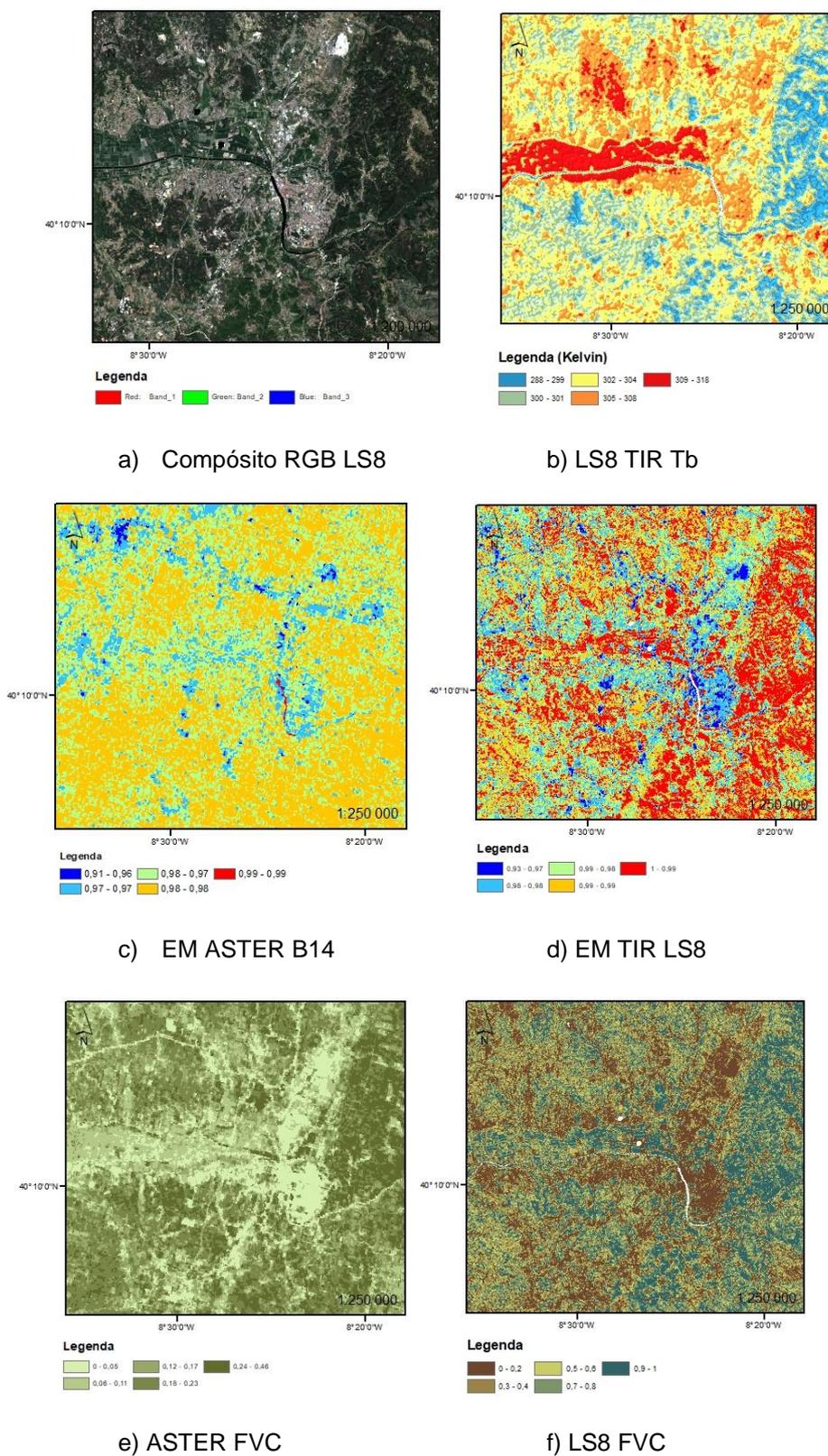


Figura 16. Layers do processo de estimativa da LST para a obtenção de imagens do LS8 em Coimbra, no dia 14 de julho de 2016. (a) Compósito RGB do LS8; (b) Temperatura de brilho da banda 10 do LS8; (c) Emissividade do ASTER da banda 14; (d) Emissividade da banda 10 do LS8 derivada com a equação (9); (e) FVC do ASTER derivado do NDVI usando a Equação (1); (f) FVC do LS8 derivado do NDVI usando a equação (8).

## 6.4. Estimativa da LST

Uma vez gerada a coleção de imagens descritas previamente, foi realizado o último procedimento que consistiu no processamento de um conjunto de *layers* referentes à temperatura de superfície da terra (LST) e criadas a partir dos parâmetros atmosféricos descritos anteriormente, para as quatro estações do ano, na região de Coimbra, aproximadamente 40.1°N e 8.4°W (Figura 17).

Através dos resultados obtidos foi possível correlacionar os dados obtidos nas imagens ilustradas na Figura 17 com as informações obtidas na Figura 18, referentes também aos diferentes tipos de ocupação do solo que se encontram na cidade de Coimbra, de maneira a ser possível analisar as variações térmicas em função da temperatura.

Os estudos relativos às temperaturas urbanas têm tido cada vez mais impacto nas diferenças de temperatura do ar observadas entre as cidades e as áreas rurais adjacentes, conhecidas como ilhas de calor urbanas (ICU) (Landsberg, 1981). Deste modo, são distinguidos dois tipos de ICU, de acordo com OKE (1979): *Urban Canopy Layer* (UCL) e *Urban Boundary Layer* (UBL). A UBL consiste numa camada maior que se situa acima da altura média dos edifícios, ou seja, acima dos elementos de rugosidade e, por sua vez, engloba a UCL. Por outro lado, a UCL situa-se entre esta camada e o solo e as suas variações climáticas são o resultado de trocas entre superfícies e entre a UBL e a UCL, sendo estas interações muito variadas (Mills, 1997).

Como foi referido previamente, a Figura 17 mostra a distribuição dos valores da LST em Coimbra. A temperatura radiante variou entre 265 e 320K, sendo que estes mapas foram produzidos com base nos valores medianos para cada uma das estações do ano. Relativamente à Figura 17a) enquadrada no Verão de 2016 é possível afirmar que o céu está limpo, sem formação de nuvens e analisando os resultados obtidos observa-se uma heterogeneidade das temperaturas por toda a cidade de Coimbra.

Em seguida, encontra-se ilustrado na Figura 17b) a época anual referente ao Outono de 2016 em que já se encontram evidenciados valores mais baixos para o município, onde é possível observar um ligeiro decréscimo da temperatura do Norte até ao Sul. É visível que em pontos isolados, a temperatura atinja valores mais elevados. Na estação referente ao Inverno, evidenciado na Figura 17c), observa-se um padrão de temperaturas quase homogêneo para toda a região, com temperaturas igualmente baixas. Por fim, na Figura 17d) relativa à Primavera do ano 2017 conclui-se também que as vertentes com orientação Oeste são os locais com as temperaturas mais elevadas.

*Análise de dados térmicos de deteção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos*

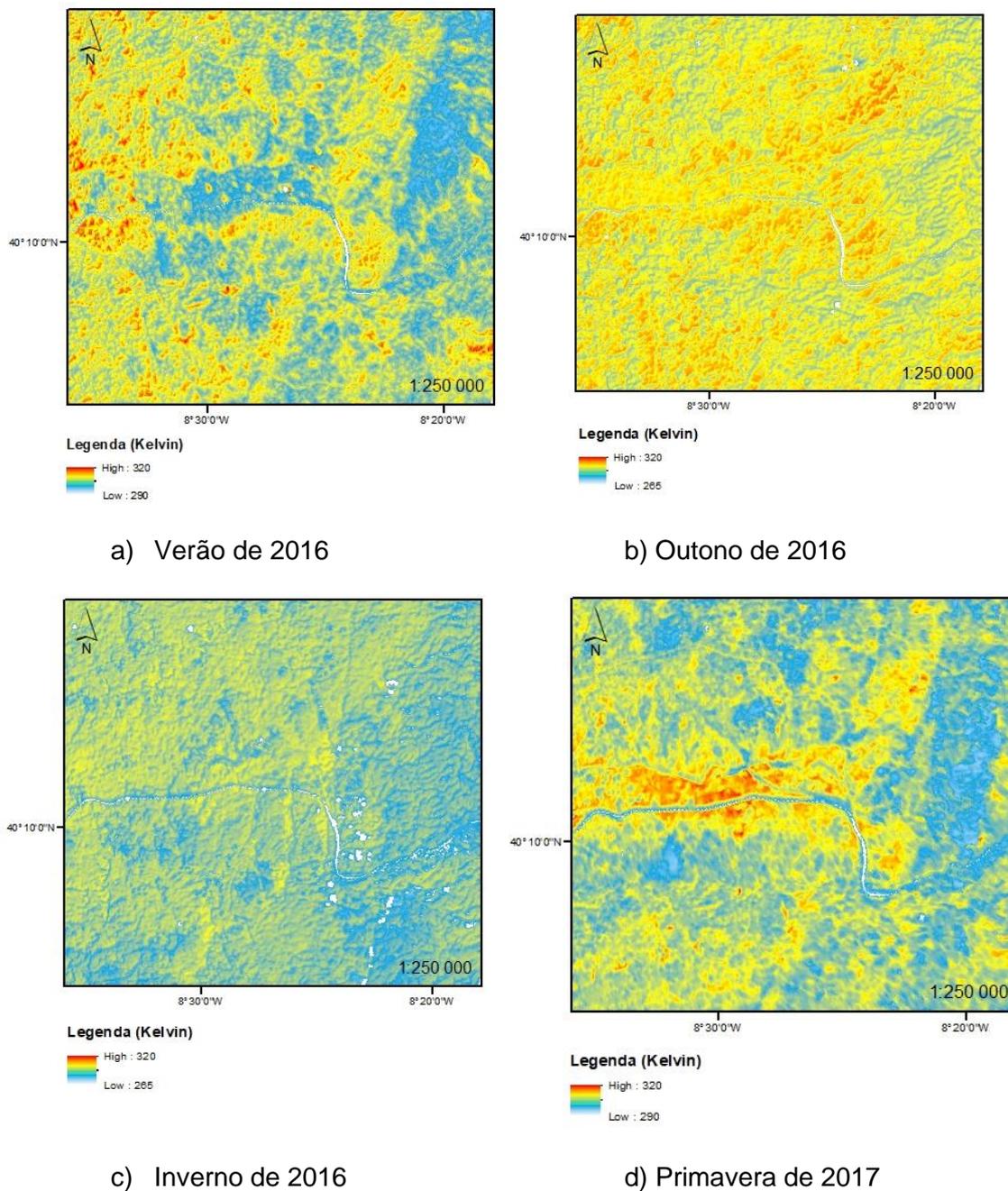


Figura 17. Valores médios estimados da LST em Coimbra derivada para Landsat-8 usando o algoritmo SMW, em diferentes estações do ano. (a) Verão (junho a agosto de 2016); (b) Outono (setembro a novembro de 2016); (c) Inverno (dezembro de 2016 a fevereiro de 2017); (d) Primavera (março a maio de 2017).

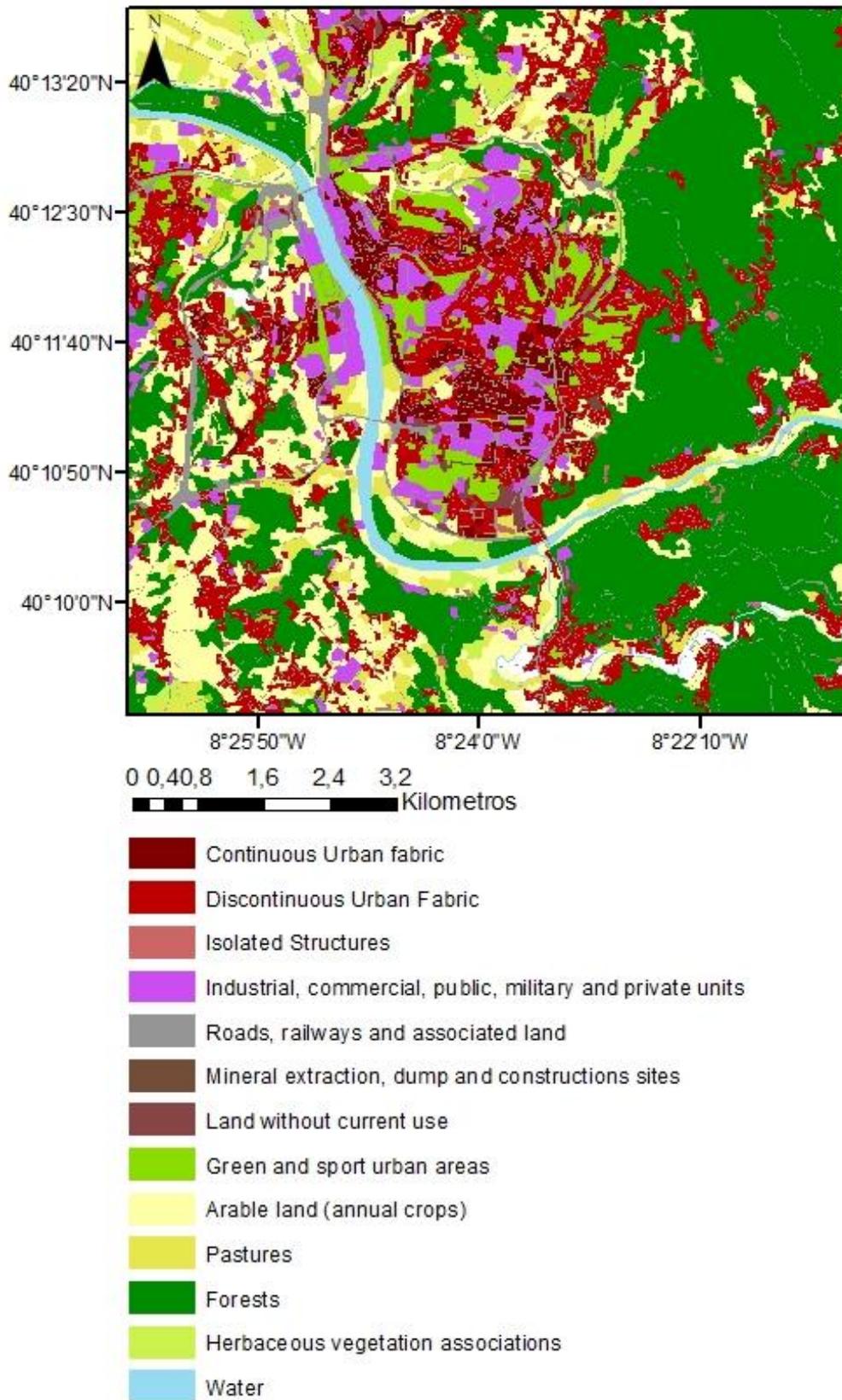


Figura 18. Mapa do uso e ocupação do solo. Adaptado de Urban Atlas 2012.

---

## 7. Análise e Discussão

---

Um dos principais objetivos deste trabalho é estabelecer uma relação entre os resultados obtidos anteriormente e os possíveis riscos associados.

Atualmente, a reorganização urbana está a ter um impacto cada vez mais significativo nas cidades, a nível mundial (Adams e Hastings, 2001). Ao introduzir a ideia da sustentabilidade no planeamento do uso do solo (Wang *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2019; Yu e Zhou, 2018), é de esperar que o desenvolvimento urbano futuro atenuasse os efeitos da urbanização no ar, na qualidade da água e do clima e, por fim, na saúde humana (Grimm *et al.*, 2008; Seto *et al.*, 2011; Ward *et al.*, 2016; Patz *et al.*, 2005, Fu *et al.*, 2019). Assim sendo, é necessário compreender e analisar melhor esse mesmo crescimento urbano quer à escala temporal, quer à escala espacial, de modo a formular estratégias de planeamento que atuem de forma mais eficaz.

Como força motriz direta na troca de radiação e fluxos de calor turbulentos na interface superfície-atmosfera, a temperatura da superfície terrestre (LST) é um dos parâmetros mais importantes nos processos físicos de energia da superfície terrestre e equilíbrio hídrico à escala global local (Anderson *et al.*, 2008; Brunsell & Gillies, 2003; Karnieli *et al.*, 2010; Kustas & Anderson, 2009; Zhang *et al.*, 2008). O conhecimento da LST fornece informações sobre as variações temporais e espaciais relativamente ao equilíbrio da superfície (Kerr *et al.*, 2000). A importância do LST está a ser cada vez mais reconhecida e há um forte interesse em criar metodologias para medir esta temperatura a partir do espaço. A presente dissertação tem como propósito recorrer à análise de um algoritmo específico de detecção remota (DR), que estimula a LST a partir de dados de infravermelhos térmicos (TIR) (Li *et al.*, 2013).

Devido à forte heterogeneidade das características da superfície da terra, tais como a vegetação, topografia e solo (Liu *et al.*, 2006; Neteler, 2010), os parâmetros que compõem a LST alteram-se rapidamente tanto no espaço como no tempo (Prata *et al.*, 1995; Vauclin *et al.*, 1982) sendo necessário efetuar medições mais detalhas de amostragens espaciais e temporais (Li *et al.*, 2013). Ao longo das últimas décadas, a estimativa do LST a partir das bandas TIR dos satélites melhorou significativamente, tendo sido muitos algoritmos destinados a tratar as características de vários sensores a bordo de diferentes satélites e utilizando diferentes análises (Li *et al.*, 2013).

## 7.1. Análise das variações térmicas do satélite

A análise de dados térmicos e imagens referentes à distribuição da LST numa determinada região é uma tarefa árdua, visto que envolve um conjunto de fatores extremamente complexos. Para compreender melhor esta relação é necessário recorrer a um conjunto de indicadores urbanos, naturais e atmosféricos de modo a interpretar essa assinatura térmica. As ferramentas estatísticas utilizadas e descritas de seguida também apresentaram um papel fundamental neste estudo, tendo sido desenvolvidas através das imagens representadas na Figura 17 e que posteriormente deram origem a um conjunto de histogramas que permitiu então a realização dessa análise.

Através desses histogramas representados no Anexo IX, referentes à ocupação do solo em função da temperatura de superfície foi criada uma tabela, ilustrada no Anexo X, com os respetivos valores térmicos médios e desvio padrão para as zonas de ocupação do solo com maior impacto, bem como o respetivo valor para cada época do ano. Posto isto, é possível afirmar que a temperatura mais baixa que foi registada na cidade de Coimbra é referente às zonas de floresta com um valor médio de 293,79K, seguida das zonas verdes urbanas com 296,37K. Por sua vez, os valores mais altos que foram registados dizem respeito às zonas urbanas contínuas que apresentam temperaturas mais altas com um valor médio relativo às quatro estações do ano de 298,63K, seguidos pelas zonas urbanas densas descontínuas e pelas unidades industriais e comerciais, com valores de 297,83K em ambos os tipos de ocupação do solo. Estes valores significam que o desenvolvimento urbano levou a um aumento do valor estimado da LST em média de 3,15K sobrepondo o ambiente natural (florestas e espaços verdes) por superfícies composta por outros materiais como é o caso da pedra, metal e betão, onde se verifica que este tipo de materiais armazenam uma quantidade maior de energia. No caso destas matérias primas não há evidência de energia cinética uma vez que os sensores que medem as radiações do infravermelho térmico registam a intensidade da radiação equivalente à temperatura radiante aparente do terreno, ou seja, a emissividade dos materiais na superfície.

O valor do desvio padrão referente à análise térmica foi elevado para zonas urbanas contínuas (8,56K), indicando que estas superfícies apresentam uma grande variação da temperatura devido a diferentes tipos de materiais de construção utilizados. A mesma situação é observada em zonas densas descontínuas e áreas industriais e comerciais. Em estudos analisados ao longo deste trabalho observa-se que de modo geral as zonas urbanas apresentam um valor de desvio padrão mais baixo, devido ao facto de estarem agregadas a

zonas florestais e com espaços verdes, contudo na cidade de Coimbra isso não se comprova. Através da Figura 18, é possível observar que as zonas de floresta e pasto se encontram mais próximas do rio, apresentando por esses motivos valores mais baixos do desvio padrão, e as zonas urbanas e comerciais todas aglomeradas, evidenciando o uso de diferentes materiais de construção, o que vai de encontro aos resultados obtidos.

Relativamente as zonas de cultivo anual e de pastagens, estas apresentam um nível intermédio de LST de 297,13K em ambos os fatores, uma vez que a região de estudo é caracterizada por extensas áreas florestais a oeste de Coimbra e campos de cultivo nas planícies em torno das margens do rio Mondego. Os campos de cultivo são claramente visíveis na Figura 16a) em tons castanhos e correspondem principalmente ao milho, que é geralmente semeado em abril e colhido em agosto ou setembro (Speetzen & Bartsch, 1988). Na parte ocidental do rio Mondego (perto da foz do rio), existem também extensos campos de arroz. O arroz é semeado por volta de abril/maio, e a colheita tem lugar por volta de setembro/outubro (Speetzen & Bartsch, 1988).

As florestas apresentam um valor estimado da LST consideravelmente mais baixo, porque a vegetação densa tende a reduzir a quantidade de calor armazenada no solo e nas estruturas de superfície através do fenómeno designado por transpiração. Por outro lado, todo o solo coberto por vegetação, independentemente de ser natural ou artificial, apresenta uma variação de temperatura extremamente pequena. Relativamente às massas de água, estas apresentam valores mais elevados de temperatura na altura do verão visto que a água tende a aquecer lentamente durante essa época devido ao facto de a sua inércia térmica ser bastante elevada, o que conseqüentemente leva a um aumento da temperatura durante essa altura (Lemus-Canovas *et al.*, 2020). Devido às características distintas dos rios, lagos, reservatórios e lagoas, os valores estimados da LST variam, levando a um valor elevado do desvio padrão de 8,19K.

No que diz respeito à análise térmica do satélite LS8 referente à ocupação do solo em função da LST é possível afirmar que a acumulação de calor nos diferentes tipos de solo foi condicionada por situações atmosféricas instáveis (Alonso *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2014; Pórolniczak *et al.*, 2017). Com base nesta afirmação, os resultados obtidos mostraram que o aquecimento das áreas urbanas e industriais em contraste com as áreas verdes e florestais foi mínimo no Inverno e acentuado na Primavera e no Verão. Este fator de um modo geral vai de encontro à normalidade, sendo originado essencialmente pela elevada radiação solar na Primavera e Verão, resultante da longa duração do dia e da elevada altitude do sol ao meio-dia, o que aumenta as diferenças de aquecimento.

A dinâmica espacial designada por “ilha de calor urbano” (ICU) tem como propósito evidenciar as transformações térmicas ocorridas na cidade de Coimbra, mais concretamente o aumento significativo da temperatura. Os fatores mais significativos para controlar as ICU são a distribuição das características da cobertura superficial, e a morfologia urbana, tais como materiais de construção e da sua geometria e densidade (Oke, 1982). Cada superfície apresenta propriedades únicas em termos de radiação térmica e relaciona-se com o seu ambiente circundante.

Através da Figura 19 é possível observar alguns pontos de ICU, na altura do verão, inseridos na cidade de Coimbra, mais concretamente na zona da baixa de Coimbra, na zona da Solum e de Santo António dos Olivais. Este fenómeno é contrastado com os espaços verdes (florestais ou não) que envolvem a cidade e com as regiões periurbanas da mesma, sendo consideradas estas áreas como “ilhas de frescura”, onde a temperatura térmica toma valores mais baixos.

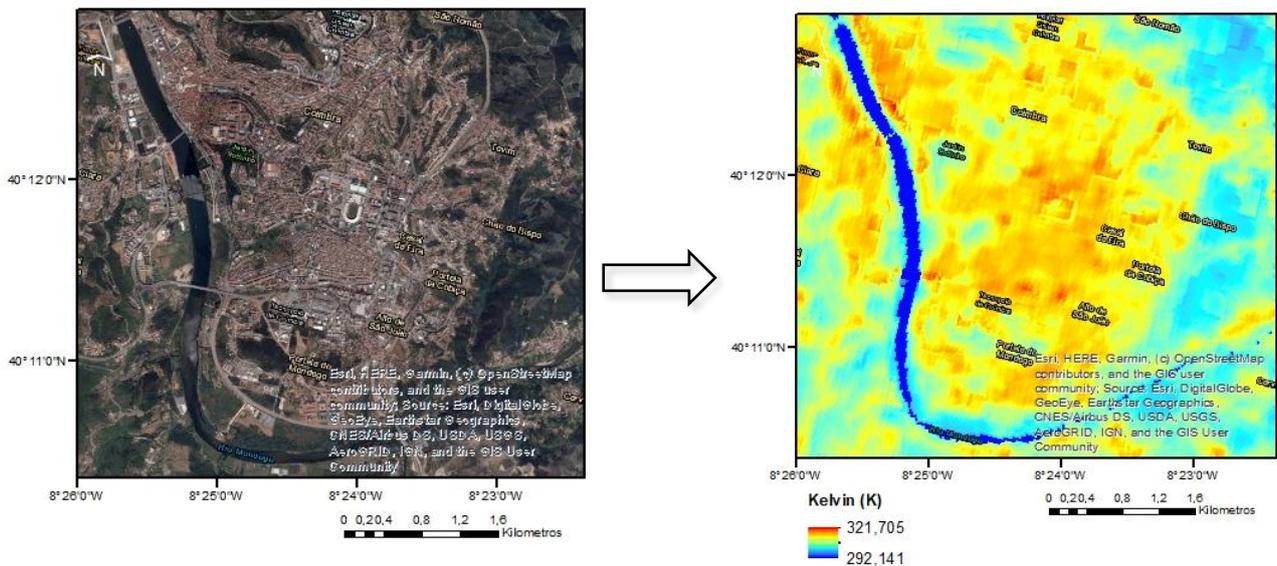


Figura 19. Variações térmicas em diferentes pontos da cidade de Coimbra (Kelvin; K).

Um estudo desenvolvido por Hathway e Sharples (2012) mostrou que a proximidade dos rios contrariou o efeito da ICU, reduzindo assim o valor estimado de LST nas zonas urbanas periféricas, durante o Inverno. Nos resultados obtidos neste estudo, o contrário ocorre no Inverno, quando a temperatura cai ligeiramente com o aumento da proximidade do rio. Isto deve-se principalmente ao facto de, durante a estação do Inverno, o ar frio nas zonas interiores ser canalizado através dos cursos dos rios (Moreno-Garcia, 1994). Outro resultado comprovado segundo Liu *et al.*, (2005) e Mackey *et al.*, (2012), confirmado posteriormente na presente dissertação, refere-se ao facto de que a vegetação tem um impacto muito

significativo na minimização de temperaturas elevadas nas áreas urbanas, contrariando mais uma vez o fenómeno das ilhas de calor urbano.

Num cenário de estudo semelhante está relacionado com três grandes cidades no Sudeste Asiático, Bangucoque (Tailândia), Jacarta (Indonésia) e Manila (Filipinas), em que o valor médio relativo à LST com uma superfície impermeável é superior ao dos espaços verdes, destacando assim o importante papel desempenhado pelos espaços verdes na atenuação dos efeitos das ICU (Estoque *et al.*, 2017; He *et al.*, 2019).

Por fim, em diversos estudos relacionados com a análise térmica em diferentes contextos observa-se que em várias cidades, as zonas industriais apresentam as temperaturas mais elevadas entre os tipos de uso do solo, sendo as mais baixas registadas na área de vegetação, como ocorreu em Riade (Arábia Saudita) (Aina *et al.*, 2017). Sun *et al.*, (2012) também demonstraram que para a cidade de Guangzhou (China), as áreas florestais apresentavam a temperatura média mais baixa da área de estudo.

## 7.2. Correlação de dados com riscos associados

Uma vez realizada a análise térmica dos dados obtidos pelo satélite LS8, na cidade de Coimbra, foi fundamental estabelecer uma relação entre essa informação e os riscos associados a processos hidrogeomorfológicos.

Dentro dos riscos naturais encontram-se inseridos os riscos associados a processos hidrogeomorfológicos que por sua vez constituem um dos domínios científicos com mais impacto dos últimos tempos, quer do ponto de vista da evolução científica, como das preocupações que esses riscos podem originar (Tavares & Cunha, 2008).

Nesse sentido, a presente dissertação tem como objetivo identificar as áreas com riscos associados a processos hidrogeomorfológicos através da análise da LST e, por conseguinte, dos impactos socioambientais gerados pela ocupação urbana, em Coimbra.

É importante esclarecer que os fenómenos físico-naturais não são riscos, porém podem tornar-se riscos como consequência da ação e interferência do ser humano, muitas vezes devido à ausência de medidas permanentes e preventivas que envolvam todo o município. É também fundamental salientar o papel do homem como agente geológico, uma vez que se verifica cada vez mais o intenso e acelerado uso da ocupação da terra, principalmente na expansão urbana de médias e grandes cidades. A interferência antrópica afeta

significativamente os eventos geológicos, uma vez que compõe um sistema integrado na paisagem.

A cidade de Coimbra está inserida num contexto geológico e geomorfológico particular, visto que se desenvolve no contacto de duas grandes unidades morfoestruturais, a Orla Meso Cenozoica Ocidental e o Maciço Hespérico (Soares *et al.*, 1985). Este contexto, confere assim um relevo diversificado ao município e à sua envolvente periurbana, com áreas deprimidas de declives reduzidos por um lado, e vertentes com alguma relevância topográfica, por outro, como foi possível observar anteriormente (Fialho *et al.*, 2010).

O relevo mais ondulado com cumeadas mais aplanadas potenciou, ao longo do tempo, forte urbanização. Face a isso, Coimbra tem vindo a assistir a um processo fortemente especulativo de procura de residência o que conseqüente leva a um aumento da pressão sobre os solos urbanos, o que o que por sua vez conduz a um alastramento da mancha urbana. Este processo que, na maior parte das vezes, parece responder mais a interesses individuais do que ao cumprimento de planos e projetos municipais traduz-se, em regra, por uma utilização incorreta ou, pelo menos, inadequada do espaço que, para além dos inevitáveis custos infraestruturais, tem conseqüências em termos da suscetibilidade do território levando, portanto ao surgimento de riscos naturais.

De modo a comprovar esse crescimento urbano saliento o estudo de Tavares & Magalhães (2012), em que através de uma observação mais detalhada foi possível verificar as alterações paisagistas sofridas, ao longo da presente área de estudo, mais concretamente a diminuição significativa que foi sofrida das áreas de cultivo permanente e o aumento das áreas urbanas, em particular das zonas urbanas contínuas e das unidades industriais, comerciais e militares. Através deste estudo é possível analisar também a evolução do uso e ocupação do solo na cidade de Coimbra, referente ao período analisado (1958-2007), verificando um aumento sistemático da designada mancha urbana, especialmente em termos do número de áreas da zona urbana contínua, áreas naturais com arbustos e associações herbáceas. Para além desta expansão da mancha urbana apresentar um impacto maior no centro de Coimbra, também se verifica o seu crescimento da vez mais acentuado nas zonas periurbanas da cidade.

Assim sendo, como a urbanização está a tomar proporções cada vez maiores ao longo dos anos, as propriedades referentes à ocupação do solo vão-se modificando, como é o caso da capacidade térmica e condutividade.

Posto isto, é possível afirmar que os resultados obtidos na presente dissertação mostram que o aumento da LST estudado anteriormente, que por sua vez originou o efeito

das ICU, provocou uma maior densidade do desenvolvimento urbano, o que por fim origina problemas quer urbanos, quer geológicos.

A população, na área urbana de Coimbra, tem aumentado consideravelmente, em zonas como o Vale da Flores ou a zona do Solum (região sul da cidade) o que faz aumentar o tráfego rodoviário e, conseqüentemente, os níveis de poluição.

Com o impacto que resulta desse aumento da LST nas zonas que atingem uma temperatura mais elevada, nomeadamente nas zonas urbanas contínuas e zonas industriais a temperatura do ar também sofre alterações, estando diretamente relacionada. A temperatura do ar está relacionada com a temperatura atmosférica, com o equilíbrio energético de superfície, com as trocas de energia estabelecidas no ecossistema e com as propriedades físicas da superfície terrestre. A análise LST fornece então uma explicação completa para a mudança de temperatura de uma determinada região.

Mais ferramentas analíticas, incluindo diversos modelos climáticos e meteorológicos, em conjunto com outros parâmetros do ecossistema, tais como tipos de ocupação do solo da superfície e a LST, são necessárias para simular tanto a quantidade de energia e prever alterações.

Posto isto, através deste trabalho foi possível estimar as zonas com maior impacto relativamente à temperatura do ar, tendo sido aferidos aspetos relacionados com a configuração do clima urbano, onde o campo térmico apresentava uma ilha de calor urbano polinucleada (Ganho, 1998). Relativamente aos níveis de poluição tendo em conta a estimativa do LST, é possível verificar-se que a sua concentração não é homogénea no espaço urbano, havendo áreas mais poluídas do que outras, em função da configuração dos campos térmicos ao longo do município.

Estes resultados podem dar informações relevantes, em termos de ordenamento do território, pois indicam áreas de maior propensão para a concentração de matéria particulada e, conseqüentemente, de diminuição da qualidade do ar.

A utilização de imagens de DR revelou-se essencial para investigar as características das diversas paisagens e as suas propriedades físicas, urbanas e ambientais, com o objetivo de compreender de uma forma mais concreta os impactos que podem surgir nos processos climáticos de uma determinada região.

---

## 8. Considerações Finais

---

Este trabalho teve como principal foco a determinação da estimativa da temperatura de superfície da terra (LST) através do programa espacial Landsat, mais precisamente do Landsat 8 (LS8), com o auxílio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE). Assim sendo, procedeu-se à implementação do algoritmo empírico de um único canal proposto por Duguay-Tetzlaff *et al.*, 2015, visto ser um algoritmo simples e com uma elevada precisão. Para além disso, este algoritmo foi utilizado para criar um registo de dados climáticos da LST para a série de satélites Meteosat, sendo por isso amplamente analisado. Um algoritmo semelhante, mas sem dependência explícita da emissividade é utilizado pelo *Copernicus Global Land Service* para gerar a LST através de um conjunto de satélites criados pela NASA designados *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) e de um conjunto de satélites meteorológicos do Japão, designados *Multifunctional Transport Satellites* (MTSAT) (Freitas *et al.*, 2013).

A incerteza do algoritmo obtida é semelhante à determinada por Duguay-Tetzlaff *et al.* 2015 e Freitas *et al.* 2013. O LS8 apresenta discrepâncias que estão relacionadas com as diferentes características espectrais dos sensores. A banda TIR do LS8 é consideravelmente mais estreita e exclui a região de 12  $\mu\text{m}$ , o que permite recuperar o LST com melhor precisão. Os algoritmos que utilizam ambas as bandas TIR do Landsat 8, como é o caso do algoritmo designado *Split-Window* poderiam fornecer melhores estimativas do LST. Contudo, infelizmente, um problema de calibração do sensor TIRS foi identificado pela USGS introduzindo uma grande incerteza de calibração na banda de 12  $\mu\text{m}$  (Barsi *et al.*, 2014). Este facto foi confirmado com a estimativa da LST para o LS8 a partir desse mesmo algoritmo, que mostrou uma degradação substancial da qualidade da estimativa da temperatura da superfície terrestre.

Devido à elevada quantidade de informação fornecida pelos satélites, neste caso pelo LS8, torna-se fundamental saber gerir da melhor maneira a utilização destas técnicas de modo a tirar o melhor aproveitamento possível no domínio das ciências. Assim sendo, com a utilização das técnicas de programação e softwares especializados, bem como, recursos a métodos estatísticos descritos previamente referentes aos dados do LS8 é possível discriminar as diferenças nas respetivas bandas e na posterior análise térmica da região, estabelecendo assim uma relação entre o domínio da DR e as ciências da terra. Nas imagens desenvolvidas e analisadas identificaram-se diferenças notórias na refletância devido a

fatores como a vegetação, emissividade e a quantidade de vapor de água. O conjunto desses fatores e outros descritos anteriormente deram origem a uma coleção de imagens referentes à LST, estando essas diferenças mais evidenciadas no período referente ao Verão (julho de 2016) e ao Inverno (janeiro de 2017). Estes contrastes apesar de expectáveis foram provocados por diversos fatores nomeadamente a ocupação e gestão do solo. Por fim, foi estabelecida uma relação a partir de ferramentas estatísticas entre a refletância e a LST, concluindo-se assim que a análise de refletância térmica no presente trabalho apresenta melhores resultados no período referente ao Verão de 2016 do que no Inverno de 2017, sendo um fator importante para a realização da análise térmica desta área de estudo.

As estimativas da LST de alta resolução são cada vez mais utilizadas em estudos de pequena escala. A série de satélites Landsat, mais precisamente o LS8, é muito apropriada para tais estudos, uma vez que fornece imagens a uma alta resolução espacial que é adequada para uma vasta gama de aplicações. Embora tenham sido propostos vários algoritmos para estimar a LST, estes dados não estão facilmente disponíveis e geralmente necessitam de um grande volume de dados.

Através do recurso à programação, a nova plataforma online GEE permitiu que os dados de DR fossem facilmente analisados para grandes quantidades de dados. Este estudo forneceu assim um repositório com todos os conjuntos de códigos necessários para estimar a LST a partir do Landsat, como se encontra referido anteriormente. Além disso, os posteriores utilizadores deste código não são obrigados a descarregar quaisquer dados, sendo apenas necessário acederem ao código. Também é possível editar o código para melhor satisfazer as suas necessidades, podendo ser implementadas melhorias ao longo do tempo.

Os valores LST são estimados utilizando o algoritmo SMW desenvolvido pela CM-SAF. Para cada Landsat, os coeficientes do algoritmo foram derivados utilizando a mesma base de dados de calibração, assegurando assim a consistência entre os satélites. Todos os *inputs* para o algoritmo são obtidos do catálogo GEE, ou seja, o conteúdo de vapor de água dos dados de reanálise NCEP/NCAR e emissividade do conjunto de dados ASTER GEDv3 com uma correção baseada em NDVI para a dinâmica da vegetação, como explicado anteriormente (Ermida *et al.*, 2020).

É importante realçar também, que a DR e o SIG possibilitam um melhor aproveitamento dos recursos e consequentemente, uma análise espacial mais aprofundada, integrada e coerente com o território analisado. Assim sendo, as informações de temperatura de superfície a partir de satélites especializados para essa função, em ambientes urbanos,

contribuem na identificação, espacialização e na compreensão da dinâmica climática em diversos climas locais e, conseqüentemente, na adoção de medidas como é o caso de planos de urbanização e de ambientes específicos, no sentido de amenizar as temperaturas nessas regiões, podendo ser aplicada em diversos intervalos e locais distintos.

Posto isto, para além das aplicações técnicas desempenhadas ao logo do presente trabalho, este poderá ser aplicado em estudos realizados futuramente não só diretamente no domínio das Geociências mas também em outros campos visto que permite a monitorização das variações de temperatura a longo prazo, a sua utilização em diversos modelos, nomeadamente, em estudos energéticos ao nível da superfície terrestre para estimar indicadores importantes de monitorização de seca, como é o caso de índices de evapotranspiração e de stress evaporativo, deteção de alterações no uso e ocupação do solo, gestão de recursos hídricos, e estudos relacionados com o calor urbano, como é o caso das ICU, em diferentes regiões.

Num seguimento futuro, este trabalho pode ser expandido visto que o algoritmo foi previamente calibrado e validado ao longo de toda a série do Landsat, podendo assim ser aplicado em diversas áreas com impactos mais significativos, a partir de uma simples plataforma online criada para possibilitar a análise de dados de forma mais simplificada e livre, podendo ser aplicada em próximos trabalhos.

---

## 9. Referências Bibliográficas

---

- ABRAMS, Michael; HOOK, Simon; RAMACHANDRAN, Bhaskar. ASTER user handbook. *Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory*, 2002, 45-54.
- ADAMS, David; HASTINGS, E. M. Urban renewal in Hong Kong: transition from development corporation to renewal authority. *Land Use Policy*, 2001, 18.3: 245-258.
- AINA, Y. A.; ADAM, E. M.; AHMED, F. SPATIOTEMPORAL VARIATIONS IN THE IMPACTS OF URBAN LAND USE TYPES ON URBAN HEAT ISLAND EFFECTS: THE CASE OF RIYADH, SAUDI ARABIA. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2017, 42.
- ALLEN, Adriana. Environmental planning and management of the peri-urban interface: perspectives on an emerging field. *Environment and urbanization*, 2003, 15.1: 135-148.
- ALONSO, M. S.; LABAJO, J. L.; FIDALGO, M. R. Characteristics of the urban heat island in the city of Salamanca, Spain. *Atmósfera*, 2003, 16.3: 137-148.
- ANDERSON, M. C., et al. A thermal-based remote sensing technique for routine mapping of land-surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112.12: 4227-4241.
- ANDRIEU, Hervé; CHOCAT, Bernard. Introduction to the special issue on urban hydrology. *JHyd*, 2004, 299.3: 163-165.
- BALDRIDGE, Alice M., et al. The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113.4: 711-715.
- BARSI, Julia A., et al. Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration. *Remote Sensing*, 2014, 6.11: 11607-11626.
- BAUER, Marvin E.; LOFFELHOLZ, Brian C.; WILSON, Bruce. Estimating and mapping impervious surface area by regression analysis of Landsat imagery. In: *Remote sensing of impervious surfaces*. CRC Press, 2007. p. 31-48.
- BENALI, A., et al. Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 108-121.

- BLACKMORE, T. A.; SAUNDERS, R.; KEOGH, S. J. Verifying NWP model analyses and forecasts using simulated satellite imagery. In: *Proceedings of the 2014 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*. 2014. p. 22-26.
- BRABEC, Elizabeth; SCHULTE, Stacey; RICHARDS, Paul L. Impervious surfaces and water quality: a review of current literature and its implications for watershed planning. *Journal of planning literature*, 2002, 16.4: 499-514.
- BRUNSELL, Nathaniel A.; GILLIES, Robert R. Length scale analysis of surface energy fluxes derived from remote sensing. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4.6: 1212-1219.
- CARLSON, Toby N.; RIPLEY, David A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote sensing of Environment*, 1997, 62.3: 241-252.
- CASELLES, Vicente, et al. Thermal band selection for the PRISM instrument: 1. Analysis of emissivity-temperature separation algorithms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102.D10: 11145-11164.
- CHANDER, Gyanesh; MARKHAM, Brian L.; HELDER, Dennis L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, 2009, 113.5: 893-903.
- CHAVEZ, Pat S., et al. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1996, 62.9: 1025-1035.
- CHEN, Yimin, et al. Tele-connecting China's future urban growth to impacts on ecosystem services under the shared socioeconomic pathways. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 765-779.
- Cole, A. E., Court, A., and Kantor, A. J., 1965, Model atmospheres. In *Handbook of Geophysics and Space Environments*, edited by S. L. Valley, Air Force (Cambridge:Cambridge Research Laboratories, OYce of Aerospace Research, United States Air Force).
- COSSU, Roberto, et al. A roadmap for a dedicated Earth Science Grid platform. *Earth Science Informatics*, 2010, 3.3: 135-148.
- CUNHA, Lúcio; DIMUCCIO, Luca. Considerações sobre riscos naturais num espaço de transição. Exercícios cartográficos numa área a Sul de Coimbra. *Territorium*, 2002, 9: 37-51.
- DASH, Prasanjit, et al. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. *International Journal of remote sensing*, 2002, 23.13: 2563-2594.

*Análise de dados térmicos de deteção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos*

- DIAS, Rui; RIBEIRO, António. The Ibero-Armorican Arc: a collision effect against an irregular continent. *Tectonophysics*, 1995, 246.1-3: 113-128.
- DUCART, Diego F., et al. Alteration mineralogy at the Cerro La Mina epithermal prospect, Patagonia, Argentina: field mapping, short-wave infrared spectroscopy, and ASTER images. *Economic Geology*, 2006, 101.5: 981-996.
- DUGUAY-TETZLAFF, Anke, et al. Meteosat land surface temperature climate data record: Achievable accuracy and potential uncertainties. *Remote Sensing*, 2015, 7.10: 13139-13156.
- DUH, Jiunn-Der, et al. Rates of urbanization and the resiliency of air and water quality. *Science of the total environment*, 2008, 400.1-3: 238-256.
- EEA, 2006. Urban Sprawl in Europe—The Ignored Challenge. European Communities, No 10, Copenhagen, <http://dx.doi.org/10.1080/02697451003740312> (60 p).
- EMMANUEL, Rohinton; KRÜGER, Eduardo. Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK. *Building and Environment*, 2012, 53: 137-149.
- ERMIDA, Sofia L., et al. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. *Remote Sensing*, 2020, 12.9: 1471.
- ESTOQUE, Ronald C.; MURAYAMA, Yuji; MYINT, Soe W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of the Total Environment*, 2017, 577: 349-359.
- EYRE, J. R., et al. Assimilation of TOVS radiance information through one-dimensional variational analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1993, 119.514: 1427-1463.
- FIALHO, J.; GANHO, N.; GOMES, C. R. Poluição por partículas e clima urbano. Um estudo de magnetismo ambiental em Coimbra, Portugal central. *e-Terra*, 2010, 19.
- FONSECA, Ana Duarte; FERNANDES, João Cordeiro. *Deteção remota*. 2004.
- FRANC, G. B.; CRACKNELL, A. P. Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA-11 AVHRR data in north-eastern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15.8: 1695-1712.
- FREITAS, Sandra C., et al. Land surface temperature from multiple geostationary satellites. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34.9-10: 3051-3068.

- FRIEDL, Mark A. Forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements. *Remote sensing of environment*, 2002, 79.2-3: 344-354.
- FU, Yingchun, et al. Characterizing the spatial pattern of annual urban growth by using time series Landsat imagery. *Science of The Total Environment*, 2019, 666: 274-284.
- GORELICK, Noel, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27.
- GRIMM, Nancy B., et al. Global change and the ecology of cities. *science*, 2008, 319.5864: 756-760.
- GROVE, J. Morgan; BURCH, William R. A social ecology approach and applications of urban ecosystem and landscape analyses: a case study of Baltimore, Maryland. *Urban Ecosystems*, 1997, 1.4: 259-275.
- HATHWAY, E. A.; SHARPLES, S. The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. *Building and Environment*, 2012, 58: 14-22.
- HE, Bao-Jie, et al. An approach to examining performances of cool/hot sources in mitigating/enhancing land surface temperature under different temperature backgrounds based on landsat 8 image. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 44: 416-427.
- HELLMAN, Melanie J.; RAMSEY, Michael S. Analysis of hot springs and associated deposits in Yellowstone National Park using ASTER and AVIRIS remote sensing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 135.1-2: 195-219.
- HEWSON, Rob, et al. The application of day and night time ASTER satellite imagery for geothermal and mineral mapping in East Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 85: 101991.
- HORLER, D. N. H.; BARBER, J. Principles of remote sensing of plants. *Plants and the daylight spectrum*, 1981.
- HUBBARD, Bernard E.; CROWLEY, James K. Mineral mapping on the Chilean–Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: Data dimensionality issues and solutions. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99.1-2: 173-186.
- HULLEY, Glynn C.; HOOK, Simon J.; BALDRIDGE, Alice M. Validation of the North American ASTER Land Surface Emissivity Database (NAALSED) version 2.0 using pseudo-invariant sand dune sites. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113.10: 2224-2233.
- HULLEY, Glynn C., et al. The ASTER Global Emissivity Dataset (ASTER GED): Mapping Earth's emissivity at 100-meter spatial scale. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42.19: 7966-7976.

*Análise de dados térmicos de deteção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos*

- INE, 2014. Projeções de população residente 2012–2060 (in portuguese). Instituto Nacional de Estatística, Lisbon (March 18 p).
- JENSEN, John R.; EIPHANIO, José Carlos Neves. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, Juan C., et al. Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103.4: 474-487.
- KALNAY, Eugenia, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 1996, 77.3: 437-472.
- KARNIELI, Arnon, et al. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *Journal of climate*, 2010, 23.3: 618-633.
- KERR, Yann H., et al. Land surface temperature retrieval techniques and applications: Case of the AVHRR. In: *Thermal Remote Sensing in Land Surface Processing*. CRC Press, 2004. p. 55-131.
- KIM, Kyunghyun; THOMPSON, Anita M.; BOTTER, Gianluca. Modeling of thermal runoff response from an asphalt-paved plot in the framework of the mass response functions. *Water Resources Research*, 2008, 44.11.
- Kneizys, F. X., Shettle, E. P., Abreu, L. W., Anderson, G. P., Chetwynd, J. H., Gallery, W. O., Selby, J. E. A., and Clough, S. A., 1988, Users guide to LOWTRAN-7 Technical Report AFGL-TR-88-0177, Optical/Infrared Technology Division, US Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, Massachusetts.
- KOVALSKYY, V.; ROY, David P. The global availability of Landsat 5 TM and Landsat 7 ETM+ land surface observations and implications for global 30 m Landsat data product generation. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 130: 280-293.
- KULLBERG, José Carlos, et al. *A Bacia Lusitaniana: estratigrafia, paleogeografia e tectónica*. 2006.
- KUSTAS, William; ANDERSON, Martha. Advances in thermal infrared remote sensing for land surface modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149.12: 2071-2081.
- LANDSBERG, Helmut Elrich (1981) – *The urban climate*. New York: Academic Press, 1981. X, p. 275.
- LARY, David J., et al. Machine learning in geosciences and remote sensing. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7.1: 3-10.

- LI, Jun, et al. Global soundings of the atmosphere from ATOVS measurements: The algorithm and validation. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39.8: 1248-1268.
- LI, Shanshan; JIANG, Geng-Ming. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data with the generalized split-window algorithm. *IEEE Access*, 2018, 6: 18149-18162.
- LI, Zhao-Liang, et al. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote sensing of environment*, 2013, 131: 14-37.
- LIMA ALVES, Elis Dener; LOPES, António. The urban heat island effect and the role of vegetation to address the negative impacts of local climate changes in a small Brazilian City. *Atmosphere*, 2017, 8.2: 18.
- LIU, Weidong, et al. Relationship between NDVI and the urban heat island effect in Beijing area of China. In: *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability II*. International Society for Optics and Photonics, 2005. p. 58841R.
- LIU, Yuanbo; HIYAMA, Tetsuya; YAMAGUCHI, Yasushi. Scaling of land surface temperature using satellite data: A case examination on ASTER and MODIS products over a heterogeneous terrain area. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105.2: 115-128.
- LOVELAND, T. R., et al. A Strategy for Estimating the Rates of Recent United States Land-Cover Changes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2002, 68.10: 1091-1099.
- LOVELAND, Thomas R.; DWYER, John L. Landsat: Building a strong future. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 122: 22-29.
- Lupu, C. and Wilhelmsson T.: A guide to simulated satellite images in the IFS, ECMWF Research Department Memorandum RD16-064, 10 pp., available at: [https://software.ecmwf.int/wiki/display/FCST/Simulated+satellite+data?preview=/55127736/97382070/A\\_guide\\_to\\_simulated\\_satellite\\_images\\_in\\_the\\_IFS.pdf](https://software.ecmwf.int/wiki/display/FCST/Simulated+satellite+data?preview=/55127736/97382070/A_guide_to_simulated_satellite_images_in_the_IFS.pdf) (last access: 2 July 2018), 2016.
- MACKEY, Christopher W.; LEE, Xuhui; SMITH, Ronald B. Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island. *Building and Environment*, 2012, 49: 348-358.
- MALAKAR, Nabin K., et al. An operational land surface temperature product for Landsat thermal data: Methodology and validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56.10: 5717-5735.
- MANTAS, Vasco M.; MARQUES, João Carlos; PEREIRA, Alcides JSC. A geospatial approach to monitoring impervious surfaces in watersheds using Landsat data (the Mondego Basin, Portugal as a case study). *Ecological Indicators*, 2016, 71: 449-466.

*Análise de dados térmicos de detecção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos*

- MARINONI, Oswald, et al. Directing urban development to the right places: Assessing the impact of urban development on water quality in an estuarine environment. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 113: 62-77.
- MARQUES, J. C., et al. The ecological sustainability trigon—a proposed conceptual framework for creating and testing management scenarios. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58.12: 1773-1779.
- MATHER, Paul M.; KOCH, Magaly. *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. John Wiley & Sons, 2011.
- MARTINS, João, et al. A Physically constrained calibration database for land surface temperature using infrared retrieval algorithms. *Remote Sensing*, 2016, 8.10: 808.
- MILLS, G. An urban canopy-layer climate model. *Theoretical and applied climatology*, 1997, 57.3-4: 229-244.
- MORENO-GARCIA, M. Carmen. Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology*, 1994, 14.6: 705-710.
- NETELER, Markus. Estimating daily land surface temperatures in mountainous environments by reconstructed MODIS LST data. *Remote sensing*, 2010, 2.1: 333-351.
- OĞUZ, Hakan. A software tool for retrieving land surface temperature from ASTER imagery. 2015.
- OJIMA, Ricardo; HOGAN, Daniel Joseph. Crescimento urbano e peri-urbanização: redistribuição espacial da população em novas fronteiras da mudança ambiental. *IV Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Ambiente e Sociedade*, 2008.
- OKE, Tim R. (1987) – *Boundary Layer Climates*. Editora Routledge, Londres. 2Nd Edition. p.435.
- PANAGOPOULOS, Thomas; BARREIRA, Ana Paula. Understanding the shrinkage phenomenon in Portugal. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 2013, 9.1: 107-118.
- PATEL, Nirav N., et al. Multitemporal settlement and population mapping from Landsat using Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 35: 199-208.
- PATZ, Jonathan A., et al. Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 2005, 438.7066: 310-317.

- PERES, Leonardo F.; DACAMARA, Carlos C. Emissivity maps to retrieve land-surface temperature from MSG/SEVIRI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43.8: 1834-1844.
- POUR, Amin Beiranvand; HASHIM, Mazlan; PARK, Yongcheol. Application of ASTER SWIR bands in mapping anomaly pixels for Antarctic geological mapping. In: *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. p. 012025.
- PRATA, A. J., et al. Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: Current status and future prospects. *Remote Sensing Reviews*, 1995, 12.3-4: 175-224.
- PRIHODKO, Lara; GOWARD, Samuel N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 60.3: 335-346.
- QIN, Zhihao; KARNIELI, Arnon; BERLINER, Pedro. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International journal of remote sensing*, 2001, 22.18: 3719-3746.
- USGS. Landsat Collection 1 Level 1 Product Definition, LSDS-1656 version 2.0; USGS: Sioux Falls, South Dakota, 2019.
- RAO, P. Krishna. Remote sensing of urban "heat islands" from an environmental satellite. *Bulletin of the American meteorological society*, 1972, 53.7: 647-648.
- REDDY, M. Anji; REDDY, Anji. *Textbook of remote sensing and geographical information systems*. Hyderabad: BS publications, 2008.
- RIBEIRO, A. Introduction a la geologie generale du Portugal. Serv. Geol. Portg. Lisboa. *Congr. Int. Geol.-26e-Paris-1980*, 1979.
- ROCKWELL, Barnaby W.; HOFSTRA, Albert H. Identification of quartz and carbonate minerals across northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data—Implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas. *Geosphere*, 2008, 4.1: 218-246.
- ROWAN, L. C., et al. A new satellite imaging system for mapping hydrothermally altered rocks: An example from the Cuprite, Nevada Mining District USA. *Economic Geology Bulletin*, 2003, 98: 1019-1027.
- RUBIO, E.; CASELLES, V.; BADENAS, C. Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8–14,  $\mu\text{m}$  Wave band: Analysis of two field methods. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59.3: 490-521.

*Análise de dados térmicos de deteção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos*

- SABINS JR, Floyd F. *Remote sensing--principles and interpretation*. WH Freeman and company, 1987.
- SAUNDERS, Roger, et al. An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12). *Geoscientific Model Development*, 2018, 11.7.
- SETO, Karen C.; GÜNERALP, Burak; HUTYRA, Lucy R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109.40: 16083-16088.
- SOARES, F., Marques, F. & Rocha, R.B. (1985) – Contribuição para o conhecimento geológico de Coimbra, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra, 100, pp. 41-71.
- SOARES, A. F.; GOMES, C. R. A geologia do Baixo Mondego—organização do Mesozóico. *Seminário “O Baixo Mondego—Organização Geossistémica e Recursos Naturais*, 1997, 6-20.
- Soares, A.F., Marques, J.F., Rocha R., Cunha, P. P., Duarte L. V., Sequeira, A., ... Santos, J. R. (2005). Carta Geológica de Portugal, escala 1:50.000, folha 19-D, Coimbra-Lousã. Lisboa: Ministério da Economia e da Inovação, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P., Departamento de Geologia.
- SOBRINO, J. A.; RAISSOUNI, N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International journal of remote sensing*, 2000, 21.2: 353-366
- .
- SONG, Conghe, et al. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects. *Remote sensing of Environment*, 2001, 75.2: 230-244.
- SOUSA, Silvio Braz de; FERREIRA, Laerte Guimarães. Análise da temperatura de superfície em ambientes urbanos: um estudo por meio de sensoriamento remoto no município de Goiânia, Goiás (2002–2011). *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia*, 2012, 15.
- SPEETZEN, Heinrich; BARTSCH, Reinhardt. Introducing new Crops and Crop Rotations in the Lower Monde Valley Irrigation Project, Portugal. *Der Tropenlandwirt-Journal of Agriculture in the Tropics and Subtropics*, 1988, 89.1: 33-43.
- STATHOPOULOU, Marina; CARTALIS, Constantinos. Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece. *Solar Energy*, 2007, 81.3: 358-368.
- SUN, Donglian; PINKER, Rachel T.; BASARA, Jeffery B. Land surface temperature estimation from the next generation of Geostationary Operational Environmental Satellites: GOES M–Q. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43.2: 363-372.

- SUN, Q.; WU, Z.; TAN, J. The relationship between land surface temperature and land use/land cover in Guangzhou, China. *Environ Earth Sci* 65 (6): 1687–1694. 2012.
- TANG, Ronglin; LI, Zhao-Liang; TANG, Bohui. An application of the Ts–VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114.3: 540-551.
- TAVARES, A. Geotechnical and natural hazard mapping on urban and outer urban planning. 57th Canad. In: *Geotech. Conf. CD, Geo-quebec*. 2004. p. 27-33.
- TAVARES, Alexandre O.; CUNHA, Lúcio. Espaços de planeamento no concelho de Coimbra: a importância das variáveis biofísicas, demográficas e sociais. 2004.
- TAVARES, Alexandre Oliveira; CUNHA, Lúcio. Perigosidade natural na gestão territorial: o caso do Município de Coimbra. 2008.
- TAVARES, Alexandre O.; PATO, Rosinda L.; MAGALHAES, M. Carmo. Spatial and temporal land use change and occupation over the last half century in a peri-urban area. *Applied geography*, 2012, 34: 432-444.
- TEDESCO, Andrea. Estimativa de profundidades utilizando imagens de alta resolução apoiadas por dados de levantamento batimétrico. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 2003, 9.2.
- TINDALL, James - Deconvolution of Plant Type(s) for Homeland Security Enforcement Using Remote Sensing on a UAV Collection Platform. In: *Homeland Security Affairs*. Vol. II, nº1, Article 4 (2006).
- TINER, R.W., 2004. Remotely-sensed indicators for monitoring the general condition of natural habitat in watersheds: an application for Delaware's Nanticoke River watershed. *Ecol. Indic.* 4, 227–243.
- TURNER, Billie L.; LAMBIN, Eric F.; REENBERG, Anette. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104.52: 20666-20671.
- VALOR, Enric; CASELLES, Vicente. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Remote sensing of Environment*, 1996, 57.3: 167-184.
- VAN DE GRIEND, A. A.; OWE, Manfred. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of remote sensing*, 1993, 14.6: 1119-1131.

*Análise de dados térmicos de detecção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos*

- VAUCLIN, M., et al. Spatial variability of surface temperature along two transects of a bare soil. *Water Resources Research*, 1982, 18.6: 1677-1686.
- VAUGHAN, R. Greg, et al. Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multi-wavelength thermal infrared images. *Remote sensing of Environment*, 2005, 99.1-2: 140-158.
- VAUGHAN, R. Greg, et al. Satellite measurements of recent volcanic activity at Oldoinyo Lengai, Tanzania. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, 173.3-4: 196-206.
- WARD, Kathrin, et al. Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 527-539.
- WANG, Hao, et al. A framework of decision-making factors and supporting information for facilitating sustainable site planning in urban renewal projects. *Cities*, 2014, 40: 44-55.
- WENG, Qihao; LU, Dengsheng; SCHUBRING, Jacquelyn. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote sensing of Environment*, 2004, 89.4: 467-483.
- WENG, Qihao; YANG, Shihong. Urban air pollution patterns, land use, and thermal landscape: an examination of the linkage using GIS. *Environmental monitoring and assessment*, 2006, 117.1-3: 463-489.
- WOODCOCK, Curtis E., et al. Free access to Landsat imagery. *SCIENCE VOL 320: 1011*, 2008.
- WULDER, Michael A., et al. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote sensing of environment*, 2019, 225: 127-147.
- XIAN, George. Mapping impervious surfaces using classification and regression tree algorithm. *Remote sensing of impervious surfaces*, 2007, 39-58.
- XIAN, George. Satellite remotely-sensed land surface parameters and their climatic effects for three metropolitan regions. *Advances in Space Research*, 2008, 41.11: 1861-1869.
- XIAN, George; HOMER, Collin. Updating the 2001 National Land Cover Database impervious surface products to 2006 using Landsat imagery change detection methods. *Remote sensing of environment*, 2010, 114.8: 1676-1686.
- YI, Shanzhen; XIE, Wenhao; YU, Wenxia. Combining MODIS, NCEP/NCAR and DEM Data for Near Land Surface Atmospheric Water Vapor Estimation. In: *2018 26th International Conference on Geoinformatics*. IEEE, 2018. p. 1-5.

YOUNG, Damian John, et al. *Temperature as a contaminant in streams in the auckland region, stormwater issues and management options*. Auckland Council, 2013.

YU, Wenjuan; ZHOU, Weiqi. Spatial pattern of urban change in two Chinese megaregions: Contrasting responses to national policy and economic mode. *Science of The Total Environment*, 2018, 634: 1362-1371.

YUAN, Fei; BAUER, Marvin E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of environment*, 2007, 106.3: 375-386.

ZHANG, Renhua, et al. Two improvements of an operational two-layer model for terrestrial surface heat flux retrieval. *Sensors*, 2008, 8.10: 6165-6187.

ZHANG, Xianfeng; PAZNER, Micha; DUKE, Norman. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62.4: 271-282.

---

## 10. Anexos

---

### **ANEXO I. Código para gerar a *layer* referente à Temperatura de Brilho**

```
var COLLECTION = ee.Dictionary({
  'L8': {
    'TOA': ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_TOA'),
    'SR': ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR'),
    'TIR': ['B10','B11']
  }
});
exports.collection = function(landsat, date_start, date_end, geometry, use_ndvi) {

  // Recolha de dados da refletância no topo da atmosfera
  var collection_dict = ee.Dictionary(COLLECTION.get(landsat));

  var landsatTOA = ee.ImageCollection(collection_dict.get('TOA'))
    .filter(ee.Filter.date(date_start, date_end))
    .filterBounds(geometry)
    .map(cloudmask.toa);

  // Combinar coleções
  // Todos os canais da coleção de refletância de superfície exceto os canais TIR: da coleção TOA
  // Selecionar as bandas TIR
  var tir = ee.List(collection_dict.get('TIR'));

  // Determinar a LST
  var landsatLST = landsatALL.map(LST.addBand(landsat));
  return landsatLST
}
```

**ANEXO II. Código para gerar a *layer* referente ao Vapor de Água Total (TCWV)**

```

exports.addBand = function(image){

  // Selecionar o dia de interseção
  var date = ee.Date(image.get('system:time_start'))
  var year = ee.Number.parse(date.format('yyyy'))
  var month = ee.Number.parse(date.format('MM'))
  var day = ee.Number.parse(date.format('dd'))
  var date1 = ee.Date.fromYMD(year,month,day)
  var date2 = date1.advance(1,'days')

  // Calcular a diferença de tempo da imagem do LS8
  var datedist = function(image){
    return image.set('DateDist',
      ee.Number(image.get('system:time_start'))
      .subtract(date.millis()).abs()
    );
  };

  // Recolha de dados atmosféricos
  var TPWcollection = ee.ImageCollection('NCEP_RE/surface_wv')
    .filter(ee.Filter.date(date1.format('yyyy-MM-dd'), date2.format('yyyy-MM-dd')))
    .map(datedist)

  // Selecionar os dois modelos mais próximos
  var closest = (TPWcollection.sort('DateDist')).toList(2);

  // Verificar se existem dados atmosféricos no dia pretendido se não criar uma imagem TPW com
  // valores não reais. Estes são então mascarados na função SMW (evita erros)
  var tpw1 = ee.Image(ee.Algorithms.If(closest.size().eq(0), ee.Image.constant(-999.0),
    ee.Image(closest.get(0)).select('pr_wtr' )));
  var tpw2 = ee.Image(ee.Algorithms.If(closest.size().eq(0), ee.Image.constant(-999.0),
    ee.Algorithms.If(closest.size().eq(1), tpw1,
    ee.Image(closest.get(1)).select('pr_wtr' ))));

```

*Análise de dados térmicos de detecção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos*

```
var time1 = ee.Number(ee.Algorithms.If(closest.size().eq(0), 1.0,
    ee.Number(tpw1.get('DateDist')).divide(ee.Number(21600000)) ));
var time2 = ee.Number(ee.Algorithms.If(closest.size().lt(2), 0.0,
    ee.Number(tpw2.get('DateDist')).divide(ee.Number(21600000)) ));

var tpw = tpw1.expression('tpw1*time1+tpw2*time2',
    {'tpw1':tpw1,
    'time1':time1,
    'tpw2':tpw2,
    'time2':time2
    }).clip(image.geometry());
```

// Os coeficientes SMW são classificados de acordo com os valores TPW

```
var pos = tpw.expression(
    "value = (TPW>0 && TPW<=6) ? 0" +
    ": (TPW>6 && TPW<=12) ? 1" +
    ": (TPW>12 && TPW<=18) ? 2" +
    ": (TPW>18 && TPW<=24) ? 3" +
    ": (TPW>24 && TPW<=30) ? 4" +
    ": (TPW>30 && TPW<=36) ? 5" +
    ": (TPW>36 && TPW<=42) ? 6" +
    ": (TPW>42 && TPW<=48) ? 7" +
    ": (TPW>48 && TPW<=54) ? 8" +
    ": (TPW>54) ? 9" +
    ": 0",{TPW': tpw})
    .clip(image.geometry());
```

// Adicionar os valores de tpw à imagem como uma banda

```
var withTPW =
(image.addBands(tpw.rename('TPW'),['TPW'])).addBands(pos.rename('TPWpos'),['TPWpos']);

return withTPW
};
```

**ANEXO III. Código para gerar a *layer* referente à Emissividade do sensor ASTER**

```
// Obter a emissividade do ASTER
var aster = ee.Image("NASA/ASTER_GED/AG100_003")

//Obter o FVC do ASTER através do NDVI
var aster_ndvi = aster.select('ndvi').multiply(0.01);

var aster_fvc = aster_ndvi.expression('((ndvi-ndvi_bg)/(ndvi_vg - ndvi_bg))**2',
  {'ndvi':aster_ndvi,'ndvi_bg':0.2,'ndvi_vg':0.86});
aster_fvc = aster_fvc.where(aster_fvc.lt(0.0),0.0);
aster_fvc = aster_fvc.where(aster_fvc.gt(1.0),1.0);

// Determinar a emissividade da terra descoberta para a banda 14
exports.emiss_bare_band14 = function(image){
  return image.expression('(EM - 0.99*fvc)/(1.0-fvc)',{
    'EM':aster.select('emissivity_band14').multiply(0.001),
    'fvc':aster_fvc})
  .clip(image.geometry());
};
```

**ANEXO IV. Código para gerar a *layer* referente ao FVC do LS8**

```
exports.addBand = function(landsat){
  var wrap = function(image){

    var ndvi = image.select('NDVI')

    // Calcular FVC
    var fvc = image.expression('((ndvi-ndvi_bg)/(ndvi_vg - ndvi_bg))**2',
      {'ndvi':ndvi,'ndvi_bg':0.2,'ndvi_vg':0.86});
    fvc = fvc.where(fvc.lt(0.0),0.0);
    fvc = fvc.where(fvc.gt(1.0),1.0);
```

*Análise de dados térmicos de detecção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos*

```
return image.addBands(fvc.rename('FVC'));  
}  
return wrap  
};
```

## **ANEXO V. Código para gerar a *layer* referente ao NDVI do LS8**

```
exports.addBand = function(landsat){  
  var wrap = function(image){  
  
    // Escolher as bandas  
    var nir = ee.String(ee.Algorithms.If(landsat==='L8','B5','B4'))  
    var red = ee.String(ee.Algorithms.If(landsat==='L8','B4','B3'))  
  
    // Determinar NDVI  
    return image.addBands(image.expression('(nir-red)/(nir+red)',{  
      'nir':image.select(nir).multiply(0.0001),  
      'red':image.select(red).multiply(0.0001)  
    })).rename('NDVI'))  
  }  
  return wrap  
};
```

## **ANEXO VI. Código para gerar a *layer* referente à Emissividade do LS8**

```
var ASTERGED = require('users/sofiaermida/landsat_smw_lst:modules/ASTER_bare_emiss.js')  
  
// Esta função calcula a emissividade da banda TIR do LS8 usando o sensor ASTER e o FVC  
exports.addBand = function(landsat, use_ndvi){  
  var wrap = function(image){  
    var c13 = ee.Number(ee.Algorithms.If(landsat==='L8', 0.6820));  
    var c14 = ee.Number(ee.Algorithms.If(landsat==='L8',0.2578));  
    var c = ee.Number(ee.Algorithms.If(landsat==='L8',0.0584));
```

```

// Obter a emissividade ASTER
var emiss_bare = image.expression('c13*EM13 + c14*EM14 + c',{
  'EM13':ASTERGED.emiss_bare_band13(image),
  'EM14':ASTERGED.emiss_bare_band14(image),
  'c13':ee.Image(c13),
  'c14':ee.Image(c14),
  'c':ee.Image(c)
});

// Através da Emissividade determinada anteriormente calcular a emissividade para o LS8
var EMd = image.expression('fvc*0.99+(1-fvc)*em_bare',
  {'fvc':image.select('FVC'),'em_bare':emiss_bare});

// Calcular a emissividade diretamente da ASTER sem correção da vegetação
var aster = ee.Image("NASA/ASTER_GED/AG100_003")
  .clip(image.geometry());
var EM0 = image.expression('c13*EM13 + c14*EM14 + c',{
  'EM13':aster.select('emissivity_band13').multiply(0.001),
  'EM14':aster.select('emissivity_band14').multiply(0.001),
  'c13':ee.Image(c13),
  'c14':ee.Image(c14),
  'c':ee.Image(c)
});

// Selecionar qual a emissividade a produzir com base na seleção do utilizador
var EM = ee.Image(ee.Algorithms.If(use_ndvi,EMd,EM0));
return image.addBands(EM.rename('EM'));
}
return wrap

```

## **ANEXO VII. Código para gerar a *layer* referente à LST**

```
// Link para o código que calcula o Landsat LST
var LandsatLST = require('users/sofiaermida/landsat_smw_lst:modules/Landsat_LST.js')

// Selecionar a região de interesse, o intervalo de datas e o Landsat pretendido
var geometry = ee.Geometry.Rectangle([-8.91, 40.0, -8.3, 40.4]);
var satellite = 'L8';
var date_start = '2016-06-20';
var date_end = '2017-06-21';
var use_ndvi = true;

// Obter coleções com variáveis pretendidas: NDVI, FVC, TPW, EM, LST
var LandsatColl = LandsatLST.collection(satellite, date_start, date_end, geometry, use_ndvi)
print(LandsatColl)

// Selecionar a primeira função
var exImage = LandsatColl.median();

// Mascarar a água
var qa = exImage.select('pixel_qa');
var qa = exImage.select('pixel_qa').int64();
var mask = qa.bitwiseAnd(1 << 2)
exImage = exImage.updateMask(mask.not());

var cmap1 = ['blue', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red'];
Map.centerObject(geometry)
Map.addLayer(exImage.select('NDVI'),{min:0.0, max:1.0, palette:cmap1}, 'NDVI')
Map.addLayer(exImage.select('FVC'),{min:0.0, max:1.0, palette:cmap1}, 'FVC')
Map.addLayer(exImage.select('EM'),{min:0.95, max:0.99, palette:cmap1}, 'Emissivity')
Map.addLayer(exImage,{bands:['B10'], min:290, max:320, palette:cmap1}, 'TIR BT')
Map.addLayer(exImage,{bands:['LST'], min:280, max:320, palette:cmap1}, 'LST')
Map.addLayer(exImage.multiply(0.0001),{bands: ['B4', 'B3', 'B2'], min:0, max:0.3}, 'RGB')
```

## ANEXO VIII. Código para gerar os histogramas dos tipos de ocupação do solo em diferentes alturas do ano

```
// Link to the code that computes the Landsat LST
var LandsatLST = require('users/sofiaermida/landsat_smw_lst:modules/Landsat_LST.js')

// Selecionar a região de interesse e data pretendida
var geometry = ee.Geometry.Rectangle([-8.91, 40.0, -8.3, 40.4]);
var satellite = 'L8';
var date_start = '2017-03-20';
var date_end = '2017-06-21';
var use_ndvi = true;

// Obter a coleção do LS8 com a LST
var LandsatColl = LandsatLST.collection(satellite, date_start, date_end, geometry, use_ndvi)
print(LandsatColl)

var exImage = LandsatColl.median();

var cmap1 = ['blue', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red'];

Map.centerObject(geometry)
Map.addLayer(ua)
Map.addLayer(exImage.select('LST'),{min:290, max:320, palette:cmap1}, 'LST')
Map.addLayer(exImage.multiply(0.0001),{bands: ['B4', 'B3', 'B2'], min:0, max:0.3}, 'RGB')

var shape_city = ee.FeatureCollection(coimbra_city);
var shape_city = geometry;
var landcover = ua.clip(shape_city);
var landcover = ua;
var forests = landcover.expression(
  '(b1 == 0 && b2==140 && b3==0) ? 1 : 0',
  {'b1':landcover.select('b1'),
   'b2':landcover.select('b2'),
```

*Análise de dados térmicos de detecção remota para a caracterização de superfícies naturais e artificializadas em contextos distintos*

```
'b3':landcover.select('b3'))
.reduceToVectors({geometry: shape_city, scale: 30})
.filterMetadata("label","equals",1);
var green_urban = landcover.expression(
'(b1 == 140 && b2==220 && b3==0) ? 1 : 0',
{'b1':landcover.select('b1'),
'b2':landcover.select('b2'),
'b3':landcover.select('b3')})
.reduceToVectors({geometry: shape_city, scale: 30})
.filterMetadata("label","equals",1);
var cont_urban = landcover.expression(
'(b1 == 128 && b2==0 && b3==0) ? 1 : 0',
{'b1':landcover.select('b1'),
'b2':landcover.select('b2'),
'b3':landcover.select('b3')})
.reduceToVectors({geometry: shape_city, scale: 30})
.filterMetadata("label","equals",1);
var disc_urban_dense = landcover.expression(
'(b1 == 191 && b2==0 && b3==0) ? 1 : 0',
{'b1':landcover.select('b1'),
'b2':landcover.select('b2'),
'b3':landcover.select('b3')})
.reduceToVectors({geometry: shape_city, scale: 30})
.filterMetadata("label","equals",1);
var Extração_de_minérios = landcover.expression(
'(b1 == 191 && b2==0 && b3==0) ? 1 : 0',
{'b1':landcover.select('b1'),
'b2':landcover.select('b2'),
'b3':landcover.select('b3')})
.reduceToVectors({geometry: shape_city, scale: 30})
.filterMetadata("label","equals",1);
var landcov_shapes = ee.FeatureCollection([
forests.union(10).first().set({label:'Floresta'}),
```

```

green_urban.union(10).first().set({label:'Áreas Verdes'}),
disc_urban_dense.union(10).first().set({label:'Zona urbana densa e descontínua'}),
cont_urban.union(10).first().set({label: 'Zona urbana contínua'}),
Extração_de_minérios.union(10).first().set({label:'Extração de minérios e locais de despejo'})
]);
print(landcov_shapes)

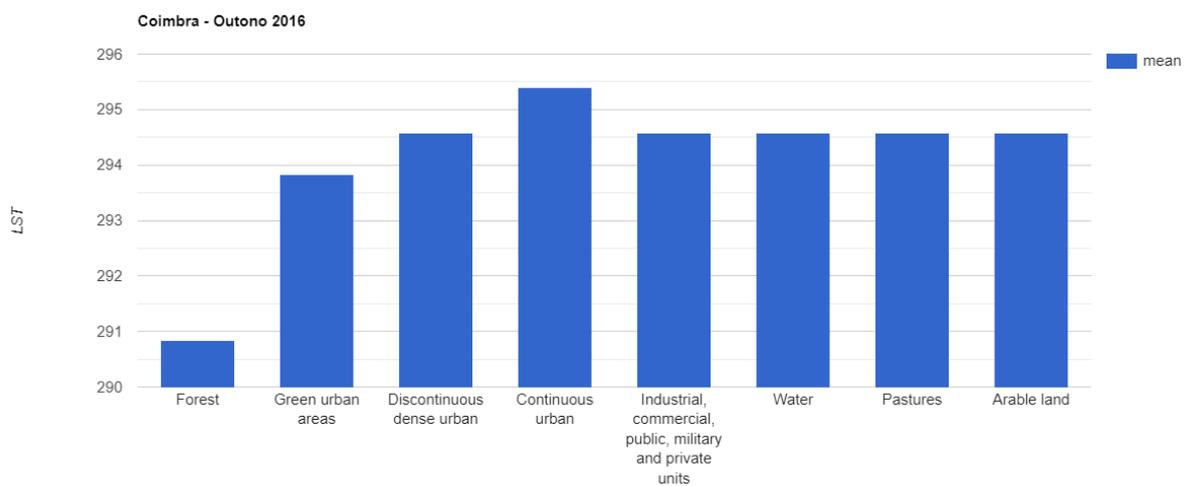
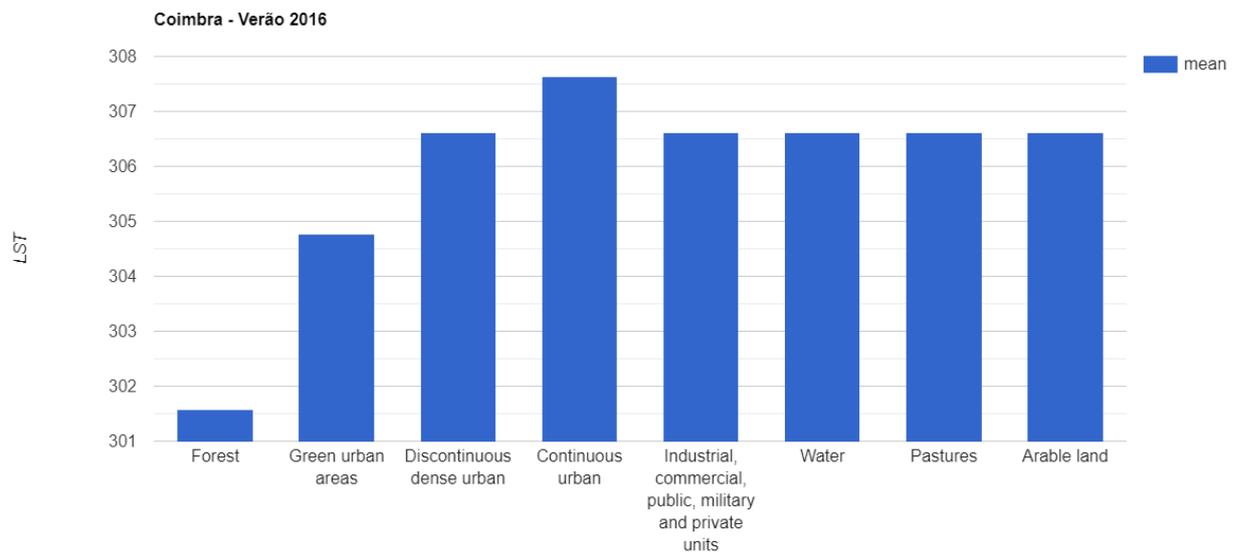
var TimeSeries = ui.Chart.image.seriesByRegion(//imageCollection, regions, reducer, band, scale,
xProperty, seriesProperty)

LandsatColl, landcov_shapes, ee.Reducer.mean(), 'LST', 10, 'system:time_start', 'label')
.setChartType('ScatterChart')
.setOptions({
title: 'Coimbra',
vAxis: {title: 'LST'},
lineWidth: 1,
pointSize: 4,
series: {
0: {color: '#008C00'},
1: {color: '#8CDC00'},
2: {color: '#BF0000'},
3: {color: '#800000'}
}
});
// conversor cor RGB para hexadecimal:
https://www.rapidtables.com/web/color/RGB_Color.html

var TimeSeries = ui.Chart.image.byRegion(//image, regions, reducer, scale, xProperty
exImage.select('LST'), landcov_shapes, ee.Reducer.mean(), 30, 'label')
.setChartType('ColumnChart')
.setOptions({
title: 'Coimbra - Primavera 2017',
vAxis: {title: 'LST'}
});
print(TimeSeries);

```

**ANEXO IX. Histogramas dos tipos de ocupação do solo em diferentes alturas do ano (Kelvin; K).**



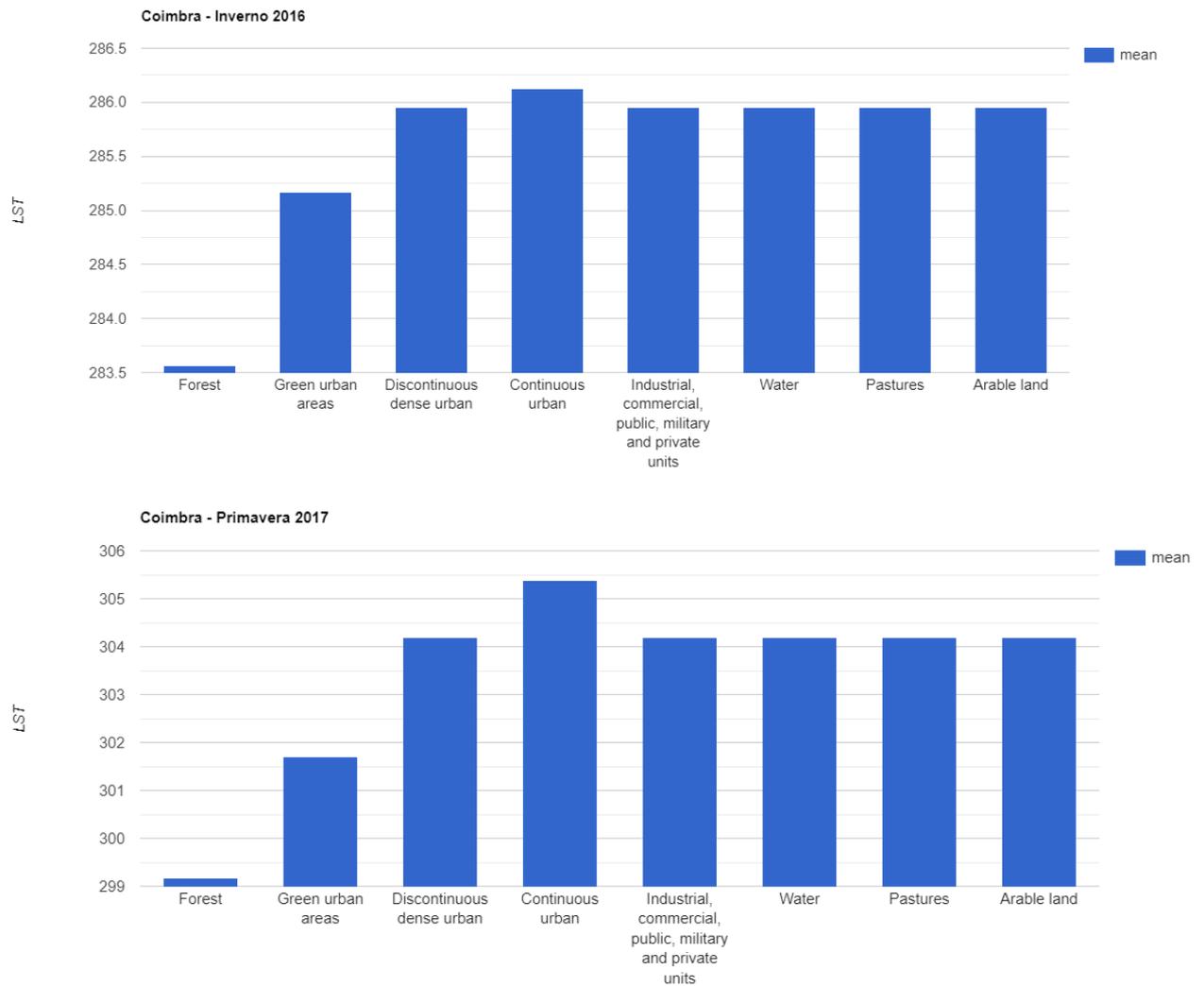


Figure 20. Histogramas representativos dos diferentes setores de ocupação do solo na superfície terrestre em função da temperatura de superfície, na cidade de Coimbra, em diferentes estações do ano. (a) Verão (junho a agosto de 2016); (b) Outono (setembro a novembro de 2016); (c) Inverno (dezembro de 2016 a fevereiro de 2017); (d) Primavera (março a maio de 2017).

## ANEXO X. Resultados estatísticos.

Tabela 6. Resultados estatísticos referentes à ocupação do solo.

<b><u>Valores Térmicos (Kelvin; K)</u></b>						
	<b>Valores Médios</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Verão de 2016</b>	<b>Outono de 2016</b>	<b>Inverno de 2016</b>	<b>Primavera de 2017</b>
<b>Floresta</b>	293,79	7,12	301,58	290,85	283,57	299,18
<b>Zonas Verdes Urbanas</b>	296,37	7,59	304,78	293,83	285,17	301,69
<b>Zonas urbanas densas e descontínuas</b>	297,83	8,19	306,61	294,58	285,96	304,18
<b>Zonas urbanas contínuas</b>	298,63	8,56	307,64	295,40	286,13	305,38
<b>Zonas industriais, comerciais, etc.</b>	297,83	8,19	306,61	294,58	285,96	304,18
<b>Massas de água</b>	297,83	8,19	306,61	294,58	285,96	304,18
<b>Zonas de cultivo</b>	297,83	8,19	306,61	294,58	285,96	304,18
<b>Pastagens</b>	297,83	8,19	306,61	294,58	285,96	304,18