



UNIVERSIDADE D  
**COIMBRA**

Joana Raquel Barreto Domingues

**CARATERIZAÇÃO DE VULCANISMO SUBMARINO  
POR TÉCNICAS DE DETEÇÃO REMOTA ENTRE  
2000 E 2018**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências no ramo de Ambiente e Ordenamento, orientada pelo Professor Doutor Vasco Manuel Jorge Soares Mantas e pelo Professor Doutor Alcides José Sousa Castilho Pereira e apresentada ao Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra

fevereiro de 2020



Universidade de Coimbra  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Ciências da Terra

# CARATERIZAÇÃO DE VULCANISMO SUBMARINO POR TÉCNICAS DE DETEÇÃO REMOTA ENTRE 2000 E 2018

Joana Raquel Barreto Domingues

Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências no ramo de Ambiente e Ordenamento orientada pelo Professor Doutor Vasco Manuel Jorge Soares Mantas e pelo Professor Doutor Alcides José Sousa Castilho Pereira.

fevereiro de 2020



# Resumo

---

Cerca de 80% da atividade vulcânica na Terra ocorre em ambientes submarinos, ejetando grandes quantidades de material no oceano e formando nova crosta oceânica. A localização remota de eventos vulcânicos submarinos faz com que seja difícil a sua monitorização, pelo que a deteção de produtos e processos vulcânicos que atingem a superfície através de técnicas de observação da Terra, nomeadamente a análise de dados oceânicos referentes a eventos vulcânicos submarinos, permite a aquisição de dados relativos a erupções submarinas em tempo quase real.

Para responder a esta problemática, foi criada uma base de dados dos vulcões pré-registados com erupções submarinas entre o período 2000 e 2018, com 60 erupções referentes a 31 vulcões diferentes. Os dados, são na sua maioria, relativos ao sensor MODIS – Aqua e Terra - Foram detetadas 450 imagens de satélite com observação de plumas de descoloração associadas a eventos vulcânicos submarinos, tendo sido posteriormente selecionadas 82 destas imagens, através do que se considerou serem as imagens mais representativas para a erupção em causa, com a finalidade de passar à extração das assinaturas espectrais.

As plumas oceânicas referentes a Vulcanismo Submarino podem ser diferenciadas de outros materiais à superfície, como por exemplo, fitoplâncton, pela sua assinatura espectral. As assinaturas espectrais extraídas de 263 pontos de amostragem referentes a plumas vulcânicas apresentam vários comportamentos diferentes, podendo ainda assim ser diferenciadas entre si e classificadas em várias classes.

A deteção remota é, por isso, uma técnica eficiente para a monitorização em tempo quase real de erupções vulcânicas submarinas.

Diante os resultados obtidos nesta dissertação, recomenda-se a aplicação destas técnicas para a deteção, monitorização e estudo regular destes eventos.

Palavras-chave: Vulcanismo Submarino; Deteção Remota; Análise Espectral; Séries Temporais; Plumais de Descoloração



# Abstract

---

Around 80% of Earth's volcanic activity happen in submarine environments, ejecting large amounts of material into the ocean and forming new oceanic crust. These events are difficult to monitor due to the fact that they occur in remote places, so detection of volcanic processes and products that reach the surface through Earth's observation techniques, namely analysis of oceanic data related to submarine volcanic events, allows the acquisition of data related to underwater eruptions in near real time.

To answer this problem, a database of pre-registered submarine volcanic eruptions between 2000 and 2018 was created, with results stating 60 eruptions referring to 31 different volcanoes. This data is in the majority, related to Modis Aqua e Terra sensors. A total of 450 satellite images were detected through observations of discoloration plumes associated with underwater events, and 82 of these images were subsequently selected for extraction of spectral signature, through what were considered to be the most representative images for the eruption in question, in order to proceed to the extraction of spectral signatures.

Oceanic plumes referring to Submarine Volcanism can be differentiated from other materials on the surface, such as phytoplankton, by their spectral signature. The spectral signatures extracted from 263 sampling points have similar characteristics within the different types of discoloration plumes, and can therefore be classified into several classes.

This fact demonstrates why remote sensing is an efficient technique for monitoring near real time data of underwater volcanic eruptions.

In view of the results obtained in this dissertation, it is recommended the application of these techniques for regular detection, monitoring and study of these events.

Keywords: Submarine volcanism; Remote Sensing; Spectral Analysis; Time Series; Discoloration Plumes



# Agradecimentos

---

Este trabalho representa a conclusão de mais uma etapa na minha vida acadêmica, que contribuiu para o meu crescimento e enriquecimento pessoal e profissional. Tudo se deve a um conjunto de pessoas que sempre me apoiaram em qualquer momento.

Primeiramente, aos meus pais, ao meu irmão e restante família. Pelo apoio incondicional, pelas palavras de carinho, e por estarem sempre lá quando preciso e quando não preciso. Nada disto era possível sem vocês.

Em segundo lugar ao Doutor Vasco Mantas. Pela oportunidade dada, disponibilidade e paciência. Pela orientação ao longo do trabalho, todos os conselhos, indicações e apoio.

Ao Doutor Alcides Pereira, pela disponibilidade, compreensão e indicações prestadas.

Aos meus amigos de sempre, por acreditarem em mim e serem os melhores! Aos amigos do curso, que me acompanharam durante estes anos. De certeza que não me esqueço de vocês tão cedo.

Ao Luís André. Por ser o meu editor pessoal, por toda a paciência, pela calma transmitida e pelo apoio infinito.

E em último, mas sempre no meu coração. Ao vô 'Berto! Isto é para ti. Obrigada por sempre acreditares em mim, por me fazeres querer sempre mais e melhor. Nunca te esquecerei.

A todos, o meu Obrigado.



# Índice

---

1.	Introdução	1
2.	Estado de Arte	3
3.	Conceitos Gerais de Vulcanologia	7
3.1.	Vulcanismo Principal	7
3.1.1.	Origem, Migração e Armazenamento do Magma	7
3.1.2.	Erupções Vulcânicas	9
3.1.3.	Composição das lavas	11
3.2.	Vulcanismo Submarino	12
3.3.	Manifestações Secundárias	15
3.4.	Produtos vulcânicos	16
3.5.	Erupções conhecidas e Riscos associados	19
3.6.	Monitorização	22
4.	Deteção Remota	26
4.1.	Fundamentos de Deteção Remota	26
4.1.1.	Radiação eletromagnética	26
4.1.2.	Interações da REM	27
4.1.3.	Resoluções	28
4.2.	Sistemas de DR e características	30
4.2.1.	Órbita dos satélites	31
4.3.	Missões de satélite	31
4.4.	Satélites e sensores	33
4.4.1.	Meteorológicos	34
4.4.2.	Satélites de Observação da Terra	34
4.5.	Processamento e Interpretação de imagens	38
4.6.	Aplicações de Deteção remota na área do Vulcanismo Submarino	39
4.6.1.	Limitações e vantagens	40
4.6.2.	Exemplos de aplicações de DR em Vulcanismo	42
5.	Enquadramento geológico e tectónico das regiões em estudo	43
5.1.	Izu-Bonin-Mariana	43
5.2.	Tonga-Kermadec e New Hebrides	44
5.3.	Aleutian Islands e Juan de Fuca Ridge	45
5.4.	East Pacific Rise	46
5.5.	Oceano Atlântico Norte	47

5.6.	Oceano Atlântico Sul	48
5.7.	Mar vermelho	48
6.	Metodologia	49
6.1.	Recolha de informação e Aquisição de dados	50
6.2.	Análise de dados	52
7.	Apresentação de resultados	57
7.1.	Plumas de origem biológica	60
7.2.	Plumas referentes a tapetes de pedras pomes	61
7.3.	Plumas de tonalidade verde	64
7.4.	Plumas de tonalidade castanha	72
7.5.	Testes de classificação	74
8.	Discussão de resultados	76
9.	Considerações Finais	88
10.	Bibliografia	91

# Índice de Figuras

---

<b>Figura 1</b> - Mapa da localização de vulcões ativos (Mapa retirado de: NOAA)	8
<b>Figura 2</b> - A) Erupção fissural (Fonte: LNEG); B) Erupção do tipo central (Fonte: National Geographic)	9
<b>Figura 3</b> - Nascimento de uma nova ilha, Niijima, a SO de Nishinoshima, a 8 de dezembro 2013. Imagem adquirida pelo EO-1 - ALI (Fonte: NASA)	14
<b>Figura 4</b> - <b>A)</b> Cinzas libertadas no Monte Agung a 4 dezembro 2017 (Fonte: National Geographic); <b>B)</b> Fluxos de lava na erupção de 1984 em Kilauea (Fonte: NASA); <b>C)</b> Atividade explosiva em Hunga Tonga-Hunga Há'apai a 15 janeiro de 2015 (Fonte: USGS); <b>D)</b> Tapetes de pedras pomes e plumas associadas em Home Reef a 13 agosto de 2006 – MODIS-A (Fonte: NASA); <b>E)</b> Pluma de descoloração azul turquesa/esverdeadas em El Hierro a 23 outubro de 2011 – MODIS-T (Fonte: NASA); <b>F)</b> Plumadas de descoloração castanhas em Nishinoshima a 26 agosto de 2014 (Fonte: EOS)	19
<b>Figura 5</b> - Erupção do Anak Krakatau a 22 de setembro de 2018. Imagem adquirida pelo MSI, a bordo do Sentinel 2 (Fonte: NASA)	20
<b>Figura 6</b> - <b>A)</b> Balões de lava, erupção Serreta, Açores (Fonte: Forjaz et al 2000); <b>B)</b> Explosões relativas ao vulcão Kavachi (Fonte: National Geographic); <b>C)</b> Lagoa do Fogo, Açores (Fonte: National Geographic); <b>D)</b> Pedras Pomes referentes ao vulcão Home Reef cobrem parcialmente North Bay e a costa Sul de Kadavu, Fiji (Fonte: Smithsonian)	22
<b>Figura 7</b> - Nuvens de cinzas relativa à erupção do vulcão Eyjafjallajökull, em 2010. Imagem adquirida a 11 de maio de 2010 pelo MODIS-T (Fonte: NASA)	23
<b>Figura 8</b> - Espectro Eletromagnético (Fonte: NASA)	27
<b>Figura 9</b> - Relação entre a energia solar incidente no topo da atmosfera e na superfície terrestre Fonte: (Maio, 2008)	28
<b>Figura 10</b> - Resolução espacial sobre Hilton Head, SC (Fonte: Jensen, 2015)	29
<b>Figura 11</b> - Resolução Radiométrica	29
<b>Figura 12</b> - Assinaturas espectrais dos diferentes constituintes da água. Fonte: GUIA Notas: CDOM – Coloured Dissolved Organic Matter; linhas a sólido representam os espectros idealizados para cada material; a linha a tracejado representa o espectro de água pura; a seta indica o aumento das concentrações	33
<b>Figura 13</b> - Imagem adquirida pelo Landsat 8 em Gladstone, Austrália a 11 de setembro de 2017 (Fonte: NASA, 2019)	35
<b>Figura 14</b> - Compósito VIIRS de uma porção da Afro-Eurásia a 2 de julho de 2019 (Fonte: NASA)	38
<b>Figura 15</b> - Influências costeiras na cor do oceano (Fonte: ARSET, NASA) Nota: CDOM – Matéria orgânica dissolvida colorida; Nap – Partículas não algais	41
<b>Figura 16</b> - Localização dos vulcões em estudo localizados na área Izu-Bonin-Mariana (Fonte dos dados batimétricos: GEBCO)	43
<b>Figura 17</b> - Localização dos vulcões em estudo localizados na área Tonga-Kermadec e New Hebrides (Fonte dos dados batimétricos: GEBCO)	45

<b>Figura 18</b> - Localização dos vulcões em estudo localizados na área das Aleutian Islands e Juan de Fuca Ridge (Fonte dos dados batimétricos: GEBCO)	46
<b>Figura 19</b> - Localização dos vulcões em estudo localizados na área EPR (Fonte dos dados batimétricos: GEBCO)	46
<b>Figura 20</b> - Localização dos vulcões em estudo localizados na área referente ao Oceano Atlântico Norte (Fonte dos dados batimétricos: GEBCO)	47
<b>Figura 21</b> - Localização dos vulcões em estudo localizados na área referente ao Oceano Atlântico Sul (Fonte dos dados batimétricos: GEBCO)	48
<b>Figura 22</b> - Localização dos vulcões em estudo localizados no Mar Vermelho	48
<b>Figura 23</b> - Esquema da metodologia utilizada neste trabalho	49
<b>Figura 24</b> - EOSDIS WorldView, NASA	51
<b>Figura 25</b> - Ferramentas usadas no software SeaDAS e representação com recurso a dados da erupção do El Hierro, Ilhas Canárias, no dia 23 de outubro de 2011, com o produto de clorofila	53
<b>Figura 26</b> - Plumas de descoloração referentes ao El Hierro no dia 23 de outubro de 2011, observadas na imagem de cor real (A) e representadas nos dados MODIS-T (B) através do SeaDAS.	54
<b>Figura 27</b> - Localização das erupções vulcânicas submarinas estudadas entre os anos 2000 e 2018 (Mapa de fundo: ESRI)	57
<b>Figura 28</b> - Análise da erupção em Home Reef referente a dia 9 de agosto e a 4 de setembro de 2006	62
<b>Figura 29</b> - Diferenças entre os vários comprimentos de onda em plumas de descoloração referentes ao dia 10 de agosto de 2006 em Home Reef	63
<b>Figura 30</b> - Análise da erupção em Havre Seamount referente a dia 21 de julho de 2012	64
<b>Figura 31</b> - Análise da erupção referente ao Bogoslof de dia 7 de janeiro, 12 e 13 de junho de 2017	65
<b>Figura 32</b> - Análise da erupção referente ao El Hierro de dia 23 de outubro e 16 de dezembro de 2011 e de dia 10 de janeiro de 2012	66
<b>Figura 33</b> - Análise da erupção referente ao vulcão 243091 de dia 1 de outubro de 2001	67
<b>Figura 34</b> - Análise da erupção em Hunga Tonga-Hunga Há'apai de dia 17 de março de 2009 e de dia 15 de janeiro de 2015	67
<b>Figura 35</b> - Análise da erupção referente ao vulcão 243030 de dia 27 de janeiro e 1 de fevereiro de 2017	68
<b>Figura 36</b> - Análise da erupção referente ao Zubair Group dos dias 31 de dezembro de 2011, 31 de outubro e 11 de novembro de 2013	69
<b>Figura 37</b> - Análise da erupção referente ao Kavachi de dia 20 de janeiro de 2002 e 6 de janeiro de 2003	69
<b>Figura 38</b> - Análise da erupção referente ao Metis Shoal de dia 14 de setembro de 2005	70
<b>Figura 39</b> - Análise da erupção referente ao Monowai de dia 23 de outubro de 2009 e de 7 de agosto de 2011	70

<b>Figura 40</b> - Análise da erupção referente ao Fukutoku-Oka-no-Ba de dia 3 de julho de 2005 e de 12 de fevereiro de 2010	71
<b>Figura 41</b> - Análise da erupção referente ao South Sarigan Seamount de dia 30 de maio de 2010	72
<b>Figura 42</b> - Análise da erupção referente ao Ioto de dia 22 de setembro de 2001 e 30 de abril de 2012	73
<b>Figura 43</b> - Análise da erupção referente ao Nishinoshima de dia 26 de agosto de 2014	73
<b>Figura 44</b> – Árvore de decisão resultante utilizando o algoritmo J48	75
<b>Figura 45</b> - Produtos sst referentes a Home Reef de 10 de agosto de 2006, Havre Seamount de 21 de julho de 2012 e Zubair Group de 11 de novembro de 2013 (Notas: sst – sea surface temperature / temperatura da superfície do mar)	80



# Índice de tabelas e gráficos

---

<b>Tabela 1</b> - Análise química de rochas provenientes da erupção do vulcão Eyjafjallajökull em 2010 (Fonte: Háskóli Ísland)	11
<b>Tabela 2</b> - Produtos de Vulcanismo	16
<b>Tabela 3</b> - Instrumentos de monitorização de vulcões relativamente aos sinais percussores (Adaptado de National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2017)	25
<b>Tabela 4</b> - Características da série Landsat (Adaptado de Rocha, 2002)	35
<b>Tabela 5</b> - Excerto da base de dados construída referente a erupções vulcânicas submarinas entre os anos 2000 e 2018      Legenda: a) > sem dados de satélite disponíveis; ✓ > detetadas plumas vulcânicas; - > não houve deteção de plumas vulcânicas	58
<b>Gráfico 1</b> - Assinaturas espectrais de plumas de descoloração associadas a tapetes de pedras pomes (Notas: HR - Home Reef; HS – Havre Seamount)	64
<b>Gráfico 2</b> - Assinatura espectral de plumas de descoloração de tonalidade verde (Notas: HR - Home Reef; EH - El Hierro)	81
<b>Gráfico 3</b> - Inconstâncias nas assinaturas espectrais de plumas de descoloração de tonalidade verde referentes ao El Hierro	72
<b>Gráfico 4</b> - Assinaturas espectrais associadas a plumas de descoloração verdes de concentrações mais baixas no vulcão Kavachi	72
<b>Gráfico 5</b> - Assinaturas espectrais de plumas de descoloração de tonalidades castanhas (Notas: IO – Ioto; NI – Nishinoshima)	74
<b>Gráfico 6</b> - Assinaturas espectrais referentes a oceano e 'blooms' de clorofila biológica (Notas: BO – Bogoslof; ZU – Zubair Group; EH – El Hierro)	61
<b>Tabela 6</b> - Resultados dos testes de classificação - métodos "Information Gain" e "Ranker"	74
<b>Gráfico 7</b> - Assinatura espectral de pluma de descoloração de tonalidade verde referente à 1ª fase	81
<b>Gráfico 8</b> - Assinatura espectral de pluma de descoloração de tonalidade verde referente à 3ª fase	82
<b>Gráfico 9</b> - Assinatura espectral de pluma de descoloração de tonalidade verde referente à 4ª fase	82
<b>Gráfico 10</b> - Assinatura espectral de pluma de descoloração de tonalidade verde referente à 5ª fase	83
<b>Gráfico 11</b> - Assinaturas espectrais incompatíveis com as fases propostas (Notas: HH – Hunga Tonga-Hunga Há'apai; FU – Fukutoku-Oka-no-Ba; KA – Kavachi)	83



# Siglas

---

**AIRS** – Atmospheric InfraRed Sounding

**AMSU** – Advanced Microwave Sounding Unit

**aot** – aerosol optical thickness

**ASTER** – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection

**AVA** – Aster Volcano Archive

**AVHRR** – Advanced Very High-Resolution Radiometer

**CERES** – Clouds and the Earth's Radiant Energy System

**DOAS** – Differential Observation Absorption Spectrometer

**DR** – Detecção Remota

**EOS** – Earth observing system

**EPR** – East Pacific Rise

**ESRI** – Environmental Systems Research Institute

**GEBCO** – General Bathymetric Chart of the Oceans

**GERB** – Geostationary Earth Radiation Budget

**GNSS** – Global Navigation Satellite System

**GPS** – Global Positioning System

**HSB** – Hue Saturation Brightness

**IASI** – Infrared Atmospheric Sounding Interferometer

**IFOV** – Instantaneous field of view

**InSAR** – Interferometric Analysis of Synthetic Aperture Radar

**kd 490** – Coeficiente de Atenuação Difuso

**LIDAR** – Light Detection And Ranging

**LNEG** – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

**MERIS** – Medium Resolution Imaging Spectrometer

**Mirova** – Middle Infrared Observation of Volcanic Activity

**MISR** – Multi-angle imaging spectroradiometer

**MODIS** – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

**MOPITT**– Measurement of Pollution in the Troposphere

**NASA** – National Aeronautics and Space Administration

**NOAA** – National Oceanic And Atmospheric Administration

**NW Rota-1** – Northwest Rota-1

**OC** – Ocean Color

**OP-FTIR**– Open-path Fourier-transform Infrared Spectrometers

**RADAR** – Radio Detection And Ranging

**REM** – Radiação Eletromagnética

**SAR** – Radar de Abertura Sintética

**SeaWiFS** – Sea-Viewing Wide Field-of-view Sensor

**SEVIRI** – Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager

**SONAR** – Sound Navigation and Ranging

**sst** – Sea surface temperature

**USGS** – United States Geological Survey

**VEI** – Volcanic Explosivity Index

**VIIRS** – Visible Infrared Imaging Radiometer Suite



# 1. Introdução

---

A monitorização de eventos submarinos vulcânicos é necessária para maior entendimento dos processos de formação de crosta oceânica e para a mitigação dos riscos associados a este tipo de atividade. Para a criação de uma rede de monitorização é necessário o estudo de eventos passados, nomeadamente a caraterização de erupções submarinas. As técnicas de deteção remota permitem a deteção e monitorização de plumas associadas a eventos vulcânicos submarinos em tempo quase real e a baixo custo.

A presente dissertação desenvolveu-se devido ao gosto pessoal por Vulcanologia. Posto isto, foi-me proposto realizar este trabalho com o objetivo principal de caraterizar eventos vulcânicos submarinos através de técnicas de deteção remota entre os anos de 2000 e 2018.

Os objetivos deste trabalho passam por:

- Aquisição de conhecimento em Vulcanologia;
- Determinação de uma metodologia concreta e precisa, com a finalidade de diferenciar as diferentes plumas de descoloração através das suas assinaturas espectrais;
- Utilização de técnicas de *machine learning* para avaliar o desempenho de um modelo criado e baseado nos dados adquiridos com a metodologia utilizada;
- Caraterização das erupções submarinas no período de 2000 e 2018.

O objetivo futuro deste trabalho será, portanto, a monitorização dos oceanos. Servirá como plataforma inicial para a possível criação de um sistema de monitorização preciso, que consiga detetar e monitorizar este tipo de eventos, com o intuito de mitigar os riscos associados. Encontra-se estruturado em várias partes distintas, de acordo com a sua informação.

Primeiramente, um capítulo dedicado ao Estado da Arte, onde está resumido o conteúdo da dissertação num só capítulo. Serve como introdução ao tema em estudo.

O capítulo referente ao Vulcanismo, apresenta uma secção inicial destinada ao Vulcanismo em geral – desde a origem, migração e armazenamento do magma, à composição das lavas – passando depois para o Vulcanismo Submarino. São ainda descritos os tipos de produtos vulcânicos associados tanto a Vulcanismo subaéreo como a Vulcanismo Submarino, os riscos associados a este tipo de erupções e a monitorização realizada na tentativa de mitigação.

No capítulo seguinte relacionado com a Detecção Remota, são descritos os princípios fundamentais desta área, os sistemas, sensores e as suas caraterísticas, assim como missões já realizadas. As técnicas de processamento e interpretação das imagens adquiridas por Detecção

## 1. Introdução

Remota são esclarecidas neste capítulo, bem como exemplos desta aplicação em Vulcanismo e limitações/vantagens da sua utilização.

No capítulo referente à geologia, as áreas onde os vulcões em estudo se encontram localizados, foram caracterizadas de maneira geral.

No que toca à metodologia, foram identificados os métodos, programas e técnicas utilizadas para a recolha e análise dos dados referentes ao período estudado. Apresenta, portanto, os parâmetros que foram considerados necessários para a criação de uma base de dados, como foi realizada a deteção de produtos à superfície, assim como onde e de que modo foram adquiridos os dados referentes às datas de eventos significativos, quais os programas utilizados para este efeito e para a análise dos dados adquiridos, entre outros.

De seguida, foram apresentados os resultados, estando estruturados da seguinte maneira: apresentação de um excerto da base de dados referente às erupções vulcânicas submarinas em estudo; determinação dos vulcões que registam ou não, manifestações à superfície. Dos vulcões que apresentavam produtos à superfície, foi realizada uma pequena descrição dos processos vulcânicos observados, sendo exposta a imagem de cor real relativa à data onde se detetou plumas, o produto MODIS referente à mesma data e a assinatura espectral extraída.

A discussão de resultados, mostra como estes dados podem ser divididos entre si, formando diferentes classes e comparando com outros trabalhos. Através deste capítulo é perceptível a eficácia do modelo criado neste trabalho.

## 2. Estado de Arte

---

O Vulcanismo Submarino é responsável pela formação da crosta submarina que se estende pelas bacias oceânicas, cobrindo aproximadamente dois terços da Terra e fazendo por isso, com que fosse um dos processos geológicos mais importantes do Planeta (Rubin et al., 2012). É estimado que cerca de 80% da atividade eruptiva ocorra em ambientes submarinos. Os vulcões submarinos desenvolvem-se no fundo do mar atingindo várias profundidades, podendo mesmo romper a superfície marítima e formar uma ilha vulcânica. A distribuição espacial destas ilhas segue geralmente o formato dos limites de placas tectónicas, havendo, no entanto, vários enquadramentos tectónicos e físicos onde é possível a sua formação. As observações de Vulcanismo Submarino são mais comuns no Oceano Pacífico do que no Oceano Atlântico (Eugenio, Martin, Marcello, & Fraile-Nuez, 2014; Mantas, Pereira, & Morais, 2011). Devido a serem eventos remotos e geralmente de curta duração, a sua observação direta é escassa – a primeira observação direta de uma erupção submarina através de um veículo operado remotamente ocorreu entre 2004 e 2006, referente ao vulcão NW-Rota 1, e em 2011, do vulcão West Mata a uma profundidade de 1 200 metros.

A composição química das plumas e a profundidade à qual se encontra a abertura do cone, são fatores que influenciam o tipo de erupção. No entanto, a maior parte do conhecimento sobre a composição química das plumas é relativa a fontes hidrotermais.

Durante erupções submarinas, análises realizadas à coluna de água nas proximidades do local de erupção mostram que grandes quantidades de material são injetadas no oceano – de variados tamanhos, texturas e composições – sendo por isso, considerado uma fonte possível de nutrientes (Mantas et al., 2011; Meyer, Akerman, Proskurowski, & Huber, 2013; O'Malley et al., 2014; Santana-Casiano et al., 2013).

Visto que a maior parte deste tipo de erupções ocorre sem que sejam detetadas e monitorizadas, a sua análise depende de relatórios de observações subaéreas, à superfície e/ou subaquáticas, análises sísmicas e implantações de redes hidroacústicas de monitorização (Green et al., 2013). A maior parte da deteção é feita devido à observação de manifestações de Vulcanismo à superfície, tais como debris, tapetes de pedras pomes, cinzas, plumas de descoloração, explosões, entre outros (Santana-Casiano et al., 2013). Estas observações permitem adquirir mais informação sobre os fundos marinhos e os processos associados a erupções vulcânicas em profundidade, visto que a compreensão dos processos associados a estes eventos é pouca quando comparada a vulcões subaéreos.

## 2. Estado da Arte

Tal como em erupções subaéreas, a atividade vulcânica submarina tem riscos associados, desde tsunamis, nuvens de cinzas que afetam o tráfego aéreo, libertação de componentes tóxicos, entre outros. A monitorização efetiva e a caracterização de eventos são formas de mitigação dos riscos vulcânicos associados a erupções submarinas – quando existe uma monitorização em tempo quase real de um tapete de pedras pomes, por exemplo, é possível alterar rotas de frota marítima e evitar assim danos causados por este produto.

Em ambiente submarino, a monitorização é mais difícil do que em terra dado que as observações são tipicamente limitadas a redes sísmicas terrestres e a pesquisas infrequentes efetuadas por navios. Técnicas de deteção remota conseguem fornecer a informação necessária sobre os processos relativos a erupções submarinas, e ao mesmo tempo, servir como ferramenta de monitorização dos oceanos para detetar alterações na superfície ao redor do local da erupção.

Por Deteção Remota, entendemos a aquisição de informações sobre um determinado objeto sem haver contacto direto com o próprio objeto. Olhar por uma janela ou métodos como indução eletromagnética podem ser considerados como deteção remota, no entanto, este termo passou a indicar que o sensor e o objeto detetado estão remotamente separados. A Deteção Remota pode ser definida pelo uso de sensores digitais a bordo de plataformas aéreas ou espaciais que têm como objetivo a aquisição periódica de dados de observação da Terra e a análise dos dados para interpretação, processamento e análise dos atributos do objeto em estudo (Gupta, 2017).

São várias as aplicações dentro do domínio da observação da Terra realizada por plataformas espaciais: meteorologia, climatologia, geologia, poluição costeira, dinâmica dos ecossistemas e/ou oceanos, agricultura, entre outros.

Neste caso específico de caracterização de erupções vulcânicas submarinas, utilizamos dados de *Ocean Colour* – dados da cor do oceano. O objetivo da análise destes dados é estimar com precisão os espectros de radiação que são transmitidos pela água, de maneira a quantificar outras propriedades óticas e geofísicas – concentração de clorofila, temperatura da superfície do mar, entre outros (McClain, 2009).

As plumas de descoloração são um dos produtos mais fáceis de detetar através de Deteção Remota, e apresentam geralmente cores variadas que dependem da concentração em ferro e alumínio na água – estas concentrações aumentam com atividade vulcânica (Ossaka, Hirabayashi, Nogami, Tsuchide, & Adachi, 1996; Urai & Machida, 2005). Através do estudo de dados referentes a este tipo de plumas é possível a estimação do ponto de erupção e da intensidade das mesmas, a partir da tonalidade e dimensões da área de descoloração (Nogami, Yoshida, & Ossaka, 1993).

## Caraterização de Vulcanismo Submarino por Técnicas de Detecção Remota

Imagens de múltiplos sensores - MODIS, ASTER, EO-1 ALI, Landsat-7 – e com várias resoluções temporais, foram processadas para monitorizar a área ao redor dos pontos de erupções submarinas, neste caso plumas de descoloração – fornecendo informações de concentração de vários parâmetros oceanográficos como: concentração de *clorofila-a*, total de sedimentos em suspensão, coeficiente de atenuação difuso, entres outros – com o intuito de caraterizar estas erupções (Coca et al., 2014; Shi & Wang, 2011; Urai, 2014; Urai & Pieri, 2011). Sensores de resoluções temporais altas como o MODIS, permitem determinar a data de início da erupção tais como a duração da mesma, a distribuição de plumas de descoloração de água, anomalias nas concentrações de clorofila e volume e extensão de tapetes de pedras pomes, por exemplo. Sensores de alta resolução espacial, como o ASTER, já foram utilizados para deteção de plumas de descoloração e medição da temperatura superficial no ponto acima da erupção. O coeficiente de atenuação difusa é um indicador de águas turvas e varia antes, durante e depois da erupção (Eugenio et al., 2014).

Através da observação de satélites, conseguem-se obter dados globais em escalas espaciais e temporais de alta resolução e baixo custo, permitindo assim a monitorização destes parâmetros ao longo de grandes séries temporais (Sutcliffe, Catalão, & Brito, 2016). No que toca à monitorização de erupções vulcânicas submarinas, podemos afirmar que o melhor indicador de atividade são as plumas de descoloração oceânica e que a deteção destas plumas é mais eficaz através de técnicas de Detecção Remota (Urai, 2014).

## 2. Estado da Arte

## 3. Conceitos Gerais de Vulcanologia

---

Nos princípios da formação da Terra, o Vulcanismo desempenhou um papel determinante. O processo de acreção e diferenciação da Terra fez com que esta tenha uma estrutura em camadas concêntricas de diferente composição química e mineralógica, temperatura, pressão e profundidade. O conhecimento da propagação de ondas sísmicas em diferentes meios foi o ponto essencial para a criação do modelo da estrutura interna da geosfera.

Internamente, a Terra apresenta várias camadas: o núcleo interno, dos 5 140 km até ao centro da Terra; o núcleo externo, dos 2 900 km até aos 5 140 km; o manto que se estende até cerca de 2 900 km e a crosta que pode atingir os 70 km de espessura. O manto encontra-se dividido entre manto superior – Astenosfera – até aos 660 km de profundidade e manto inferior – Mesosfera. A zona que divide estas duas camadas, é chamada de zona de transição ou Camada D e é onde as plumas mantélicas começam a sua ascensão. No entanto, é na crosta terrestre que se verificam manifestações de atividade vulcânica (Gupta, 2011).

### 3.1. Vulcanismo Principal

O Vulcanismo é uma manifestação da geodinâmica interna da Terra através da ascensão do magma pelo manto e crosta terrestre até à sua erupção à superfície.

O comportamento dos vulcões à superfície está relacionado com a dinâmica dos reservatórios de magma em profundidade. Desta maneira, o estudo dos magmas primitivos, ou seja, magmas que exibem menos diferenciação (cristalização fracionada, assimilação ou mistura com outros magmas) é uma ferramenta para uma melhor compreensão e reconstrução dos processos de fusão e migração do magma.

#### 3.1.1. Origem, Migração e Armazenamento do Magma

Magmas vulcânicos têm origem na fusão parcial de materiais do núcleo ou da astenosfera ou transformação de litosfera em manto. Os contrastes de densidade entre o magma e a rocha-mãe; os contrastes físicos da rocha-mãe – elasticidade, temperatura e descontinuidades pré-existentes – desempenham um papel essencial na formação e crescimento dos reservatórios de magma (Acocella, 2014). Podemos encontrar estes magmas em dorsais oceânicas, em zonas de subducção, ilhas oceânicas, entre outros.

Existem vários processos de ascensão do magma, como diferenças de pressão e temperatura, diferença de densidades entre o magma e a rocha envolvente, por exemplo.

### 3. Introdução ao Vulcanismo

Posteriormente o magma ascende até à superfície através de diques. À medida que a fusão aumenta e o magma ascende, encontra outras bolsas de magma e a sua velocidade aumenta (Cruden & Weinberg, 2018). Embora algum magma possa ascender diretamente até à superfície, a maior parte tem um período de armazenamento durante a subida. O armazenamento, feito numa câmara magmática, pode ser permanente, onde o magma arrefece e solidifica formando um corpo intrusivo, ou temporário. Para uma câmara magmática perdurar é necessário haver um reabastecimento constante, que pode ser efetuado através de um sistema de diques profundo.

Segundo estimativas, 88% do magma produzido na Terra é gerado nos limites das placas tectónicas - 62% em cristas meso-oceânicas e 26% em zonas de subducção (Figura 1). Os restantes 12% estão relacionados com ambientes intraplaca, como por exemplo Yellowstone e Hawaii.

Há três diferentes limites de placas tectónicas:

- Limites transformantes – movimento paralelo. Magmatismo e Vulcanismo geralmente não associados;
- Limites convergentes – levam à formação de magmas basálticos primários e a arcos vulcânicos (Sigurdsson, Houghton, McNutt, Rymer, & Stix, 2015);
- Limites divergentes – localizados tanto na crosta oceânica como na crosta continental – cristas meso-oceânicas e riftes continentais respetivamente.

Duarte et al., (2013) sugerem que uma nova zona de subducção se está a formar no sudoeste da Margem Ibérica, devido à propagação de tensões de compressão do Arco de Gibraltar e das tensões relacionadas à convergência de grande escala entre a África e a Eurásia, tendo por base um novo mapa tectónico. O processo de passagem de margens passivas a margens ativas ainda não é bem compreendido, mas sabe-se que o início da subducção em margens passivas desempenha um papel fundamental na teoria da tectónica de placas.



Figura 1 - Mapa da localização de vulcões ativos (Mapa retirado de: NOAA)

### 3.1.2. Erupções Vulcânicas

Dado que a tectónica local influencia o tipo de erupção vulcânica, é importante caraterizar os diferentes tipos de erupções. Vários fatores, como conteúdo em voláteis, viscosidade e composição das lavas, permitem-nos classificar as erupções como erupção fissural ou central e efusiva ou explosiva.

Nas erupções fissurais a lava é expelida por um sistema de fissuras em ambientes de distensão crustal (Figura 2-A). A lava é normalmente fluída e ascende por fraturas estreitas, criando outras fraturas durante a erupção.

Em ambientes de colisão, a lava é expelida por condutas tipo chaminé e espalha-se radialmente formando um cone vulcânico. Este tipo de erupção é chamado central (Figura 2-B). Estes cones podem atingir grandes dimensões e a sua atividade pode ser tanto efusiva como explosiva.



**Figura 2** - A) Erupção fissural (Fonte: LNEG); B) Erupção do tipo central (Fonte: National Geographic)

Atividade explosiva ocorre quando são formadas bolhas de gás suficientes, sendo acompanhada por projeção de materiais. Os magmas característicos de atividade explosiva são muito viscosos, fluem lentamente e impedem a libertação de gases – este último faz com que os gases sejam comprimidos conduzindo a explosões.

O Índice de Explosividade Vulcânica (VEI) é uma escala numérica que mede a explosividade relativa das erupções através do volume de produtos, altura da pluma de erupção e observações quantitativas (Pyle, 2015) – super-erupções com magnitude igual a 8; VEI de 0 representa atividade não explosiva com menos de 10 000 m<sup>3</sup> de tefra ejetados.

Os vários tipos de atividade apresentam diferentes durações da atividade eruptiva e volume de material. Para a quantificação da magnitude de erupções efusivas, que geralmente se encontram em atividade durante mais tempo, é necessário quantificar a área coberta por lava, a duração da erupção e o volume de magma expelido. Trata-se de uma erupção de tipo efusiva quando a lava flui como um líquido coerente. Podemos verificar atividade efusiva em 4 situações relativas a Vulcanismo profundo, pouco profundo ou emergente:

- Se o conteúdo em voláteis do magma ascendente for pequeno ocorre exsolução, mas, no entanto, o volume de bolhas de gás formado é insuficiente para causar fragmentação;

### 3. Introdução ao Vulcanismo

- Se a viscosidade do magma é alta o suficiente pode impedir a fragmentação do mesmo. Origina magmas muito viscosos, de composição dacítica a riolítica;
- Se o magma, durante a sua ascensão até à superfície, perder quantidade suficiente de voláteis, o conteúdo destes fica abaixo do ponto a partir do qual se dá a fragmentação do magma. Esta perda de voláteis pode acontecer durante o armazenamento na câmara magmática ou durante a ascensão;
- Erupções submarinas são geralmente efusivas devido à supressão da exsolução dos voláteis do magma, causada pela pressão hidrostática. Segundo (Cas & Simmons, 2018) são precisos menos de 500 m para suprimir completamente a atividade explosiva na maioria dos basaltos.

As erupções não são exclusivamente explosivas ou efusivas, podendo ter os dois tipos de atividade – erupção de atividade mista.

Com base no carácter efusivo e explosivo das erupções e na morfologia do aparelho vulcânico, Lacroix (1906) definiu diferentes tipos de atividade vulcânica, descritos abaixo.

**Pliniano:** Caraterizado pela explosão de magma viscoso com alto teor em voláteis. Os gases, ricos em vapor de água, formam uma coluna em forma de cogumelo sobre a qual se espalham, podendo atingir dezenas de metros de altura.

**Peleano:** Magma muito viscoso que solidifica na parte superior da chaminé principal sob a forma de agulhas, impedindo a libertação de gases. Consequentemente, a pressão no interior do vulcão aumenta e ocorrem explosões violentas que geram nuvens ardentes densas com temperaturas muito elevadas.

**Havaiano:** Erupções caraterizadas por lavas fluídas de composição básica, sem projeção de piroclastos ou carater explosivo. Os vulcões deste tipo apresentam bases muito largas e declives pouco acentuados sendo constituídos por camadas de lava sobrepostas.

**Vulcaniano:** Associado a eventos explosivos de curta duração com projeção de grandes quantidades de piroclastos e cinzas vulcânicas. Estão associados a magmas intermédios. O aparelho vulcânico é um cone formado por cinzas litificadas.

**Surtesiano:** Erupções onde a água tem acesso à chaminé, característica de erupções submarinas perto da superfície e em lagos localizados nas crateras dos vulcões. As descargas explosivas formam uma coluna de cinzas, lama, água e vapor, com projeção de blocos, podendo originar cones vulcânicos consolidados devido à

emissão de lavas e originar ilhas vulcânicas. Formação de *pillowlavas* – lavas em almofada.

**Estromboliano:** Caraterizadas pela baixa viscosidade do magma, que permite que as bolhas de gases ascendam rapidamente. Geralmente caraterizada como atividade mista, com alternância de períodos explosivos com projecção de piroclastos e efusões de lava fluída do tipo basáltico a basáltico andesítico.

### 3.1.3. Composição das lavas

A composição química do magma influencia vários fatores, como por exemplo, tipo da erupção, tipo de rochas produzidas, entre outras.

**Tabela 1** - Análise química de rochas provenientes da erupção do vulcão Eyjafjallajökull em 2010 (Fonte: Háskóli Ísland)

A tabela 1 apresenta exemplos da análise da composição química das rochas vulcânicas produzidas nas erupções do vulcão Eyjafjallajökull, em 2010. Este vulcão teve dois momentos de erupção, uma erupção efusiva no flanco e uma erupção explosiva no cume – a tabela mostra um exemplo para cada erupção. Segundo os dados adquiridos, a erupção no flanco produziu lava de tipo basáltico com sílica de cerca de 48%. A amostra correspondente à erupção no cume, tem 58% de sílica, sendo classificada como andesito.

	(Wt%)	Erupção no flanco	Erupção no topo
<b>Elementos maiores</b>	SiO <sub>2</sub>	47.79	57.98
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.68	14.87
	FeO	12.31	9.75
	MnO	0.18	0.24
	MgO	8.67	2.30
	CaO	10.00	5.50
	Na <sub>2</sub> O	3.03	5.01
	K <sub>2</sub> O	0.64	1.79
	TiO <sub>2</sub>	3.13	1.80
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.44	0.53
		Basalto	Andesito

A quantidade de sílica no magma tem uma enorme influência nas suas propriedades e é o fator determinante na classificação das rochas vulcânicas. Varia tipicamente de menos 50% a mais de 70% em termos de volume de peso. Os principais tipos de magma e rochas vulcânicas resultantes são basaltos, andesito, dacito e riólito. A concentração de sílica nos basaltos encontra-se na faixa de 45 a 53% tipicamente, e o riólito possui uma concentração superior a 69%. Tanto o andesito como o dacito apresentam valores intermédios em relação a este ponto.

	(ppm)	Erupção no flanco	Erupção no topo
<b>Elementos menores</b>	Ba	158	447
	Co	75	27
	Cr	308	25
	Cu	72	27
	Ni	182	15
	Sc	26	16
	Sr	422	330
	V	300	26
	Y	35	71
	Zn	107	144
	Zr	203	490
		Basalto	Andesito

A composição do magma está relacionada com a sua origem e com o enquadramento tectónico em que se encontra. O tipo de magma dominante nas cristas meso-oceânicas e hot spots

### 3. Introdução ao Vulcanismo

em meio oceânico, é basáltico derivado da fusão parcial do magma ascendente abaixo da crista que se está a afastar. Hot spots em meios oceânicos apresentam basaltos mais diversificados devido à interação destes com a crosta continental. Nas zonas de subducção o tipo de magmas dominante é o andesito, embora tenha também uma ampla diversidade de magmas. Neste ambiente, a diversidade de magmas é devida à interação dos basaltos com a crosta – resultado da presença de água no processo de subducção, que faz com que a temperatura de fusão baixe – e a cristalização fracionada resultante da ascensão do magma.

## 3.2. Vulcanismo Submarino

Observações através de imagens de sonar e de batimetria usando submersíveis controlados remotamente, mostram a existência de cristas meso-oceânicas – cadeias de vulcões – que marcam locais de repetitiva atividade eruptiva. Embora a atividade vulcânica submarina esteja maioritariamente localizada em cristas meso-oceânicas, arcos intraoceânicos e hotspots também apresentam este tipo de atividade vulcânica.

É estimado que 75 a 80 % total do magma expelido num ano seja proveniente de erupções submarinas. Devido à sua localização remota, que aumenta a dificuldade em detetar um vulcão submarino em erupção, e ao seu baixo impacto na vida humana e no quotidiano, estas erupções são menos reportadas e estudadas do que erupções subaéreas.

O Vulcanismo Submarino é fundamental para entender os processos de formação da crosta oceânica, promovendo assim a sua renovação e dando continuidade ao ciclo das rochas. Impulsiona ainda a química dos oceanos da Terra, têm associados ecossistemas únicos que vivem de enxofre em vez de luz solar e é fundamental para a transferência de calor e produtos químicos da litosfera para o oceano (Buck, Resing, Baker, & Lupton, 2018).

Como já foi descrito na secção 3.1.2, a pressão hidrostática nos fundos oceânicos é tão alta que os gases permanecem dissolvidos em praticamente todos os magmas, suprimindo assim atividade explosiva – VEI's com valores entre 0 e 3. Pode haver, no entanto, libertação de gases sem ser de modo explosivo – fragmentação.

Vulcões que estão perto da superfície, geralmente associados a zonas de hot spot e em arcos vulcânicos dependentes a zonas de subducção, quando comparados com cristas meso-oceânicas são caracterizados por erupções explosivas devido a magmas viscosos e maior conteúdo em voláteis. Nestas erupções mais superficiais é possível haver observações à superfície da água de atividade explosiva (Parfitt & Wilson, 2008), como aconteceu em 2015 na erupção do Hunga Tonga-Hunga Há'apai. Excetuando as maiores erupções submarinas, era estimado que a

profundidade a partir da qual fosse possível gerar erupções do tipo explosivo seria aproximadamente 500 metros. Em 2012, com a erupção do vulcão Havre Seamount a uma profundidade de 720 m foi formado um tapete de pedras pomes, sublinhando uma compreensão insuficiente de qual o limite de profundidade abaixo do qual as erupções submarinas já não sejam uma ameaça à superfície (Embley et al., 2014).

A data, local e frequência das erupções submarinas são determinadas através da formação e acumulação de magma no manto superior e crosta juntamente com campos de stress tectónico local. Já o estilo de erupção submarina é condicionado pela composição do magma, profundidade da erupção, ambiente tectónico e conteúdo em voláteis (Rubin et al., 2012). A composição química do precipitado depende na sua maior parte do pH da solução resultante da mistura da água termal e da água do mar (Nogami et al., 1993; Urai & Machida, 2005).

Recentes avanços tecnológicos têm ajudado a documentar erupções que ocorrem em águas mais profundas. Em 1999, foi levada a cabo uma missão oceanográfica com o intuito de estudar as características geológicas e geofísicas da erupção da Serreta e o seu impacto local nos ecossistemas. O recurso de um veículo operado remotamente permitiu a observação de uma pluma vulcânica submarina formada por partículas vulcânicas, 'balões de lava' e bolhas de gás, a 380 metros de profundidade. A expedição da NOAA designada *Submarine Ring of Fire 2004*, registou uma erupção submarina pertencente ao vulcão NW Rota-1, a 555 metros de profundidade, no Oceano Pacífico. Este vulcão ainda se encontrava em erupção em 2006, como foi verificado pela *Submarine Ring of Fire 2006*.

O Anel de Fogo do Pacífico, também conhecido como Cinto Circum-Pacífico é a zona mais sísmicamente e vulcanicamente ativa do mundo. Com mais de 450 vulcões ao longo de 40 000 km de comprimento, traça fronteira entre várias placas tectónicas, incluindo o Pacífico, Juan de Fuca, América do Norte, Aleutian, entre outros.

Também associado ao Vulcanismo Submarino está a criação de ilhas vulcânicas que podem ter erupções submarinas associadas (Xu, Ruch, & Jónsson, 2015). As ilhas formadas por atividade submarina podem ser ilhas efémeras com posterior erosão total por ação das ondas e da corrente marítima ou pode-se tratar de um passo na direção da formação de ilhas com um carácter mais permanente. Niijima é o nome de uma ilha formada por Vulcanismo Submarino em novembro de 2013 (Figura 3), a 500 m de Nishinoshima (Lat.: 27.247 °N; Lon.: 140.874 °E). As erupções

### 3. Introdução ao Vulcanismo

continuaram e esta nova ilha fundiu-se com Nishinoshima, tendo crescido 12 vezes mais do que o seu tamanho original. Em abril de 2017, a ilha ainda se encontrava com atividade como, por exemplo: lava, fumo, cinzas e rochas a serem expelidas pelo vulcão (Ono, 2015).

Eventos associados com erupções em cristas meso-oceânicas incluem elevados aumentos nos voláteis produzidos por desgaseificação do magma e separação de fluidos hidrotermais abaixo da superfície, produtividade microbiana impulsionada devido ao aumento do fluxo de voláteis e em alguns casos, há a extinção e uma posterior e rápida renovação das comunidades macrofaunais que se encontram nas chaminés (Embley et al., 2006).

O caráter das erupções submarinas em cristas meso-oceânicas é bastante diferente do Vulcanismo Submarino associado a arcos de ilhas intra-oceânicas. A fonte de magma destes vulcões é fixa por períodos mais longos do que nos cumes meso-oceânicos, o que permite o seu crescimento em águas rasas ou o surgimento como ilhas. Este tipo de Vulcanismo Submarino tem também uma proporção muito maior de material vulcanoclástico resultante de profundidades mais baixas e natureza mais explosiva. Estes habitats ricos em voláteis são capazes de suportar fauna capaz de sobreviver a produções hidrotermais intermitentes.

Os clastos resultantes de erupções do fundo oceânico são inicialmente flutuantes, mas enquanto arrefecem o seu espaço poroso é preenchido por água. Podem, portanto, alimentar correntes profundas ou subir até à superfície e formar tapetes de pedras pomes (Bryan et al., 2012). As pedras pomes resultantes de erupções submarinas, quando comparadas a pedras pomes decorrentes de erupções subaéreas, têm uma menor densidade de bolhas, ausência de vesículas <math><10\mu\text{m}</math>, entre outros (Manga et al., 2018).

Para a reprodução precisa da dispersão de tapetes de pedras pomes é necessário simular padrões de deriva e dispersão usando correntes oceânicas. As correntes oceânicas não são o único fator do qual depende as rotas seguidas por este produto. A fonte dos clastos, as dimensões iniciais do tapete, direção do vento, costas próximas e a capacidade dos clastos permanecerem flutuantes são outros fatores que podem alterar as rotas (Karlstrom et al., 2014).



**Figura 3** - Nascimento de uma nova ilha, Nijijima, a SO de Nishinoshima, a 8 de dezembro 2013. Imagem adquirida pelo EO-1 - ALI (Fonte: NASA)

As principais mudanças químicas resultantes de atividade vulcânica submarina são o pH reduzido devido à emissão de gases e outros compostos, a alteração do sistema de carbonatos, a emissão de catiões que promove a redução do potencial redox e a diminuição da quantidade de Oxigénio dissolvido (Santana-Casiano et al., 2013 *in* Carracedo et al., 2012)

Ainda relativamente às mudanças químicas que ocorrem como consequência de Vulcanismo Submarino, são vários os estudos realizados relativamente a dois dos principais gases suspensos na água: hidrogénio e metano. O metano não indica necessariamente uma erupção, podendo estar associado a um sistema de fontes hidrotermais ou atividade biológica. Associado a erupções, temos a presença de hidrogénio suspenso na água, resultado da reação das rochas quentes com a água do mar libertando assim hidrogénio (González, 2017).

As condições de observação destas erupções são melhoradas no caso de se registarem em águas mais superficiais, devido às observações de plumas de descoloração, tapetes de pedras pomes, entre outros – secção 3.4.

### 3.3. Manifestações Secundárias

Correspondem a Vulcanismo secundário, todas as manifestações que não incluem erupções vulcânicas. Corpos quentes que se encontram a pequena profundidade emitem energia térmica que desperta estes fenómenos secundários.

Fumarolas, águas minerais, termais e gasocarbónicas são manifestações secundárias de Vulcanismo no arquipélago dos Açores, com existência de hidrotermalismo intenso (Graff, 2017).

As fumarolas são emanações de vapor de água e gases que se formam através de aberturas na superfície da crosta da Terra. As fontes termais, são as formas mais conhecidas deste tipo de manifestações, sendo que estas águas sofreram um processo de enriquecimento durante o tempo que se encontraram no subsolo a grandes profundidades, e possuem uma composição química completamente natural.

Um exemplo de Vulcanismo secundário é o geiser *Old Faithfull*, no parque de Yellowstone, nos Estados Unidos da América. É conhecido pela sua frequência e predição nas erupções – tem 20 erupções diárias, sendo previsíveis com 90% de taxa de confiança (O'hara & Esawi, 2013).

### 3. Introdução ao Vulcanismo

#### 3.4. Produtos vulcânicos

Dependendo do conteúdo de voláteis, da composição química dos magmas e do tipo de erupção, os produtos podem ir desde escoadas de lava, escórias, nuvens de cinza, pedras pomes, entre outros. Na tabela 2 estão descritos vários produtos de atividade vulcânica.

*Tabela 2 - Produtos de Vulcanismo*

NOME	DESCRIÇÃO
Lavas Pahoehoe	Lavas muito fluidas que quando arrefecem apresentam uma crosta lisa, mas muito rugosa
Lavas Aa	Lavas de superfície muito rugosa e áspera
Pillow Lavas	Lavas em almofada. São resultado de vulcanismo submarino
Bombas	Maior massa de lava ejetada (diâmetro > 32 mm), de forma arredondada ou fusiforme. Podem apresentar forma angulosa e nesse caso, são chamados de blocos
Lapilli	Fragmentos piroclásticos com dimensões compreendidas entre os 4 mm e 32 mm
Pedra Pomes	Rocha de baixa densidade (< 1 g.cm <sup>-3</sup> ), associada a erupções de atividade explosiva
Cinzas e areias	Fragmentos pulverizados, essencialmente vítreos, com diâmetro inferior a 4 mm. Podem manter-se em suspensão durante muito tempo e serem arrastados a longas distâncias
Poeiras	Piroclastos com diâmetro inferior a ¼ mm
Aglomerados vulcânicos	Conjunto de bombas, poeiras e cinzas vulcânicas
Tufos vulcânicos	cinzas e poeiras consolidados e enrijecidos;
Lahars	Avalanches ou correntes de material vulcânico, removido pelas águas superficiais ou por águas provenientes de um rápido degelo
Nuvens ardentes	Massas gasosas resultantes da libertação de gases submetidos a altas temperaturas e pressões. Transportam uma grande carga sólida e incandescente, bem como magma finamente pulverizado
Mud Flow	Avalanches de lama

Para além de produtos sólidos, a atividade vulcânica também tem emanações gasosas, como por exemplo SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, entre outros.

A profundidade à qual se dá este tipo de atividade condiciona a formação/observação de certos produtos vulcânicos. Quando erupções vulcânicas ocorrem em profundidade, os produtos associados costumam ir desde *pillowlavas* a piroclásticos submarinos – resultado de pressão da água exercida sobre o ponto da erupção. No entanto, quando a erupção se dá em águas mais superficiais, entre a superfície e os 500 m, a complexidade dos produtos possíveis associados aumenta. Esta complexidade é devido à diminuição da pressão sobre a abertura do cone, que faz

com que deixe de haver supressão de exsolução de voláteis do magma e consequente aumenta a explosividade das erupções – jatos piroclásticos, explosões, tapetes de pedras pomes, lava, balões de lava, cinzas, plumas de descoloração, colunas de vapor, debris, entre outros.

Torna-se um processo ainda mais complexo quando a abertura do cone vulcânico alcança a superfície do mar e passa a erupção subaérea. Independentemente de se ter tornado uma erupção de carater subaéreo, os produtos associados continuam a ser depositados na água, alterando assim a sua resposta espectral. Um exemplo de um vulcão subaéreo com deposição de produtos vulcânicos no oceano é Fernandina, um vulcão do tipo escudo que entrou em erupção 4 vezes entre 2000 e 2018, e que devido à proximidade da costa deposita alguns dos seus produtos no mar, tais como, lavas, cinzas, entre outros.

Vários produtos de atividade vulcânica, tais como fluxos de lava, bolhas e detritos de lava, cinza, pedra pomes, erupções de jatos de vapor, fontes hidrotermais, plumas de materiais finos e gás dissolvido, explosões e descoloração da água do mar em tons azuis turquesa e castanhos, já foram observados (Santana-Casiano et al., 2013).

As plumas de descoloração são resultado da precipitação química de partículas muito finas de  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ , provenientes da mistura de águas termais e água salgada. Pode apresentar cores desde castanho a azul turquesa/verde, dependendo da sua composição química, ou através de outros agentes de descoloração, como por exemplo altas quantidades de sedimentos ejetados. Segundo (Ossaka et al., 1996), a cor esbranquiçada a amarela, amarela acastanhada, e amarelo-esverdeado, depende da concentração de ferro e alumínio na água, que aumenta com a atividade vulcânica.

Urai & Machida, (2005) concluem que água com uma pluma de cor esbranquiçada a verde, é formada quando águas ácidas ricas em  $\text{Al}^-$  e  $\text{Fe}^-$ , se misturam com água salgada, e água com uma pluma nos tons dos castanhos / vermelho é formada devido ao fluxo de água bicarbonatada ferrosa, de pH neutro.

Coca et al., (2014), separaram as várias fases de plumas de descoloração referente à erupção submarina do vulcão El Hierro, em 2011-2012. Baseando-se na sua assinatura espectral e na turbidez das águas ( $K_d(490)$ ), classificou 4 fases:

- 1ª fase – referente a pixéis acastanhados, sendo que a sua assinatura espectral é caracterizada por não haver uma caída abrupta dos valores de refletância do comprimento de onda da região do verde para a região do vermelho no espectro eletromagnético;

### 3. Introdução ao Vulcanismo

- 2ª fase – pico máximo na região do verde, entre os 531 e os 547 nm, com uma descida nítida tanto na região do azul como do vermelho;
- 3ª fase – apresenta padrões com transição dos picos máximos dos 531 aos 488 nm – entre a região do azul e verde;
- 4ª fase – exhibe picos máximos na ordem dos 488 nm, com uma descida subtil para os comprimentos de onda na região do azul e uma descida mais abrupta para a região do vermelho.

Segundo este trabalho, a 3ª e 4ª fase são relativas a valores de refletância mais baixos indicando o fim da erupção vulcânica. Correspondem a uma mistura de erupção vulcânica com o aumento da produção primária local.

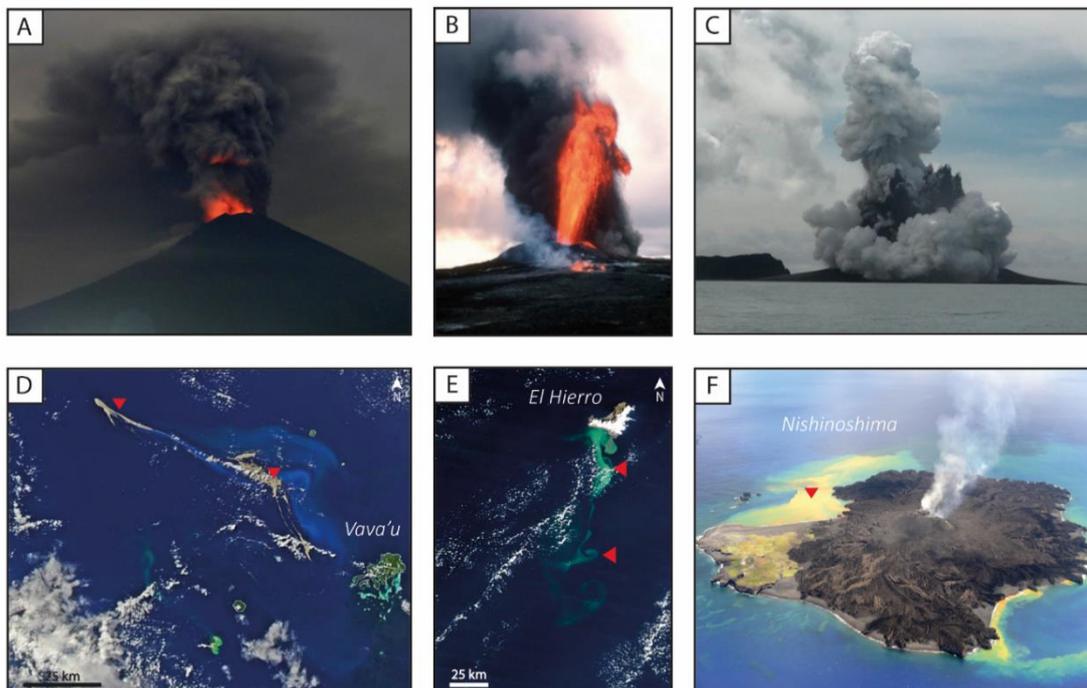
Baseado na cor das plumas de descoloração e no seu ponto de origem, Mantas et al., (2011) diferenciaram dois tipos de plumas. O primeiro tipo, de cor predominantemente esverdeadas, origina-se a partir da fonte da atividade vulcânica, espalhando-se como consequência da corrente submarina. O segundo tipo, com cores azuladas, está associado às pedras pomes, que devido à sua baixa densidade flutuam, e podem formar extensivos tapetes. Este tipo de pluma está localizado nas margens dos tapetes de pedras pomes e ocorre devido ao processo de lixiviação destas rochas.

Mantas & Pereira, (2010) dividem ainda os tapetes de pedras pomes em várias ‘fases’: a fase 1 apresenta um tapete único e conciso, que através de correntes oceânicas locais e ventos alísios se podem dividir formando tapetes que ainda incluem uma quantidade considerável de material – fase 2; a fase 3 consiste em pequenos grupos ou em situações isoladas; a fase 4 é relativa à pedra pomes que fica retida na costa litoral; e a fase A faz referência a tapetes que se acumulam em corpos de água semifechadas – como por exemplo, baías ou golfos. Este estudo refere ainda que tapetes de pedras pomes de fase 2 apresentam uma temperatura mais elevada que a temperatura média do oceano nas redondezas do local de erupção.

Na Figura 4 podemos observar produtos resultantes de atividade vulcânica. As imagens a e b correspondem a erupções de vulcões subaéreos, enquanto que as restantes correspondem a atividade submarina.

Estão associados também a estes eventos, fenómenos de blooms de *trichodesmium* – uma cianobactéria filamentosa que cresce frequentemente em colónias (Campbell, Carpenter, Montoya, Kustka, & Capone, 2005). Mackey, O’Sullivan, & Watson, (2002) referem que tanto atividade subaérea como atividade submarina, podem causar aumento de nutrientes na água, como por exemplo, ferro. *Trichodesmium* responde positivamente à entrada de ferro em regiões

pobres e é muitas vezes avistado em zonas onde ocorreram erupções à 4/5 dias atrás (Boyd et al., 2000).



**Figura 4** - **A)** Cinzas libertadas no Monte Agung a 4 dezembro 2017 (Fonte: National Geographic); **B)** Fluxos de lava na erupção de 1984 em Kilauea (Fonte: NASA); **C)** Atividade explosiva em Hunga Tonga-Hunga Há'apai a 15 janeiro de 2015 (Fonte: USGS); **D)** Tapetes de pedras pomes e plumas associadas em Home Reef a 13 agosto de 2006 – MODIS-A (Fonte: NASA); **E)** Pluma de descoloração azul turquesa/esverdeada em El Hierro a 23 outubro de 2011 – MODIS-T (Fonte: NASA); **F)** Plumam de descoloração castanhas em Nishinoshima a 26 agosto de 2014 (Fonte: EOS)

### 3.5. Erupções conhecidas e Riscos associados

As erupções vulcânicas são fenómenos, até ver, imprevisíveis e por isso as suas consequências podem ser devastadoras.

A erupção do vulcão Vesúvio, em 79 d.C., levou à destruição das cidades de Pompeia e Herculano. O Vesúvio espalhou uma nuvem ardente com uma altura de mais de 30 km, produzindo lava e pedra pomes a 1,5 milhões de toneladas por segundo (Morgan et al., 2006).

Nem todos os materiais resultantes de uma erupção vulcânica permanecem no mesmo lugar – são facilmente transportados pelas águas da chuva. Em zonas tropicais, as chuvas tendem a ser torrenciais e arrastam as cinzas para os cursos de água. Estas escoadas de lama vulcânica causaram a maior parte dos danos resultantes da erupção de 1991 do Monte Pinatubo, que teve um VEI igual a 6 (White & McCausland, 2016).

### 3. Introdução ao Vulcanismo

Um dos riscos associados a erupções vulcânicas é o colapso da câmara magmática, como aconteceu no Monte Santa Helena, em 1980 e mais recentemente, em setembro de 2018, no vulcão Anak Krakatau. A erupção foi seguida por colapso, provocando um tsunami que atingiu mais de 300 km de costa em Sumatra e Java, fazendo 420 mortos e cerca de 40 mil desalojados (Figura 5).



**Figura 5** - Erupção do Anak Krakatau a 22 de setembro de 2018. Imagem adquirida pelo MSI, a bordo do Sentinel 2 (Fonte: NASA)

Na Figura 6-C podemos observar a Caldeira do Fogo, nos Açores, uma caldeira vulcânica que se formou devido ao colapso de um cone vulcânico e posterior enchimento natural de água (Pimentel, Pacheco, & Self, 2015).

O Anak Krakatau é filho do vulcão Krakatau, que entrou em erupção em 1883, e fez mais de 36 mil mortos. Durante a erupção e explosão do Krakatau, foram construídos vários tapetes de pedra pomes, que se espalharam pelo Índico, chegando a Moçambique (Self, 1981 *in* Ye et al., 2020). Esta erupção provocou ainda um tsunami, e várias transformações na terra devido aos gases e partículas que foram lançados na atmosfera, como por exemplo, queda de temperatura, alterações no nascer e por do sol, devastação de fauna e flora, entre outros. O vulcão Home Reef formou, em 2006, um tapete de pedras pomes que chegou às ilhas Fiji, 7 semanas depois da sua erupção, cobrindo parcialmente North Bay e a costa sul de Kadavu (Figura 6-D).

Uma outra causa de morte relacionada a atividade vulcânica está associada à libertação de gases asfixiantes, que descem pelas vertentes dos vulcões. Visto que a desgaseificação associada a sistemas vulcânicos ativos não abrange apenas fumarolas e nascentes termais, pode surgir de um modo difuso através dos solos e de sistemas lacustres e por isso identificados com recurso a detetores de gases. Um estudo realizado por (Andrade, Cruz, Viveiros, Coutinho, & Freire, 2014) utilizou um equipamento portátil que foi modificado para que pudesse flutuar na água e realizar as medições de fluxo de CO<sub>2</sub> na superfície do lago pelo método da câmara de acumulação.

É ainda de referir que as cinzas libertadas como resultado da atividade vulcânica causam problemas nas comunicações aéreas, uma vez que constituem um perigo para a navegação aérea. Em 2010, o vulcão islandês Eyjafjallajökull, encoberto por um glacião de 100 km<sup>2</sup> criou interrupções nunca antes vistas no tráfego aéreo, obrigando ao fecho do espaço aéreo europeu. A erupção de 20 de março de 2010 foi consequência de alta atividade sísmica.

Na Islândia, é comum a ocorrência de erupções explosivas a cada 3-4 anos, devido às interações entre a água e o magma em vulcões cobertos com gelo. Por consequência do calor libertado nestas erupções, o gelo derrete, aumentando a possibilidade de inundações nas proximidades (Gudmundsson et al., 2010).

Erupções submarinas apresentam riscos próprios que se somam aos tradicionais (nuvens de cinza e gases, etc.). Entre eles, os tsunamis gerados por colapsos submarinos dos flancos que podem atravessar largas distâncias afetando estruturas nas zonas costeiras distantes, produção de jangadas de pedra-pomes, perturbação das rotas marítimas e comunidades biológicas, entre outros. Quando as erupções submarinas ocorrem perto de áreas povoadas pode ser necessário recorrer à evacuação destas áreas (Coca et al., 2014). As reservas e vida marinha podem ser seriamente afetadas devido à libertação de substâncias tóxicas que afetam o ecossistema (Carracedo et al., 2012).

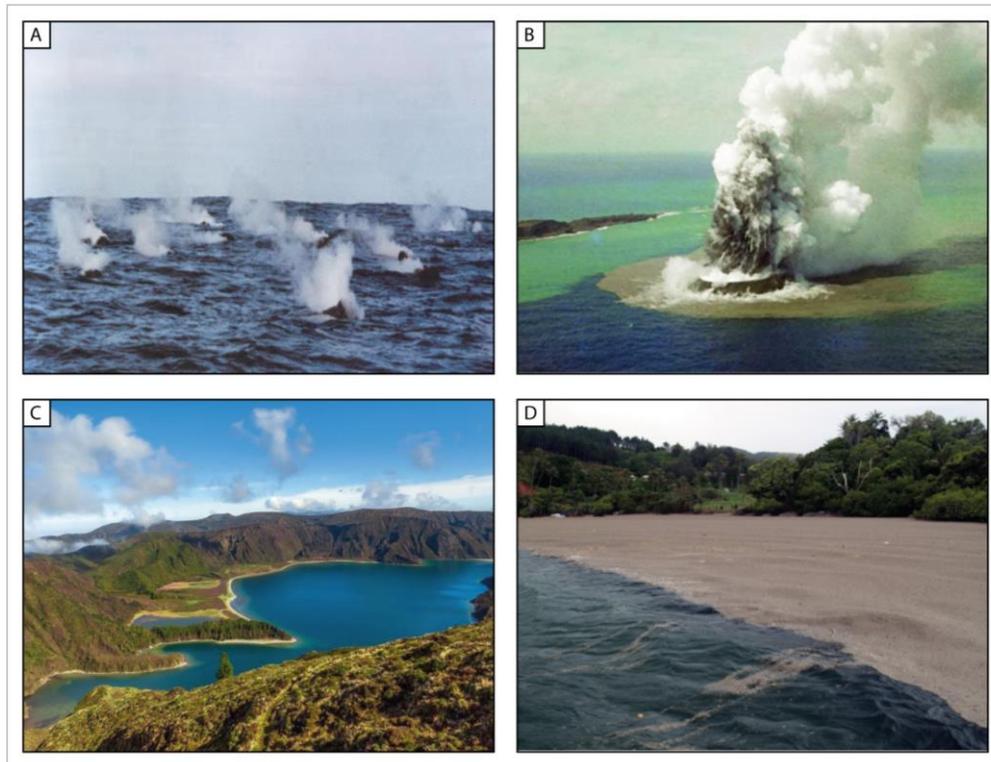
Atividade vulcânica constitui também um perigo para as populações/habitações. Em 1957, na costa Oeste da ilha do Faial, nos Açores, uma nova erupção submarina – com um índice de explosividade igual a dois - formou uma nova ilha que eventualmente se juntou à ilha principal, subterrando parcialmente o farol dos Capelinhos. Em novembro de 1998, a 10 km da ilha Terceira deu-se o começo de nova atividade vulcânica submarina, ao longo da dorsal da Serreta. Esta erupção com atividade até janeiro de 2000 produziu, por várias vezes, ‘balões de lava’ – fragmentos de lava muito quentes, ricos em gás – que se encontravam a flutuar à superfície (Figura 6-A).

No entanto, as consequências de atividade vulcânica não são todas de carácter negativo. Nos primórdios da Terra, o Vulcanismo foi responsável pela libertação de gases que constituíram a atmosfera primitiva e a hidrosfera onde se veio a desenvolver vida. Para além disso, as poeiras e cinzas provenientes de vulcões tornam os solos mais férteis e ricos. Os produtos de Vulcanismo podem ser aproveitados para fins medicinais como por exemplo as cinzas vulcânicas.

Outro benefício de atividade vulcânica é a energia geotérmica, que não é poluente e pode ser utilizada para produção de energia elétrica ou para aquecimento. O elevado potencial geotérmico destas zonas leva à formação de nascentes termais (Costa, 2012). As regiões vulcânicas oferecem ainda paisagens que exibem um conjunto de formas e características atrativas ao turismo.

As erupções submarinas fornecem uma rápida reposição de nutrientes no oceano e atuam como fertilizante para o fitoplâncton. Exemplo disso foi uma erupção submarina pouco profunda, a 1,8 km a Sul da ilha El Hierro nas Ilhas Canárias, em outubro de 2011, responsável pela criação de um ambiente altamente corrosivo que afetou a biota marinha. No entanto, forneceu os nutrientes necessários para uma recuperação rápida do ecossistema marinho (Santana-Casiano et al., 2013).

### 3. Introdução ao Vulcanismo



**Figura 6 -** **A)** Balões de lava, erupção Serreta, Açores (Fonte: Forjaz et al 2000); **B)** Explosões relativas ao vulcão Kavachi (Fonte: National Geographic); **C)** Lagoa do Fogo, Açores (Fonte: National Geographic); **D)** Pedras Pomes referentes ao vulcão Home Reef cobrem parcialmente North Bay e a costa Sul de Kadavu, Fiji (Fonte: Smithsonian)

Estes aspetos atraem turismo e estabelecimento de novas áreas urbanas, aumentando a exposição a riscos associados a Vulcanismo (Tweed, 2012). Para contrariar este aumento e minimizar os riscos vulcânicos, têm sido utilizados métodos de previsão de atividade vulcânica e estabelecidas medidas de prevenção, bem como realizada monitorização em vulcões ativos.

Estas são algumas das razões pelo qual é importante monitorizar a atividade precursora e caraterizar eventos semelhantes ocorridos no passado (Vaughan & Webley, 2010).

### 3.6. Monitorização

A melhor forma de prever os efeitos/riscos de uma erupção é estudar as erupções anteriores. Este estudo facilita a monitorização de vulcões que entram em erupção com poucos anos de intervalo, visto que há maior probabilidade de relatos, vídeos, entre outras fontes. No entanto são os vulcões que entram em erupção com menor frequência que têm, geralmente, as erupções mais perigosas – maior volume de cinzas e/ou lavas expelidas de uma só vez. Existem ainda vulcões que nunca foram observados, nomeadamente submarinos e que, como tal, permanecem por localizar e/ou confirmar.

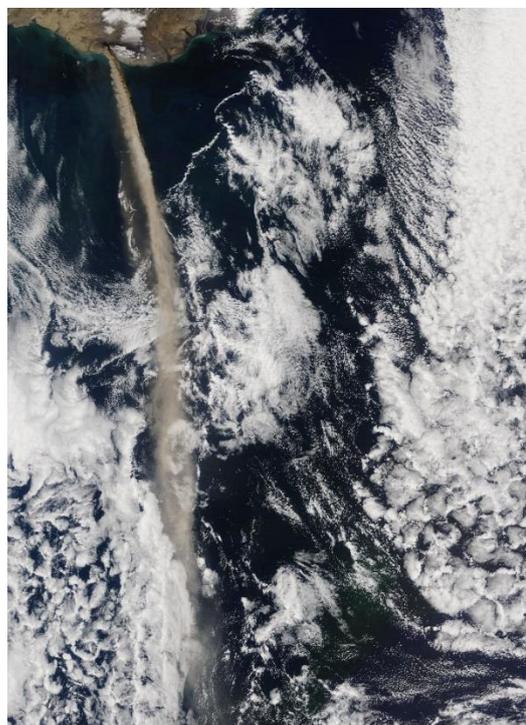
Existem muitos sinais percussores que sugerem a eminência de uma erupção, fazendo com que a monitorização de vulcões seja importante – deteção de anomalias físicas e químicas e de atividade sísmica são alguns destes sinais.

A fase de instabilidade de um vulcão passa geralmente por atividade sísmica, cuja profundidade geralmente vai diminuindo, passando de vários quilómetros para algumas centenas de metros de profundidade. Estes sismos estão associados à injeção de magma na câmara magmática e são os percussores mais úteis para monitorizar a atividade vulcânica. Sensores sísmicos, GPS e medições da inclinação do terreno são, portanto, importantes para a inferiçã da transferência de magma em profundidade. Para detetar a localização de um sismo nas proximidades de um vulcão é necessária uma rede de sismógrafos – de 6 ou 8 km até 20 km do vulcão em estudo.

Também por consequência da injeção de magma na câmara, a estrutura do vulcão pode sofrer deformações no cone vulcânico de mais de um metro no seu perfil. Este estudo pode ser levado a cabo através do levantamento topográfico do local ou através de dados de satélite, como por exemplo métodos interferométricos.

Através de imagens de satélite é possível mapear o contorno de campos de lava e a sua área respetiva (Dumont et al., 2018). Missões específicas de satélite, como por exemplo Sentinel, conseguem medir a diferença topográfica, permitindo calcular o volume de lava nestes campos.

Quando a erupção do vulcão Eyjafjallajökull ocorreu, foram usadas imagens de satélite para monitorizar o transporte da pluma e realizados voos regulares de reconhecimento, que permitiram a supervisão direta da atividade vulcânica e das interações entre o glaciar e o vulcão (Figura 7). A Guarda Costeira da Islândia utilizou um radar de abertura sintética (SAR) a bordo de um avião para realizar a monitorização do desenvolvimento da cratera e o derretimento do glaciar em ambientes nublados, visto que as ondas de radar não são afetadas pelas nuvens (Gudmundsson et al., 2012).



**Figura 7** - Nuvens de cinzas relativa à erupção do vulcão Eyjafjallajökull, em 2010. Imagem adquirida a 11 de maio de 2010 pelo MODIS-T (Fonte: NASA)

### 3. Introdução ao Vulcanismo

Outro sinal precursor é alteração da temperatura da água e do solo nas proximidades de vulcões. Dados térmicos registam diferenças de temperatura, visto que os sensores que operam na parte do infravermelho do espectro eletromagnético são sensíveis a emissões térmicas e anomalias de temperaturas, podendo por isso mapear novas fontes de material quente tais como crateras eruptivas e campos de lava. Coppola, Ripepe, Laiolo, & Cigolini, (2017), utilizaram dados do projeto italiano MIROVA, que deteta anomalias das temperaturas de vulcões a uma escala global, tendo usado especificamente imagens do MODIS.

A deteção de gases associados a erupções vulcânicas é de igual modo importante, havendo câmaras que conseguem quantificar a concentração de gases e sensores que usam vários tipos de espectrómetros para os detetar: DOAS, e OP-FTIR, por exemplo. Observando imagens adquiridas por satélite que utilizam radiação micro-ondas ou infravermelhos térmicos, podemos detetar e seguir nuvens de cinza vulcânica. Sawyer et al., (2011) apresentam um estudo para avaliar as emissões de gases e aerossóis na margem da cratera do vulcão Villarrica, no Chile, utilizando o FTIR.

Os radares terrestres são importantes para detetar e medir as características das plumas de erupção, em particular a altura da pluma. O LiDAR é um método de deteção remota que usa luz na forma de laser para medir faixas, conseguindo ainda detetar alturas de cinzas e de aerossóis.

Em 2014 foi instalado um observatório oceânico de cabos submarinos no Oceano Pacífico Nordeste, cobrindo a totalidade da placa Juan de Fuca. Serve para apresentar especificamente os processos existentes nas cristas meso-oceânicas, estando focado no Axial Seamount e no Endeavor Segment.

O objetivo deste observatório é a caracterização e quantificação das consequências químicas, geológicas e biológicas de eventos como erupções, deformação associada a expansão do fundo marinho; quantificação da temperatura, de parâmetros químicos e biológicos do efluente eruptivo e hidrotermal; realização de medições diretas ao fundo marinho e medições em tempo real de mudanças associadas a comunidades biológicas, entre outros. Permite uma comunicação bidirecional com instrumentos de fundo do mar e da coluna de água possibilitando assim respostas rápidas a eventos como erupções vulcânicas, terremotos, entre outros (Kelley, Delaney, & Juniper, 2014).

Em abril de 2015, foi detetada uma erupção no Axial Seamount localizada predominantemente ao longo da zona norte da crista. A deteção em tempo real permitiu o envio de um navio para recolha de mais amostras físicas, químicas e biológicas e novos fluxos de lava (Spietz et al., 2018), e consequente caracterização geoquímica e microbiológica das plumas hidrotermais pós-eruptivas.

## Caraterização de Vulcanismo Submarino por Técnicas de Detecção Remota

Nos últimos anos, têm sido feitos avanços significativos para a compreensão dos processos que ocorrem nestes ambientes dinâmicos. Estes avanços dependem da capacidade de adquirir dados de alta repetição, a longo termo utilizando diferentes sensores, plataformas e redes para capturar este tipo de eventos.

A tabela 3 relaciona os diferentes sinais percursos com alguns dos instrumentos utilizados para a respetiva deteção. Como podemos verificar, a deteção remota é uma das maneiras mais eficazes de detetar e monitorizar erupções submarinas.

**Tabela 3** - Instrumentos de monitorização de vulcões relativamente aos sinais percursos (Adaptado de National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2017)

Sinais percursos	Detalhes	Instrumentos
Ondas sísmicas	<p>Deteção de Lahars e correntes de densidade piroclástica</p> <p>Deteção e localização de sismos; deteção de agitação vulcânica</p> <p>Seguimento da evolução de atividade vulcânica na subsuperfície</p>	<p>Geofone</p> <p>Sismómetros</p> <p>Detetor de infrassons</p>
Geodésicos	<p>Deteção de fontes volumétricas</p> <p>Construção de modelos de tamanhos e localizações de intrusões; Deteção de nuvens de cinzas</p> <p>Mapeamento preciso; deteção da altura de cinzas e aerossóis</p> <p>Quantificação de movimentos rápidos na superfície e de velocidades dos piroclastos</p> <p>Medição da deformação global do terreno</p> <p>Mapeamento detalhado da superfície e das plumas vulcânicas; Inferição da taxa de efusão de lava</p>	<p>Inclinómetro</p> <p>GNSS / GPS</p> <p>Lidar</p> <p>Radar</p> <p>Sentinel-1 a/b</p> <p>Landsat, ASTER</p>
Termais	<p>Deteção de subida da cúpula, fugas de lava e emissões de cinzas e gases vulcânicos</p> <p>Monitorização da temperatura de fumarolas</p>	<p>Câmara de infravermelhos térmicos</p> <p>Termopares <i>in situ</i></p>
Hidrológicos	<p>Deteção de alterações em fontes hidrotermais</p> <p>Deteção de movimentos de magma</p>	<p>Sonda de temperatura</p> <p>Amostra para a caracterização química e isotópica</p>
Gases	<p>Quantificação da proporção de concentrações de gases</p> <p>Deteção de concentrações de sulfatos</p> <p>Deteção e quantificação de SO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S vulcânicos durante a noite e durante o inverno</p>	<p>FTIR</p> <p>DOAS</p> <p>IASI, AIRS</p>
Outros	<p>Determinação das altitudes das nuvens de cinzas vulcânicas e da velocidade das plumas</p> <p>Localização de raios e Identificação de emissões de cinzas</p> <p>Deteção de plumas de descoloração</p>	<p>MISR</p> <p>Matriz de deteção de raios</p> <p>MODIS, VIIRS</p>

## 4. Detecção Remota

---

A deteção remota é uma técnica que permite obter informação sobre um objeto ou fenómeno pela análise de dados recolhidos por um dispositivo, que não se encontra em contacto mecânico com a área, objeto ou fenómeno em investigação (IBGE, 2001).

Estas técnicas de aquisição de informação permitem-nos acumular conhecimento relativo a ambientes medindo radiação eletromagnética (REM), campos de forças ou energia acústica através de radiómetros e scanners, camaras, sistemas de radar, sonares, dispositivos térmicos, entre outros (Ajmi & Din, 2009).

### 4.1. Fundamentos de Detecção Remota

Segundo (Novo & Ponzoni, 2001), todos os materiais da superfície terrestre, que possuam uma temperatura superior a 0°K, emitem, refletem, absorvem ou transmitem radiação eletromagnética, e são por isso considerados fontes de energia. A obtenção de informação destes objetos envolve a deteção, aquisição e análise de energia eletromagnética refletida ou emitida pelos objetos e registada por sensores distantes. A radiação eletromagnética é adquirida por sensores remotos e transformada numa imagem digital.

A imagem digital é constituída por um conjunto organizado de pixéis, sob a forma de malha, com a sua localização definida por um sistema de coordenadas x e y, representadas por colunas e linhas, respetivamente. O pixel é a base da imagem, que corresponde a uma porção de uma área do terreno. Tem associado um valor numérico que indica a intensidade da REM na área correspondente ao pixel, chamado de número digital. O número digital representa então, a quantidade de energia que foi refletida pelo objeto(s) que esteja(m) incluído(s) nessa área (IBGE, 2001).

#### 4.1.1. Radiação eletromagnética

Entende-se por radiação eletromagnética, a energia emitida ou refletida pelos objetos em estudo, registada por sensores remotos. É por isso uma forma de energia que é transferida num certo período de tempo, de um ponto para o outro.

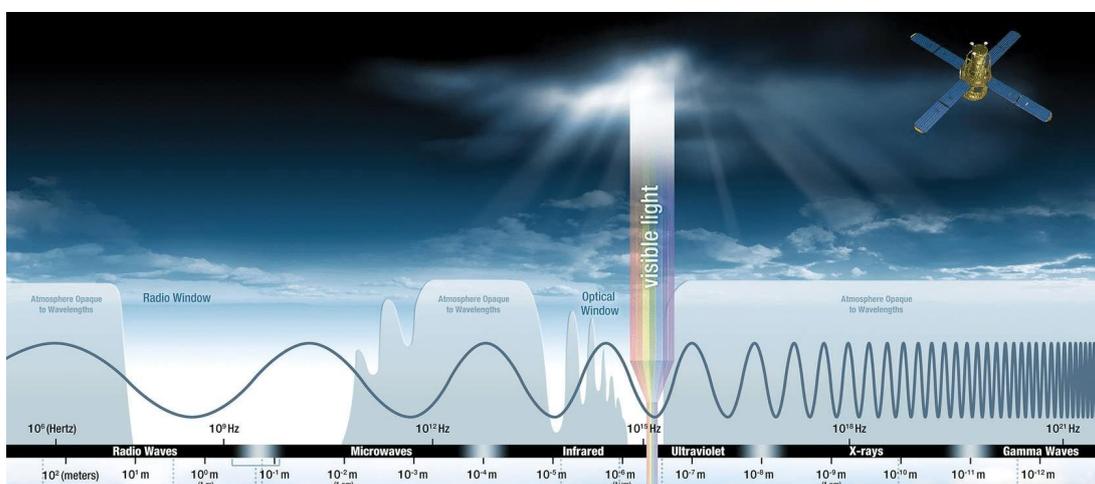
Em deteção remota, a REM é normalmente caracterizada pela distribuição da intensidade da radiação, em relação ao seu comprimento de onda ( $\lambda$ ), frequência e amplitude, no espetro eletromagnético. Compreende-se por comprimento de onda, a distância entre pontos sucessivos num padrão de onda, e por frequência, o número de oscilações que ocorrem nos campos elétrico e magnético durante um segundo.

Ao espectro eletromagnético corresponde a 'organização' da energia eletromagnética através do comprimento de onda ou frequência – raios-gama, raios-x, ultravioleta, área do visível, infravermelho, micro-ondas e ondas rádio (Figura 8). O espectro visível, o infravermelho e as micro-ondas são parte do espectro que é utilizado em DR.

- Espectro visível: dos 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$  – cor azul corresponde ao comprimento de onda de 0,4 a 0,5  $\mu\text{m}$ , a cor verde a 0,5 a 0,6  $\mu\text{m}$  e a cor vermelha de 0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ .

- Infravermelhos: pode ser dividido em infravermelho próximo (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ), médio (1,3 a 3  $\mu\text{m}$ ) e distante/térmico (3  $\mu\text{m}$  a 1 mm).

- Microondas: apresentam um comprimento de onda maior que 1 cm, e corresponde a energia que consegue atravessar a cobertura de nuvens.



**Figura 8** - Espectro Eletromagnético (Fonte: NASA)

No percurso Sol/satélite – objeto em estudo – sensor, a radiação eletromagnética interage com os objetos em estudo e com a atmosfera.

### 4.1.2. Interações da REM

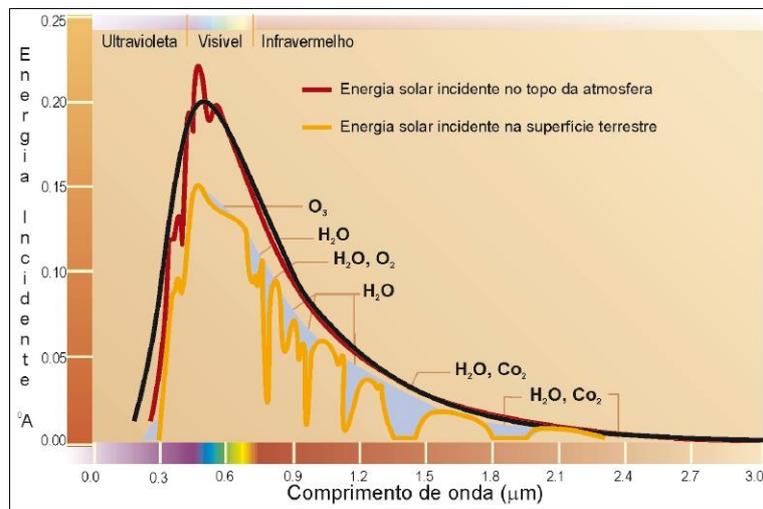
A radiação eletromagnética detetada pelo satélite passa pela atmosfera duas vezes: uma no trajeto sol – Terra e uma segunda no trajeto Terra – Sensor. Esta interação é importante para detecção remota devido à transformação da informação que a REM transporta quando atravessa a atmosfera, extraindo dados de presença de partículas que podem contribuir para a poluição do ar, precipitação e nuvens (Sivakumar, Roy, Harmsen, & Saha, 2004).

A energia ao atravessar a atmosfera pode ser absorvida, refletida e dispersa. Existem regiões do espectro que apresentam valores de absorvância alta no topo da atmosfera, não deixando por vezes chegar energia à superfície terrestre. A Figura 9 apresenta a distribuição da REM no topo da atmosfera (linha a vermelho) e na superfície terrestre observada ao nível do mar

#### 4. Detecção Remota

(linha a amarelo). As absorções dos gases presentes numa atmosfera limpa, estão representados na área a sombreado.

Certas áreas do espectro eletromagnético não são afetadas pela atmosfera, ou seja, nessas zonas, a atmosfera é translúcida à REM proveniente do sol ou superfície terrestre. Estas áreas são chamadas de janelas atmosféricas, e é aqui que é realizado o sensoriamento remoto dos objetos terrestres (Maio et al., 2008).



**Figura 9** - Relação entre a energia solar incidente no topo da atmosfera e na superfície terrestre. Fonte: (Maio, 2008)

Quando não existe absorção ou dispersão da REM, esta atinge e interage com a superfície. O total de energia incidente na superfície terrestre traduz o somatório da energia absorvida, refletida e dispersa. A proporção de cada uma destas formas de energia depende do comprimento de onda da radiação e do material, e a sua cor é por isso definida pela cor que o objeto reflete.

A escolha da região do espectro para o qual se pretende obter dados depende do conhecimento do comportamento espectral dos objetos em estudo, visto que diferentes objetos devolvem quantidades de energia em diferentes bandas do espectro eletromagnético, dependendo das propriedades estruturais, químicas e físicas do material, ângulo de incidência, rugosidade da superfície e intensidade/comprimento de onda da energia (Sivakumar et al., 2004).

Cada sistema de deteção remota tem associado a si, quatro tipos de resolução. Entende-se por resolução, a capacidade do sistema ótico de distinguir sinais de proximidade espacial e similaridade espectral (Sousa & Silva, 2011).

##### 4.1.3. Resoluções

Os quatro tipos de resolução associados a sistemas de deteção remota são: espectral, espacial, radiométrica e temporal.

A resolução espectral refere-se às zonas do espectro eletromagnético para o qual o sensor é sensível, bem como à sua quantidade e largura (Jensen, 2015). Define o número de bandas ou canais espectrais.

O detalhe discernível numa imagem está relacionado com a resolução espacial do sensor. A resolução espacial diz respeito ao tamanho do objeto de menor tamanho que consegue ser detetado na área em estudo. Quanto maior a resolução espacial maior será a quantidade de pixéis de menor área. A forma mais frequente, em DR, para medir esta resolução é o campo de visão instantâneo – *Instantaneous field of view (IFOV)* – que é definido pela área observada diretamente por um sensor.

A figura 10, mostra uma área em Hilton Head, SC, com resoluções espaciais desde 0,5x0,5 m até 80x80 m. Resoluções espaciais iguais ou menores a 5x5 m apresentam o conteúdo referente a informação espacial urbana, enquanto que resoluções maiores são praticamente inúteis para a análise espacial.

**Figura 10** - Resolução espacial sobre Hilton Head, SC (Fonte: Jensen, 2015)



No que diz respeito a resolução radiométrica diz respeito à capacidade em discriminar pequenas variações de energia refletida e/ou emitida entre os vários alvos (Sivakumar et al., 2004). Segundo (IBGE, 2001), a resolução radiométrica refere-se aos níveis digitais possíveis numa imagem, sendo expressa por números binários – bits – necessários para armazenar o valor máximo que o número digital dos pixéis pode atingir.

Esta resolução, em termos de imagem, representa o número de tons de cinza discerníveis entre o preto e o branco, onde o preto corresponde ao nível 0 e o branco ao extremo oposto (Figura 11).

BITS	VALORES	TONS
1 Bit	$2^1 = 2$ (0-1)	0  1
4 Bit	$2^4 = 16$ (0-15)	0  15
8 Bit	$2^8 = 256$ (0-255)	0  255

**Figura 11** - Resolução Radiométrica

Para calcular a resolução radiométrica aplica-se a expressão  $2^n$ , onde “n” representa o número de bits utilizado. No caso de um sensor usar 5 bits para registar informação, a sua resolução radiométrica será igual a 32 ( $2^5 = 32$ ), o que significa que o sensor será capaz de separar em 32 níveis toda a gama de valores de intensidade da radiação refletida/emitada pelos alvos da área estudada (Moreira, 2007). Se um sensor registar informação usando 8 bits, será capaz de detetar

## 4. Detecção Remota

256 níveis diferentes, o que em termos de imagem corresponde a 256 tons de cinza. Podemos afirmar por isso, que quanto mais elevada for a resolução radiométrica de um sensor, mais sensível é esse sensor na deteção de pequenas diferenças de energia (Sousa & Silva, 2011).

Em adição, a resolução temporal refere-se ao período de tempo que o satélite demora a completar um ciclo orbital completo. Esta resolução depende de vários fatores: capacidades do satélite/sensor, sobreposição de faixa, latitude, entre outros (Sivakumar et al., 2004).

Cada resolução depende da configuração da órbita do satélite e do design do sensor. Sensores multi-espetrais registam energia em vários intervalos separados de comprimento de onda, já sensores hiperespetrais detetam centenas de bandas espectrais muito estreitas desde o visível até ao infravermelho médio do espectro eletromagnético. Estes sensores possibilitam discriminações finais entre diferentes alvos.

### 4.2. Sistemas de DR e características

Sistemas de Detecção Remota englobam as plataformas e os sensores a bordo destas. Entende-se por sensores, os aparelhos responsáveis por receber energia, convertê-la num sinal e apresentar a mesma de forma adequada, de maneira a obter informações sobre o alvo/área em estudo. Podemos distinguir os sensores em ativos e passivos de acordo com a sua fonte de energia.

Os sensores passivos medem a energia disponível na natureza, onde a fonte de energia é o sol ou a superfície terrestre utilizando a parte do espectro eletromagnético que abrange a amplitude de comprimento de onda no domínio do visível e parte do infravermelho. Já sensores ativos dispõem da sua própria fonte de energia, podendo por isso registar informação sobre a superfície terrestre independentemente da altura do dia ou estação do ano e utilizam a parte do espectro correspondente às micro-ondas recorrendo a tecnologia de radar (Matos, 2008). São exemplos de sensores passivos, câmaras e gravadores de vídeo, ou sistemas scanner, como o Landsat. RADAR, LiDAR, SONAR, são exemplos de sensores ativos.

As plataformas são base estável, que servem de suporte aos sensores que registam a energia refletida e/ou emitida pela superfície terrestre. Podem ser terrestres, onde os sensores de observação da Terra estão relativamente perto do objeto/área em observação, ou aéreas, podendo ser instaladas em aviões para aquisição de dados de uma determinada área, e/ou em satélites, que circulam conforme uma órbita no espaço, permitindo a cobertura contínua da superfície terrestre.

Há plataformas com mais do que um sensor em simultâneo, como o satélite Terra, lançado no final de 1999 com os seguintes sensores a bordo: ASTER, CERES, MISR, MODIS e MOPITT. A

plataforma Aqua conta com 6 sensores: AMSU, AMSR-E, MODIS, CERES, AIRS e HSB. Estas plataformas circulam numa órbita polar a 705 km de altitude (Vaughan & Webley, 2010; Xiong et al., 2009). O satélite Aqua foi o primeiro satélite da *Afternoon constellation*, também conhecida como A-Train. Esta constelação de satélites é liderada pelo OCO-2, seguida do GCOM-W1, Aqua, CALIPSO, CLOUDSTAT, e no final, o satélite AURA.

### 4.2.1. Órbita dos satélites

Dependendo da utilidade dos satélites, estes são colocados em altitudes e órbitas diferentes. Chama-se órbita à trajetória do satélite em torno do astro, natural ou artificial. Existem três situações distintas no que toca a órbitas: órbitas polares, geostacionárias ou quase polares.

Uma órbita polar ou circular, é utilizada para contínua observação da Terra com grande detalhe – alta resolução espacial – que é conseguido se o satélite for colocado numa órbita elíptica sendo a Terra um dos pontos focais (Sousa & Silva, 2011). Realiza uma órbita completa em cerca de 90 a 100 minutos, num caso geral, e rastreia o planeta em cerca de 16 a 18 dias.

São chamados satélites geostacionários se o seu período orbital igualar o período de rotação da Terra, o que faz com que estes satélites tenham de ser colocados a altitudes mais altas. São usados essencialmente para informação sobre fenómenos meteorológicos, visto que o seu tempo de amostragem é quase contínuo sobre certas regiões da Terra (Rocha, 2002).

O nome das órbitas quase polares é devido à inclinação da órbita em relação a uma linha entre os polos norte e sul. Muitas destas órbitas também são heliossincronizadas – síncronas ao sol – dado que cobrem cada área do mundo a uma hora local constante do dia, o que faz com que a posição do sol no céu enquanto o satélite passa em dada área, será a mesma na mesma estação.

## 4.3. Missões de satélite

Desde a década de 90 que foi reconhecida a necessidade de se desenvolverem redes mundiais de modelos de previsão do ambiente marinho, através de dados oceânicos em tempo real. Para monitorizar o oceano com a frequência necessária de amostragem, é fulcral complementar dados recolhidos *in situ* com dados adquiridos através de deteção remota, mais particularmente através de satélites de observação da Terra (Volpe, Colella, Forneris, Tronconi, & Santoleri, 2012). Para este fim, é necessário adquirir dados das propriedades físicas do oceano, como por exemplo temperatura e ventos à superfície, e dados das componentes biológicas destes ambientes, tais como, concentração de fitoplâncton.

#### 4. Detecção Remota

As interações da luz incidente com substâncias presentes na água, determina a cor do oceano. Entende-se assim por Ocean Colour (OC) – Cor do Oceano – a tonalidade que a água do oceano apresenta. Para a maioria dos oceanos, o fitoplâncton é a principal característica que influencia a sua cor, podendo também apresentar variações devido à presença de material orgânico colorido dissolvido e sedimentos. A clorofila presente no fitoplâncton absorve a luz nos comprimentos de onda azul e vermelho, transmitindo o verde.

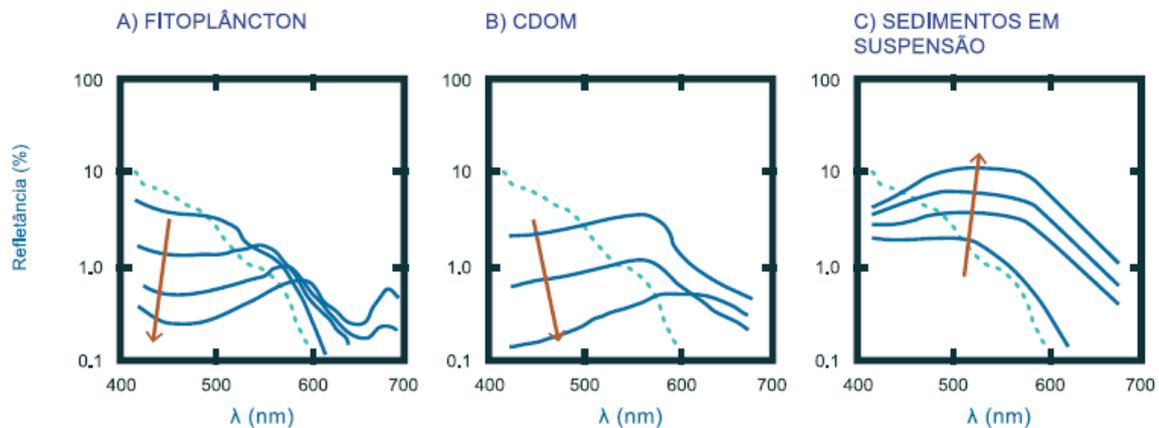
A relação entre a presença de material orgânico, fitoplâncton, sedimentos e os dados da cor do oceano, faz com que se possa calcular as concentrações destes materiais em águas superficiais, tal como o nível de atividade biológica. Os produtos de OC mais importantes são a refletância da superfície do oceano e concentração de clorofila. As refletâncias adquiridas por deteção remota fornecem um proxy para os sedimentos em suspensão em águas superficiais – rrs 665, 667 ou 670 nm – e a concentração de clorofila fornece uma estimativa da quantidade de fitoplâncton que se encontra na camada mais superficial do oceano (Rodrigues et al., 2017).

Como já foi referido, diferentes objetos apresentam quantidades de energia emitida e/ou refletida em diferentes bandas do espectro eletromagnético e por isso, têm diferentes assinaturas espectrais (Figura 12). Visto que este trabalho trata dados da cor do oceano, o foco será em materiais que poderão existir neste contexto, sendo eles:

- **Água do mar:** O espectro de refletância da água do mar pura, ou seja, sem qualquer tipo de material dissolvido ou em suspensão apresenta o seu pico nos comprimentos de onda do azul. (Morel e Prieur, 1977 in Mobley, Stramski, Bissett, & Boss, 2004), diferenciam dois tipos de águas de acordo com as suas características óticas. As águas de tipo I são águas cujas propriedades óticas são predominantemente determinadas por fitoplâncton – águas oceânicas –, enquanto as águas de tipo II são águas que são influenciadas por partículas minerais e matéria orgânica dissolvida, por exemplo – estuários e zonas costeiras.
- **Fitoplâncton:** é formado por organismos unicelulares, que possuem clorofila. Este material absorve radiação no comprimento de onda do azul, com pico nos 443 nm. Quanto maior for a concentração de clorofila, maior é o desvio do pico de refletância para comprimentos maiores, podendo atingir valores aproximados a 550 nm – zona do espectro no verde. A determinação da concentração da *clorofila a* é realizada através da relação da radiação adquirida nos comprimentos de onda do azul e do verde (Sutcliffe et al., 2016). A clorofila é considerada a biomassa do

fitoplâncton e por isso, pode ser indicador de um aumento de nutrientes ou de desenvolvimentos de *blooms* de algas (Keith et al., 2014).

- **Sedimentos em suspensão:** os sedimentos que se encontram em suspensão fazem com que a radiação seja dispersa, provocando assim altas refletância nos comprimentos de onda de 550 a 860 nm (Rong-Rong Li, Kaufman, Bo-Cai Gao, & Davis, 2003).
- **Matéria orgânica dissolvida:** também conhecida como substância amarela, faz com que a coloração da água mude de amarelo a verde e posteriormente castanho, à medida que a sua concentração aumenta (Slonecker, Jones, & Pellerin, 2016).



**Figura 12** - Assinaturas espectrais dos diferentes constituintes da água. Fonte: GUIA

Notas: CDOM – Coloured Dissolved Organic Matter; linhas a sólido representam os espectros idealizados para cada material; a linha a tracejado representa o espectro de água pura; a seta indica o aumento das concentrações

Os dados da Ocean Colour fornecem-nos informações que possibilitam a validação de novos modelos de ecossistemas marinhos. O projeto MyOcean IP, é um exemplo de um projeto que fornece informações de referência sobre o estado físico do oceano a uma escala regional, europeia e global, a partir de observações de satélites e *in situ* em tempo real e a longo prazo – temperatura, salinidade, extensão de gelo, nível do mar, ecossistemas primários são alguns dos dados recolhidos (Zodiatis, Lardner, Solovyov, Panayidou, & De Dominicis, 2012).

#### 4.4. Satélites e sensores

De acordo com o objetivo para o qual foram criados, podemos agrupar os satélites e sensores em categorias diferentes. Temos satélites meteorológicos, satélites de observação da Terra, onde se encontram satélites destinados a aplicações terrestres e outros mais sensíveis a aplicações oceânicas, satélites militares, entre outros.

## 4. Detecção Remota

### 4.4.1. Meteorológicos

Em termos de satélites meteorológicos, podemos afirmar que foi uma das primeiras aplicações civis na deteção remota com o primeiro satélite TIROS-1 a ser lançado em 1960 pelos Estados Unidos. As resoluções temporais destes satélites são geralmente bastante altas, permitindo observações frequentes da superfície terrestre, cobertura de nuvens, humidade atmosférica, tendo uma monitorização quase contínua das condições atmosféricas globais. GOES, NOAA AVHRR e MEOSTAT, são alguns dos satélites de observação de fenómenos atmosféricos.

- **GOES – Geostationary Operational Environmental Satellite**

Os satélites GOES foram projetados pela NASA a pedido da NOAA, para providenciar ao Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos, imagens frequentes e em pequena escala da superfície da Terra e da cobertura de nuvens. A primeira série destes satélites, formada do GOES – 1 ao GOES – 7, era capaz de ver a Terra em apenas 5% do tempo, aproximadamente. A segunda série começou com GOES – 8 com melhorias – imagens mais frequentes, instrumentos de imagem, entre outros.

- **METEOSTAT**

Esta série de satélites geostacionários, desenvolvidos para a Agência Espacial Europeia e operados pela EUMETSAT, teve o seu primeiro satélite lançado em 1977. Atualmente encontram-se em órbita 4 satélites desta família, o Meteostat -8, -9, -10 e -11, que atuam sobre a Europa, África e Oceano Índico.

Instrumentos como o SEVIRI e GERB estão a bordo destes satélites. O SEVIRI permite a observação da Terra em 12 canais espectrais, e tem aplicações como a monitorização de tempestades severas, nevoeiro, tempestades de poeira/cinzas. Já o GERB, trata de um radiómetro no espectro do visível ao infravermelho para estudos de radioatividade.

Muitos dos satélites de observação de fenómenos meteorológicos são usados também para observação da Terra, mas não estão preparados para mapeamento da superfície da Terra.

### 4.4.2. Satélites de Observação da Terra

Com o sucesso dos satélites meteorológicos, iniciou-se o estudo de viabilidade de uma série de satélites para a observação de recursos terrestres, chamada de ERTS – Earth Resources Technology Satellites, que foi lançada em 1972. Os primeiros satélites a serem colocados em órbita tinham sensores com resolução espacial muito baixa comparados aos atuais.

• Landsat

O primeiro satélite desenhado especificamente para a aquisição de forma sistemática, de dados sobre recursos terrestres, o ERTS-A, chamado Landsat-1 em 1975, esteve operacional desde 1972 a 1978. A bordo estava instalado um sensor multiespectral (MSS) com quatro bandas (Rocha, 2002). A tabela 4 mostra as caraterísticas desta série de satélites – inclui o Landsat 6 que não alcançou a órbita planeada.

A resolução destes satélites tem vindo a ser melhorada, tanto em questões de resolução radiométrica – Landsat 1 a 7 com 8 bits; Landsat 8 com 12 bits – como em resolução espacial (Figura 13). O Anexo 1 mostra a comparação entre os canais utilizados, e resoluções espaciais entre o Landsat 1, 7 e 8.



Figura 13 - Imagem adquirida pelo Landsat 8 em Gladstone, Austrália a 11 de setembro de 2017 (Fonte: NASA, 2019)

Tabela 4 - Caraterísticas da série Landsat (Adaptado de Rocha, 2002)

	Landsat 1 (ERTS-A)	Landsat 2 (ERTS-B)	Landsat 3 (Landsat-C)	Landsat 4	Landsat 5	Landsat 6	Landsat 7	Landsat 8
Data de lançamento	23 jul '72	22 jan '75	5 mar '78	16 jul '82	1 mar '84	5 out '93	15 abr '99	11 feb 2013
Data de fim de vida	1978	1982	1983	1993	2013	5 out '93	-	-
Peso (kg)	953	953	953	1941	2200	2200	2200	2071
Tipo de órbita	Circular, quase polar, sincronizada com o sol							
Altitude (km)	917	900	917	705	705	705	705	705
Inclinação	99,2º	99,2º	99,2º	98,2º	98,2º	98,2	98,2	98,2
Período (min)	103,34	103,34	103,34	99	99	99	99	99
Repetição do Ciclo (dias)	18	18	18	16	16	16	16	16
Sensores	RBV; MSS	RBV; MSS	RBV; MSS	TM; MSS	TM; MSS	ETM	ETM+	OLI; TIRS

De momento, já foi anunciado o lançamento do Landsat 9 para finais de 2020, para substituir o Landsat 7 em órbita, que se encontra desde junho de 2003 sem o corretor da linha de varrimento. A série de satélites Landsat, nos seus 45 anos de existência,

#### 4. Detecção Remota

produziu grandes volumes de dados utilizados de forma frequente em estudos ambientais e aplicações operacionais.

- **ASTER**

Em dezembro de 1999, foi lançado o Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) a bordo do satélite Terra. Este sensor adquire informação de alta resolução espacial – 15 a 90 m – em 14 bandas, desde o comprimento de onda do visível ao infravermelho térmico.

O modelo digital de terreno global, foi criado com recurso a cerca de 15 milhões de imagens adquiridas por este sensor (Tachikawa, Hato, Kaku, & Iwasaki, 2011). É também utilizado para a monitorização de vulcões e sinais precursoros destes, como emissões de gases, desenvolvimento de lagos de lava, entre outros.

- **Sentinel**

As necessidades operacionais do programa Copernicus, fez com que a ESA desenvolvesse uma família de missões, chamada Sentinel. Cada missão é baseada numa constelação de dois satélites com o objetivo de dar resposta aos requisitos de atendimento e cobertura do Copernicus.

Cada missão tem um objetivo diferente. O sentinel-1 e 3 são dedicados à monitorização de meio terrestre e oceânico, a missão sentinel-2 à monitorização de meio terrestre essencialmente, as missões 4 e 5 à monitorização atmosférica e o sentinel-6 para aplicações de geodesia e oceanografia (ESA, n.d.).

A maior parte dos sensores para observação terrestre possuem resoluções espectrais que não têm uma performance tão eficaz quando se trata de observação do oceano. Os oceanos, que cobrem mais de dois terços da superfície da Terra, desempenham um papel fundamental no sistema climático global, sendo por isso importante a sua monitorização. Por essa razão, foram construídos especificamente sensores/satélites para observação de água, como por exemplo, Nimbus-7, MOS, SeaWiFS.

O primeiro sensor capaz de adquirir dados da cor do oceano foi o CZCS, seguido do SeaWiFS. Dado à importância destes dados em vários setores, foram construídos outros sensores capazes de detetar pequenas mudanças de cor nos oceanos, tais como, dois sensores MODIS – um no satélite Terra e outro no satélite Aqua –, um sensor VIIRS e o MERIS, que devido a perda de comunicação com o satélite ENVISAT foi terminado em abril de 2012 (Meister & Franz, 2014).

- **Nimbus-7**

O satélite Nimbus-7, lançado em 1978, foi a última missão do programa Nimbus, um programa de pesquisa e desenvolvimento de satélites meteorológicos. Este satélite foi colocado numa órbita quase-polar, heliossíncrona, a uma altitude de 955 km.

Foi desenhado para detetar e coletar dados atmosféricos e *ocean colour*, tendo a bordo, para esse efeito, o primeiro sensor para monitorização dos oceanos e corpos de água da Terra – o *Coastal Zone Colour Scanner* (CZCS). Tinha o objetivo de mapear as concentrações de clorofila na água, indicar a distribuição de sedimentos, temperaturas de águas costeiras, correntes oceânicas e salinidade e apresentava uma resolução espacial de 825 m (Hu et al., 2012).

- **SeaWiFS**

O sucesso do sensor CZCS levou a NASA a desenvolver um satélite específico, com o objetivo de realizar medições de cor do oceano, o satélite SeaStar, também conhecido por OrbView-2, com o sensor SeaWiFS a bordo. Lançado a 1 de agosto de 1997 a uma altitude inicial de 278 km onde foram iniciados e testados os seus sistemas. O sensor foi ligado pela primeira vez enquanto passava a sede da NASA em setembro do mesmo ano, a uma altitude final de 705 km. Possui 8 bandas espectrais desde 412 a 865 nm, resolução espacial global de 4 km e local de 1 km. O fim da missão deu-se nos finais de 2010.

- **MODIS**

O sensor MODIS encontra-se a bordo dos satélites Terra (MODIS-T) e Aqua (MODIS-A) a uma altitude de 705 km numa órbita quase-polar e heliossíncrona. Estes sensores visualizam toda a superfície terrestre da Terra a cada 2 dias, adquirindo informação em 36 bandas espectrais com 3 resoluções espaciais diferentes. As bandas 1 e 2 apresentam uma resolução espacial de 250 m, da banda 3 à banda 7 uma resolução de 500 m, e as restantes bandas com resolução de 1 000 m. Tem uma resolução radiométrica de 12 bits, obtendo imagens de alta resolução radiométrica (Jensen, 2015).

Os dados coletados por este sensor são usados para obter informações sobre temperaturas e humidades atmosféricas, da superfície terrestre e oceânica, cor dos oceanos, fluorescência de clorofila, sedimentos oceânicos, produtividade primária, cobertura terrestre e alterações associadas, entre outros. Estes dados ajudam na compreensão das dinâmicas e processos globais que ocorrem na Terra, oceanos e baixa atmosfera, de maneira a desenvolver modelos de sistemas terrestre interativos

#### 4. Detecção Remota

capazes de prever mudanças globais com boa precisão. Os sensores MODIS, devido às suas características, é um dos sensores mais adequado ao objetivo deste trabalho. O MODIS-T apresenta problemas de calibração, pelo que vários investigadores preferem utilizar apenas o MODIS-A para aplicações marinhas (Franz, 2008).

- **VIIRS**

Em outubro de 2011, foi lançado a bordo do satélite Suomi NPP, o sensor Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, dando assim continuidade aos dados do AVHRR e do MODIS. Este sensor possui um telescópio giratório de reflexo, tendo 22 bandas abrangendo os comprimentos de onda do visível/IV-próximo, IV-médio e IV-distante, dia e noite (Goldberg, Cikanek, Zhou, & Price, 2017).

Os dados adquiridos por este sensor podem ser utilizados para medir propriedades de nuvens e aerossóis, temperatura da superfície do mar e da terra, a cor dos oceanos, movimento e temperatura do gelo, localizar incêndios, entre outros.

A Figura 14, é um compósito de dados do sensor VIIRS, onde podemos ver aproximadamente no centro da imagem, o Mar Negro, que se destaca pela sua cor turquesa, fruto da presença de cocolitoforos. As manchas de cor branca correspondem a nuvens.



**Figura 14** - Compósito VIIRS de uma porção da Afro-Eurásia a 2 de julho de 2019 (Fonte: NASA)

#### 4.5. Processamento e Interpretação de imagens

O processamento permite que se passe de uma imagem em bruto para uma imagem, em que se consegue fazer a interpretação através das assinaturas espectrais. Para o processamento, é necessário fazer algumas correções – no que se chama de cadeia de pré-processamento – correção atmosférica, geométrica, radiométrica, deteção de nuvens e remoção de ruído, entre outros.

A cadeia de processamento em si, descreve as alterações introduzidas na imagem desde a aquisição feita pelo sensor. Os passos associados são descritos através de níveis de processamento, onde o Nível 0 corresponde aos dados originais adquiridos pelo sensor; o Nível 2, dados geofísicos, como refletância, temperatura, concentrações minerais e com correções já aplicadas; Nível 3, montagem de diferentes mosaicos para fazer mapas regionais ou globais.

Os dados adquiridos pelos sensores podem apresentar certas anomalias, como distorção e bandeamento, que levam à realização de correções nas imagens. A distorção resulta da geometria das lentes, dos sensores e da própria ampliação das zonas em estudo e é frequente em imagens de satélite de alta resolução e nas imagens aéreas (Schowengerdt, 2012). Quando temos imagens com partes sem informação, estamos na presença de bandeamento.

A análise das imagens permite-nos realizar melhorias às imagens digitais, como por exemplo o contraste. O contraste trata da capacidade de distinguir diferenças entre as superfícies de acordo com as tonalidades. Menos variedade de cinzas na imagem revelam poucos detalhes, o que faz com que o seu contraste seja baixo. A aplicação de filtros, também é uma prática comum na análise de imagens para posterior interpretação da mesma. São aplicados filtros direcionais numa matriz para as correções serem aplicadas numa direção privilegiada, de maneira a ser possível a determinação de alinhamentos preferenciais numa imagem (Camps-Valls, Tuia, Gómez-Chova, Jiménez, & Malo, 2011). Filtros não direcionais podem salientar fenómenos de alta frequência, aumentando o contraste, ou suavizar a imagem, aproximando o valor de um pixel ao do vizinho, são chamados de filtros passa alto e filtro passa baixo, respetivamente.

Imagens de composição colorida, são formadas por 3 bandas e 3 canais. Os canais são definidos pelo software como canal vermelho, verde e azul. Para termos a composição de uma imagem de cor real, será necessário atribuir a banda do vermelho ao canal vermelho, a banda dos azuis ao canal azul e o mesmo para o canal verde.

A classificação de imagens pode ser feita sem supervisão, onde a classificação é automática – computador reconhece padrões de forma automática sem ser necessário dizer que uma classe é diferente de outra (Romero, Gatta, & Camps-Valls, 2016). A classificação pode ser ainda realizada através de dados de calibração e de validação, ou seja, com supervisão. Estes dados são obtidos no terreno, e para os quais temos segurança da sua caraterização.

### 4.6. Aplicações de Detecção remota na área do Vulcanismo Submarino

A deteção remota é usada em várias áreas de acordo com vários objetivos. As imagens podem ser adquiridas repetitivamente, com vários períodos de tempo – desde dias, semanas ou anos – chamando-se informação multitemporal. Diferentes sensores oferecem informação complementar e juntos, facilitam a interpretação e classificação de imagem. O uso de várias bandas do espectro ajuda a identificar os alvos com maior precisão. Segundo *Fundamentals of Remote Sensing*, (n.d.), estas combinações de características são usadas em áreas como agricultura,

## 4. Detecção Remota

floresta, geologia, hidrologia, topografia, oceanos e zonas costeiras, cobertura e uso do solo, superfícies glaciares, sendo que a aplicação principal neste contexto específico, é em Vulcanismo Submarino.

### 4.6.1. Limitações e vantagens

Devido à localização remota de eventos vulcânicos submarinos a observação de produtos de Vulcanismo Submarino, como tapetes de pedras pomes e plumas de descoloração da água, é possível, mas no caso de imagens subaéreas não se consegue ver a sua dimensão total. A deteção remota permite a observação destes produtos na sua totalidade, o que faz com que seja uma técnica bastante importante para a deteção e/ou monitorização de erupções submarinas.

A análise de dados oceânicos pode ser um processo de alguma dificuldade devido à sua interpretação (Sousa & Silva, 2011), no entanto, neste contexto acabam por ser uma ajuda na deteção dos eventos em questão:

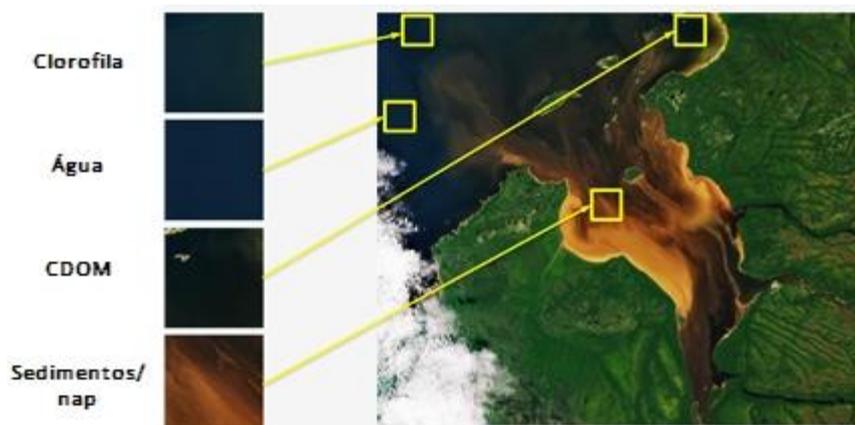
- A existência de sedimentos em camadas superiores, fazem com que a refletância seja maior, podendo inferir confusão com águas pouco profundas e límpidas. Em alto mar, a existência de sedimentos em suspensão pode ser indicadora de Vulcanismo Submarino;
- A alteração na superfície da água, como rugosidade e materiais em suspensão, pode levar a reflexão especular ou outras influências na cor/luminosidade e assim detetar mais facilmente estes eventos devido aos detritos ejetados;
- “*Blooms*” de *Trichodesmium*, uma cianobactéria microscópica e fotossintética, formam longos cordões na superfície oceânica e podem ser confundidos com tapetes de pedras pomes. Estão também associados a erupções submarinas, dado que respondem positivamente à entrada de ferro em regiões pobres (Ver secção 3.4).

Há casos específicos onde as características da coluna de água diferem das características das águas do oceano, como por exemplo Mar Vermelho, Mar Negro, entre outros. Segundo Raitsos, Pradhan, Brewin, Stenchikov, & Hoteit, (2013) o Mar Vermelho apresenta um pico máximo de concentração da *clorofila-a* no Inverno e concentrações mínimas no Verão. No entanto, no mês de junho, ocorrem eddies anti-ciclónicos que transportam nutrientes/*clorofila-a* para o centro do Mar Vermelho, sendo por isso uma fonte importante de nutrientes. Por sua vez, o Mar Mediterrâneo apresenta águas oligotróficas com menos 30 % de cor azul e menos 15% de cor verde do que o oceano e, por isso, os dados adquiridos nesta zona, referentes a concentrações de clorofila, precisam de ser processados a nível regional (Volpe et al., 2007). O Mar Negro, como podemos ver

na figura 14, apresenta cores turquesas devido à presença de cocolitofórideos, um grupo de fitoplâncton com carapaças carbonatadas, que em condições favoráveis, floresce e se multiplica, apresentando estas tonalidades, que se podem confundir com plumas de descoloração de água (Moore, Dowell, & Franz, 2012).

Em zonas costeiras (Figura 15), a cor da água pode ser influenciada por fatores mais diversos, como escoamento de rios, ressuspensão de areia e sedimentos do fundo através de marés, entre outros

(Feldman, n.d.). Águas que estejam rodeadas por florestas apresentam uma cor castanho-amarelada, devido à concentração de taninos libertados por decomposição vegetal.



**Figura 15** - Influências costeiras na cor do oceano (Fonte: ARSET, NASA)  
Nota: CDOM – Matéria orgânica dissolvida colorida; Nap – Partículas não algais

Uma das limitações desta técnica com recurso a dados óticos é referente à impossibilidade de adquirir dados da superfície terrestre quando na presença de nuvens. Outra limitação referente à deteção de produtos vulcânicos é o *'glint'*, ou seja, o brilho do sol, que devido ao ângulo de incidência dos raios solares na água, faz com que este fique registado nas imagens, não sendo possível obter informações sobre a superfície da água. No entanto, o *'glint'* torna evidente petróleo que esteja à superfície da água fruto de derramamento (Innman, Easson, Asper, & Diercks, 2010).

Os satélites comerciais e as novas constelações privadas permitem a monitorização detalhada de eventos, nomeadamente através do *tasking* dos satélites. É possível aumentar a precisão dos dados adquiridos por Detecção Remota, através de dados recolhidos *in situ*. Os produtos desenvolvidos através destes dois métodos são utilizados em diversas aplicações de Detecção Remota em eventos vulcânicos. Contudo, a quantidade de dados recolhida por estes sensores é bastante elevada e foi necessário a criação de uma técnica para os processar e analisar.

De maneira a descobrir padrões em grandes volumes de dados, são explorados conjuntos de dados através de estruturas de *data mining*. Estas estruturas implementam uma ampla variedade de algoritmos, como por exemplo *clustering* – estudo formal de métodos e algoritmos para o agrupamento de objetos de acordo com similaridades entre eles ou características intrínsecas (Jain, 2010) – árvores de decisão e regressão, entre outros. A inteligência artificial é um exemplo

#### 4. Detecção Remota

deste tipo de atividade – são reconhecidas características semelhantes, permitindo assim a deteção de novos padrões a uma velocidade maior do que na maioria das tecnologias convencionais (Acemoglu & Restrepo, 2018; O’Leary, 2013).

##### 4.6.2. Exemplos de aplicações de DR em Vulcanismo

A Detecção Remota, já foi usada em vários projetos relativos a Vulcanismo:

- MODVOLC é um algoritmo desenvolvido pelo Instituto de Geofísica e Planetologia do Hawaii, que usa dados de baixa resolução espacial no comprimento de onda dos infravermelhos, adquiridos pelo MODIS, para mapear a distribuição global de anomalias vulcânicas termais em tempo quase real (Wright, Flynn, Garbeil, Harris, & Pilger, 2004).
- AVA é o maior arquivo de dados de vulcões, nomeadamente dados multiespectrais de alta resolução adquiridos pelo sensor ASTER.
- O radar de abertura sintética fornece dados de imagem de alta resolução dia ou noite, quando o céu está nublado ou limpo, o que é particularmente importante num local tropical nublado, como o arquipélago de Tonga por exemplo.
- Shi & Wang, (2011) usou dados adquiridos pelo MODIS, para estudar as alterações ambientais provocadas pela erupção submarina do vulcão Hunga Tonga-Hunga Ha’apai em março de 2009. Para este objetivo foram utilizados dados da turbidez do oceano, temperatura da superfície do oceano, dados da pluma de cinzas e gases vulcânicos.
- Usando os produtos de refletância do ASTER, (Urai & Machida, 2005) demonstrou que há dois tipos de plumas de descoloração. As plumas de cor branca a esverdeadas apresentam refletância alta, média e baixa na banda 1, banda 2 e banda 3, respetivamente, enquanto que as plumas de cor vermelha a castanho apresentam refletância alta na banda 2, média na banda 1 e baixa na banda 3 – a banda 1 corresponde ao comprimento de onda 0.56  $\mu\text{m}$ , banda 2 a 0.66  $\mu\text{m}$  e banda 3 a 0.81  $\mu\text{m}$ .
- Mantas & Pereira, (2010) analisaram as características espectrais dos tapetes de pedras pomes de várias erupções, e também o seu processo de formação, transporte e impactos associados. Os dados utilizados foram adquiridos por diversos sensores: ASTER, Landsat-7 ETM+, MODIS (tanto o sensor a bordo do satélite Terra como o Aqua) e QuickBird-2. Foram ainda recolhidos testemunhos de equipas de navios que se depararam com os eventos estudados.

Neste caso, a Detecção Remota será utilizada para a caracterização de erupções vulcânicas submarinas conhecidas entre 2000 e 2018, através da análise e interpretação de imagens MODIS, LANDSAT e VIIRS.

## 5. Enquadramento geológico e tectónico das regiões em estudo

Como descrito na secção 3.2., vários estudos mostram a existência de ‘montanhas’ oceânicas, que estão associadas a repetitiva atividade vulcânica submarina. Os arcos vulcânicos são um dos principais ambientes vulcânicos ativos na Terra totalizando cerca de 22 000 km de comprimento em ambiente submarino, onde pelo menos, 6 900 km são arcos intra-oceânicos predominantemente submarinos – delimitados de ambos os lados por crosta oceânica. Izu-Bonin-Mariana, Tonga-Kermadec, New Hebrides são exemplos deste tipo de ambiente. Lesser Antilles e West Aleutian são ambientes também intra-oceânicos mas possuem uma maior porção de vulcões subaéreos (Baker et al., 2008).

Os fatores geológicos, como espessura das camadas de sedimentos, tipo de rocha, proximidade de áreas vulcânicas, profundidade, entre outros, são altamente variáveis. Desta forma, a caraterização da geologia será feita de um modo geral. Segundo a localização dos vulcões em estudo, foram seleccionadas áreas que mostram um maior número de vulcões para caraterização tectónica e geológica. Por exemplo, o arco de Tonga-Kermadec/New Hebrides abrange um total de 14 vulcões com erupções submarinas no período de tempo estudado, e será por isso, caraterizado tectónica e geologicamente.

### 5.1. Izu-Bonin-Mariana

O sistema Izu-Bonin-Mariana é uma margem convergente intraoceânica, que se estende mais de 2 800 km para Sul, indo do Japão ao Sul de Guam (Figura 16), incluindo as ilhas de Izu, Bonin e Mariana. Ao longo deste sistema a placa do Pacífico é subductada pela Placa das Filipinas (Resing et al., 2009), com um a taxa de subducção que varia de ~2 cm por ano a Sul e ~6 cm a Norte. O Challenger Deep, situado no sudoeste da Fossa das Marianas, é mais conhecido por ser o ponto mais profundo dos oceanos com uma profundidade que ultrapassa os 10 920 ±

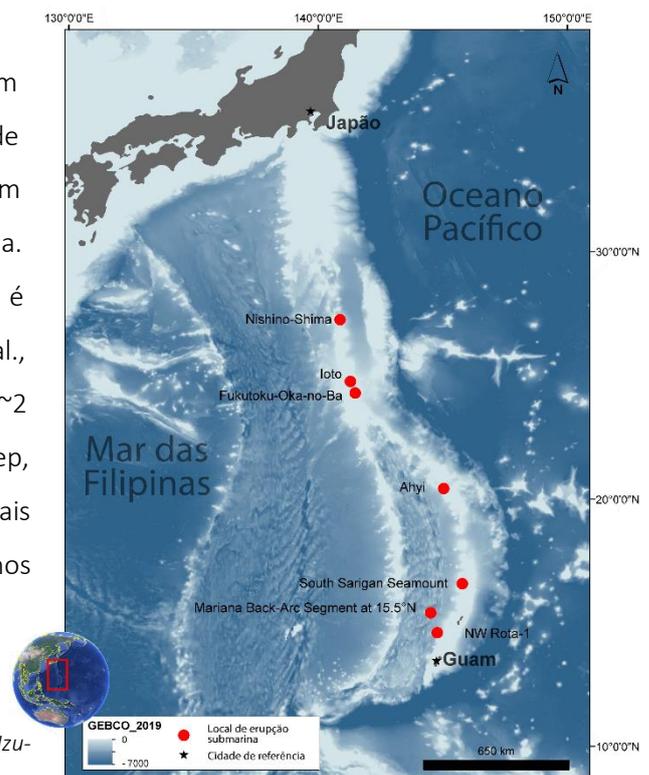


Figura 16 - Localização dos vulcões em estudo localizados na área Izu-Bonin-Mariana (Fonte dos dados batimétricos: GEBCO)

## 5. Enquadramento Geológico das regiões em estudo

5 m (Gardner, Armstrong, Calder, & Beaudoin, 2014; Nakanishi & Hashimoto, 2011).

O enriquecimento dos materiais do manto – causado pela libertação de água da placa subductada – gera atividade vulcânica ao longo do arco (Peate e Pearce, 1998 in Resing et al., 2009).

Esta área apresenta desde bacias oceânicas a crosta antiga, e vários edifícios vulcânicos, falhas, entre outros. As bacias oceânicas dominam o fundo do mar com áreas repletas de ‘*hummocks*’ – interpretados como fluxos de lava densos e *pillowlavas* –, terrenos vulcânicos suaves e bacias com falhas e/ou sedimentos. O terreno ‘*hummock*’ ocorre ao longo do eixo dos centros de expansão e as bacias sedimentadas ocorrem em todo o retro-arco com pouco relevo e morfologia suave. As bacias estão geralmente ligadas por escarpas com falhas acentuadas, expondo crosta mais antiga (Resing, Chadwick, & Merle, 2016).

Referente aos vulcões que registaram atividade submarina entre 2000 e 2018, esta zona apresenta 7 vulcões: Ahyi, Fukutoku-Oka-no-Ba, Ioto, Mariana Back arc aos 15,5°N, Nishinoshima, NW Rota-1 e South Sarigan Seamount.

### 5.2. Tonga-Kermadec e New Hebrides

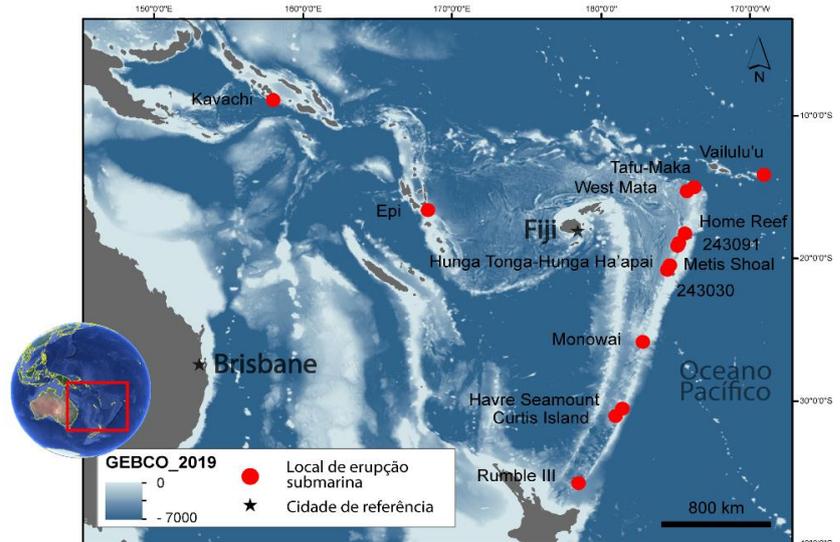
O arco Tonga-Kermadec estende-se por 2 500 km entre a Nova Zelândia e as Ilhas Fiji, sendo assim o arco mais longo do planeta (de Ronde et al., 2007). Esta zona é um dos sítios tectonicamente mais complexos do planeta, com a taxa de subducção e taxa de abertura de retro-arco mais rápidas do mundo. É o único lugar onde são produzidos magmas boniníticos.

Trata-se, portanto, de um sistema de subducção, no qual a placa do Pacífico é subductada a Oeste pela Placa Indo-Australiana (Baumberger et al., 2014). As taxas de subducção deste sistema variam de ~24 cm a norte e ~6 cm a sul (de Ronde et al., 2001).

As principais características deste sistema são a subducção da placa do Pacífico, a cobertura da fossa Tonga-Kermadec por sedimentos, magmatismo de arco ao longo da cordilheira Tonga-Kermadec e extensão da crosta na bacia de Lau e no retro-arco de Havre Trough (Smith & Price, 2006).

Denota-se a existência de numerosos vulcões arco-ilha subaéreos e submarinos devido ao alto Vulcanismo que se faz sentir ao longo deste sistema (Kemner, Haase, Beier, Krumm, & Brandl, 2015). Depósitos subaéreos tornam aparente a ocorrência de Vulcanismo explosivo silicioso ao longo do arco (Lloyd et al, 1996 in Rotella et al., 2015).

Esta zona apresenta 14 dos vulcões que registam atividade submarinas no período de tempo estudado: 243030, 243091, Curtis Island, Epi, Havre Seamount, Home Reef, Hunga Tonga-Hunga Há'apai, Kavachi, Metis Shoal, Monowai, Rumble III, Tafu-Maka, Vailulu'u e West Mata (Figura 17).



**Figura 17** - Localização dos vulcões em estudo localizados na área Tonga-Kermadec e New Hebrides (Fonte dos dados batimétricos: GEBCO)

### 5.3. Aleutian Islands e Juan de Fuca Ridge

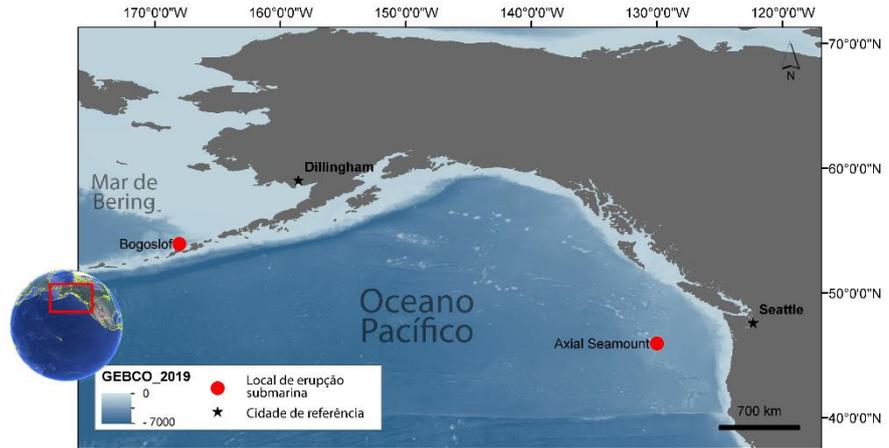
Gabsatarov, Steblov, & Frolov, (2013) confirmam a existência de uma microplaca tectónica referente ao mar de Bering que, na sua maioria se move em direção a Sul. Este movimento permite uma extensão na Península de Seward e a migração para Sul da zona de subducção Aleutiana (Cross & Freymueller, 2008). Na parte oriental a taxa de convergência é aproximadamente 7,5 cm por ano, enquanto na zona oeste esta taxa apresenta valores de ~2,5 cm por ano (Waythomas & Cameron, 2018).

O mar de Bering possui desde bacias abissais, arcos-ilha a cordilheiras submarinas. A maior bacia Aleutiana – Aleutian Basin – está coberta por sedimentos que chegam a uma espessura de 4 km na parte central da bacia, aumentando nos limites da bacia. A cordilheira submarina Bowers apresenta uma espessura de sedimentos que cobrem a encosta leste, na ordem dos 0,7-0,9 km, enquanto na encosta oriental a base está exposta em algumas escarpas. O arco vulcânico associado a esta zona estende-se desde Cook Inlet, para o Oeste até a Ilha Attu – limitando o Mar de Bering a Sul. Este arco é altamente geodinâmico devido a subducção oblíqua (Chekhovich, Sukhov, Sheremet, & Kononov, 2012).

Quanto à dorsal meso-ocêânica Juan de Fuca, com cerca de 500 km de comprimento, apresenta uma taxa de abertura com ~5,7 cm por ano e separa a placa do Pacífico da placa Juan de Fuca (Weekly et al., 2013). A formação de nova crosta nesta dorsal, faz com que a placa Juan de Fuca seja subductada pela placa da América do Norte.

## 5. Enquadramento Geológico das regiões em estudo

É caracterizada por ter predominância de atividade de montes submarinos e de hot spot no flanco ocidental, enquanto o flanco oriental tem atividade frequente de correntes de turbidez na costa da América do



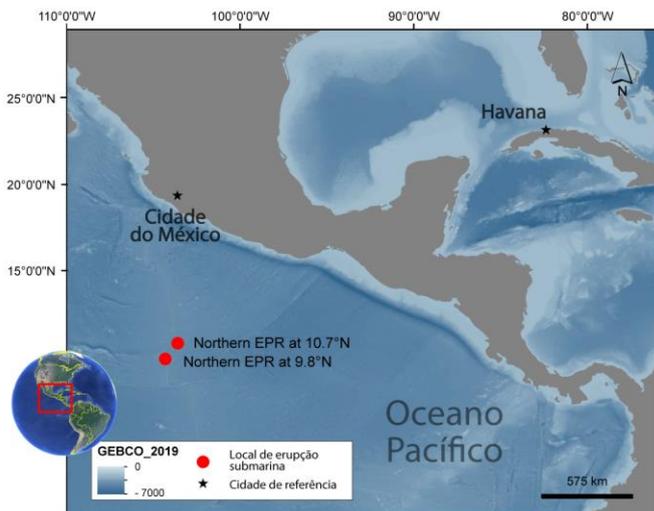
**Figura 18** - Localização dos vulcões em estudo localizados na área das Aleutian Islands e Juan de Fuca Ridge (Fonte dos dados batimétricos: GEBCO)

Norte (K. M. Costa et al., 2016). Estudos realizados a lavas provenientes do Axial Seamount e a lavas ao longo da dorsal mostram que se tratam de lavas transicionais entre MORB – Basalto de Rife Oceânico – de tipo normal e enriquecido (Rhodes, Morgan, & Li, 1990).

Referente aos vulcões com atividade vulcânica submarina entre 2000 e 2018, esta zona apresenta dois vulcões: o Bogoslof nas Ilhas Aleutas e o Axial Seamount na parte central da dorsal Juan de Fuca (Figura 18).

### 5.4. East Pacific Rise

O East Pacific Rise (EPR) está localizado na bacia do Sudeste do Oceano Pacífico. A Norte, o EPR forma o limite entre a placa do Pacífico e a placa de Cocos, enquanto a Sul é o limite entre a placa do Pacífico e Nazca (Vithana, Xu, Zhao, Zhang, & Luo, 2019). A taxa de abertura ao longo desta dorsal varia de 7 a 17 cm por ano. As rochas eruptivas mais predominantes são basaltos do tipo MORB-N (Waters, Sims, Perfit, Blichert-Toft, & Blusztajn, 2011).



**Figura 19** - Localização dos vulcões em estudo localizados na área EPR (Fonte dos dados batimétricos: GEBCO)

Esta zona apresenta 2 vulcões em estudo: Northern EPR aos 10,7°N e Northern EPR aos 9,8°N no East Pacific Ridge (Figura 19).

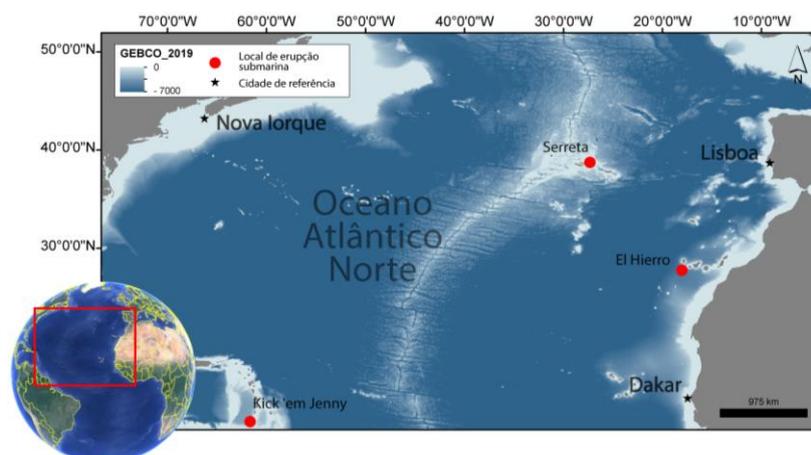
## 5.5. Oceano Atlântico Norte

Esta área mostra 3 dos vulcões com registo de atividade vulcânica submarina no período de tempo estudado, que apresentam situações geológicas bastante diferentes: Serreta, El Hierro, e Kick'em Jenny (Figura 20).

Lesser Antilles é um arco de 800 km de comprimento, que foi formado devido à subducção da placa oceânica do Atlântico pela placa das Caraíbas, que apresenta uma taxa de subducção de ~20 mm por ano (Brink & López-Venegas, 2012). Estudos geoquímicos mostram que os magmas que entram em erupção nesta zona resultam da fusão de basaltos empobrecidos do tipo MORB metassomatizados (Huang, Lundstrom, Sigurdsson, & Zhang, 2011).

A erupção da Serreta ocorreu na dorsal da Terceira, nos Açores. Esta dorsal apresenta uma orientação geral NW-SE, atravessando as ilhas Graciosa, Terceira e São Miguel (Kueppers, Nichols, Zanon, Potuzak, & Pacheco, 2012). A taxa de abertura é considerada ultralenta, ou seja, < 2 cm por ano (Madureira, Rosa, Marques, & Silva, 2016). Os flancos são assimétricos, com o lado sul a apresentar declives mais altos, próximos ao fundo do mar e profundidades superiores a 1 800 metros.

A ilha de El Hierro, no arquipélago das Canárias, está localizada no Nordeste do Oceano Atlântico. Este arquipélago originou-se quando a placa africana se moveu sobre um hot spot (Rivera et al., 2013). A estrutura geológica desta ilha está caracterizada por três zonas de rifte onde a maior parte das erupções ocorreram. A existência de diques sub-verticais nestas zonas alimentam erupções fissurais, que consistem essencialmente em fluxos de lava máficos e emissões piroclásticas com projeção balística (Becerril, Cappello, Galindo, Neri, & Del Negro, 2013).



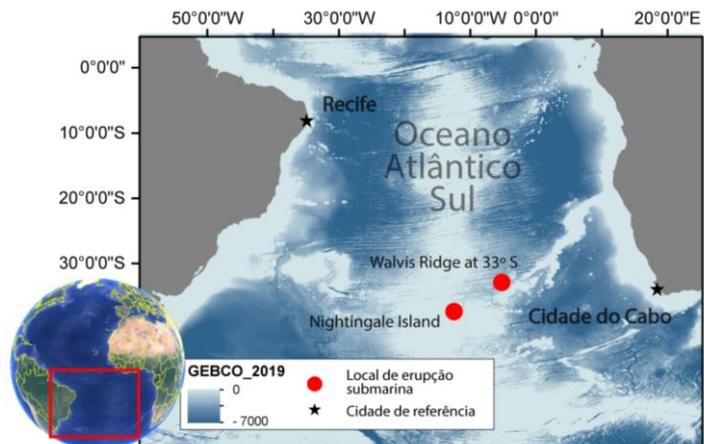
**Figura 20** - Localização dos vulcões em estudo localizados na área referente ao Oceano Atlântico Norte (Fonte dos dados batimétricos: GEBCO)

## 5. Enquadramento Geológico das regiões em estudo

### 5.6. Oceano Atlântico Sul

Esta área mostra 2 dos vulcões com registo de atividade vulcânica submarina no período de tempo estudado: Walvis Ridge aos 33°S e Nightingale Island (Figura 21).

A Walvis Ridge e a Nightingale Island estão situados no Sul do Oceano Atlântico, sendo que a Nightingale Island faz parte do grupo Tristan da Cunha. O Walvis Ridge é um cume submarino que a Norte cruza a margem continental africana e poderá estar relacionado com a província de basalto de Etendeka, em África, e estende-se quase até à crista meso-oceânica do Atlântico a Sul, onde dados batimétricos sugerem que as montanhas submarinas do longo de Tristan-Gough estão confinadas à província mais jovem que se estende do extremo sudoeste da Walvis Ridge (O'Connor & Jokat, 2015; Salters & Sachikocher, 2010). Tristan de Cunha representa a expressão superficial de um hot spot profundo.



**Figura 21** - Localização dos vulcões em estudo localizados na área referente ao Oceano Atlântico Sul (Fonte dos dados batimétricos: GEBCO)

### 5.7. Mar vermelho

O Mar Vermelho é uma das zonas oceânicas mais jovens do mundo, que se desenvolveu durante a rotação anti-horária da Arábia, a partir da Núbia. Trata-se de uma dorsal oceânica ultralenta com taxas entre os 10 mm por ano na parte Norte e entre os 15,5 mm por ano no Mar Vermelho Central (Augustin et al., 2014; Ligi, Bonatti, & Rasul, 2015).

A cobertura de sedimentos é constituída essencialmente por evaporitos do Miocénico com carbonatos pelágicos mais jovens – apresentam espessuras até 5 km.

Esta zona apresenta um grupo vulcânico ativo em estudo: o grupo Zubair (Figura 22), que é a única evidência superficial de Vulcanismo ativo ao longo de todo o Mar Vermelho, juntamente com as ilhas de Tair e Hanish-Zukur (Xu et al., 2015).



**Figura 22** - Localização dos vulcões em estudo localizados no Mar Vermelho

## 6. Metodologia

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada com o intuito de caraterizar as erupções submarinas que ocorreram entre os anos de 2000 e 2018, através de métodos de Detecção Remota.

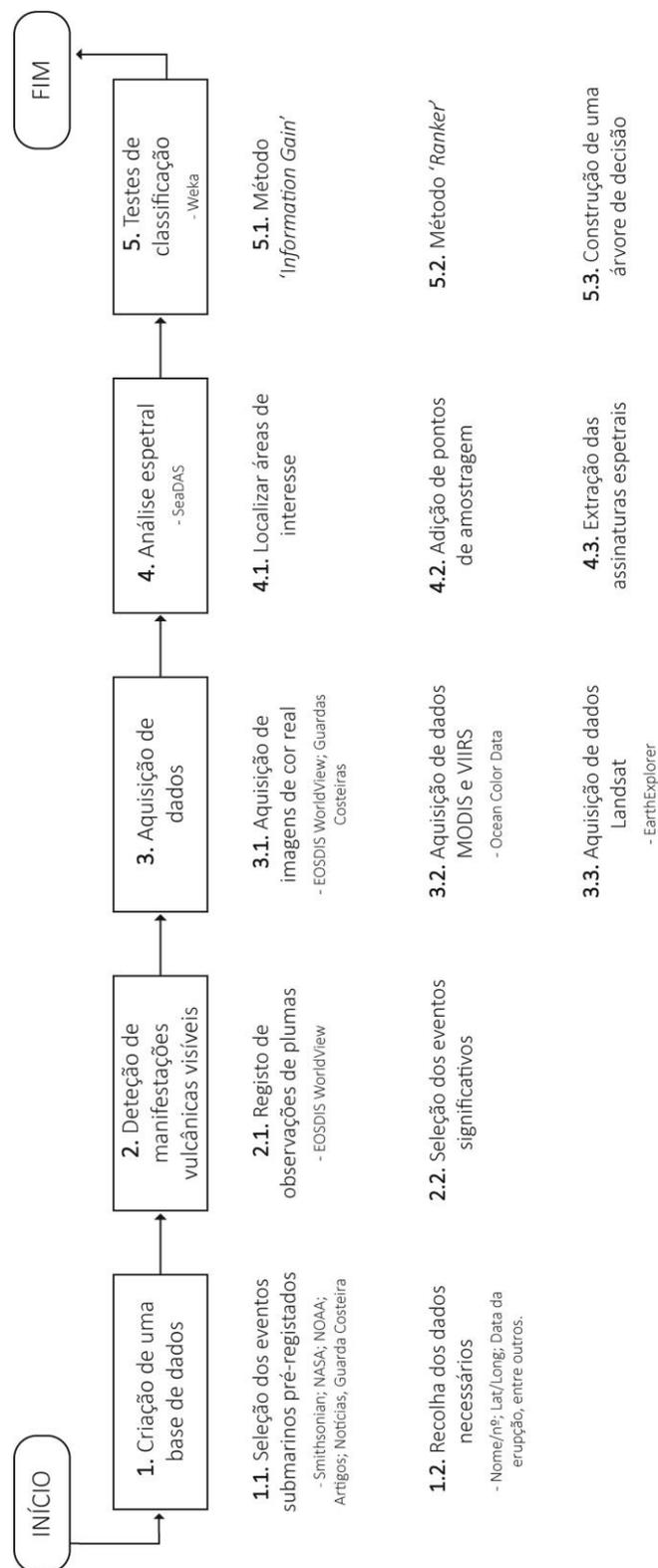


Figura 23 - Esquema da metodologia utilizada neste trabalho

## 6. Metodologia

Visto que não há uma metodologia recorrente, que seja utilizada por outros trabalhos similares de análise de plumas de descoloração de origem vulcânica, a metodologia utilizada segue um padrão idêntico à utilizada por Mantas et al., (2011), empregando a banda dos 555nm para análise das plumas de descoloração. A metodologia é explicada na figura 23, através da demonstração de todos os passos efetuados para a realização deste trabalho.

### 6.1. Recolha de informação e Aquisição de dados

O primeiro passo para a caracterização de erupções submarinas é a identificação e seleção de eventos vulcânicos submarinos pré-registados através de recolha bibliográfica. Recorreu-se por isso, à base de dados do Smithsonian Institution, que possibilita a realização de pesquisas seletivas, neste caso de vulcões submarinos.

Posteriormente, foi ainda realizada uma pesquisa através de outras fontes – NASA, NOAA, Guardas Costeiras, artigos científicos, notícias, entre outros – para identificação de casos específicos, como formação de novas ilhas, e erupções submarinas em flancos de vulcões subaéreos.

A partir desta pesquisa, foram selecionados os vulcões cujas erupções se tinham dado entre os anos 2000 e 2018 e criada uma base de dados em Excel. Esta base de dados tem como principal objetivo a caracterização dos vulcões em estudo que foi feita através de vários pontos:

- **Nome e número do vulcão:** Devido à existência de vários vulcões sem nome, foi necessário recolher o número de identificação do vulcão. Estes números estão de acordo com a base de dados referente ao Smithsonian Institution;
- **Tipologia da erupção/vulcão:** Este tópico é referente à caracterização do vulcão de acordo com o seu comportamento, forma e características. Vulcanismo Submarino é o principal tipo de erupção, com exceção dos vulcões sub-aéreos com manifestações submarinas nos flancos.
- **Região, Sub-região, Latitude e longitude:** Localização exata do vulcão;
- **Data de atividade submarina:** datas com pré-registo de atividade submarina e analisadas para deteção de manifestações submarinas;
- **Profundidade:** a profundidade aproximada, a que o vulcão se encontra é uma das causas da observação ou não deste tipo de atividade vulcânica – pressão hidrostática;
- **Tectónica do local:** a tectónica do local influencia o tipo de erupção (Secção 2.1.2.);
- **Tipo de rocha principal e secundária:** associado à geologia do local;

- **Tipo de erupção e VEI associado:** a explosividade de uma erupção pode estar ligada a uma maior probabilidade de observação por deteção remota;
- **Evidências:** Tratam-se de observações históricas quando a erupção é registada à superfície. No caso de não haver observação de erupções submarinas, estas podem apresentar evidências sísmicas e/ou hidrofónicas. Pode ainda haver dúvidas relativas à erupção e nesse caso as evidências são incertas;
- **Caraterização geoquímica:** associada a diferentes tipos de descoloração;
- **Referências bibliográficas:** Informação utilizada na caracterização destes vulcões.

De maneira a verificar se é possível a visualização de manifestações vulcânicas submarinas à superfície, foi utilizado o EOSDIS WorldView (Figura 24), que se trata de uma aplicação da NASA, que permite navegar interactivamente por mais de 800 camadas globais de imagens de satélite de alta resolução. É possível, por isso, ver a superfície terrestre desde 20 anos atrás até à atualidade, em tempo quase real.

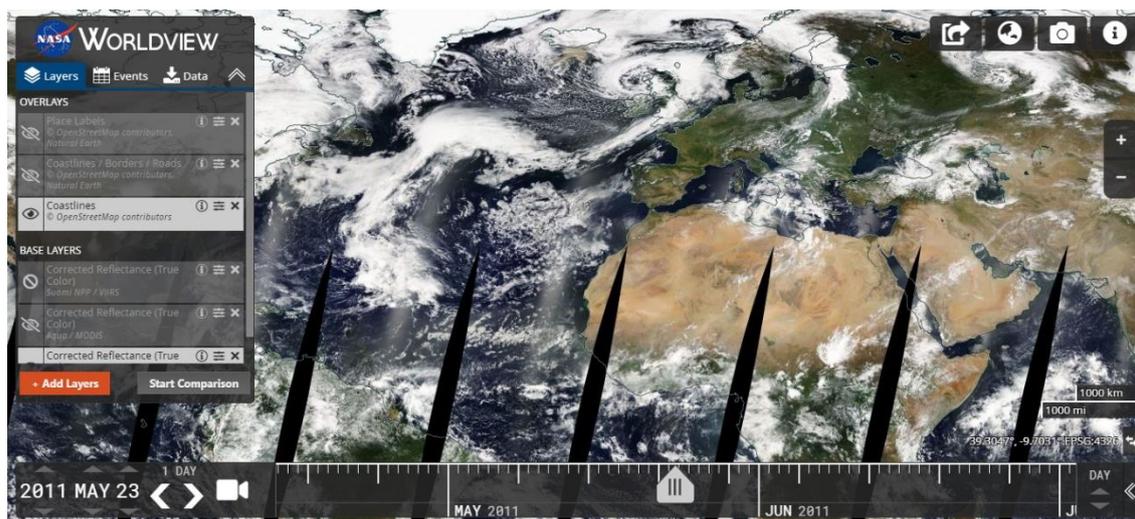


Figura 24 - EOSDIS WorldView, NASA

Com recurso às datas das erupções e às coordenadas de cada vulcão, foi analisado o período de erupção submarina de cada vulcão para a deteção de produtos vulcânicos visíveis nas imagens. As camadas utilizadas para este efeito foram adquiridas pelos sensores VIIRS e MODIS - Aqua e Terra. Os produtos de atividade vulcânica submarina que são analisados são nomeadamente plumas de descoloração e tapetes de pedras pomes.

Foram registadas todas as observações destas manifestações submarinas, para posteriormente serem selecionados os eventos significativos de cada erupção. Por eventos significativos, estão compreendidas imagens onde as plumas de descoloração sejam nítidas, se encontrem na sua expressão máxima, sem estarem cobertas por nuvens ou 'glint' para não restringir a capacidade de extrair conclusões.

## 6. Metodologia

Depois de terminada a avaliação das datas para as quais é possível a observação de plumas de descoloração e da seleção dos eventos significativos de cada vulcão, prosseguiu-se ao download dos dados aptos a análise espectral. Foram adquiridas as imagens de cor real referente a cada data, através do WorldView, sendo que em alguns casos foi necessário recorrer a imagens adquiridas por Guardas Costeiras, devido à baixa resolução espacial da aplicação em questão – nomeadamente nos casos referentes ao Fukutoku-Oka-no-Ba e a Nishinoshima foram utilizadas imagens adquiridas pela guarda costeira japonesa. As imagens de cor real foram corrigidas para realce da pluma de descoloração.

Para a aquisição de dados foi utilizado o site Ocean Colour da NASA, que permite adquirir dados do sensor SeaWiFS, MODIS, VIIRS e MERIS, desde de julho de 2002 até ao presente. Os dados adquiridos através deste site foram relativos aos sensores MODIS – Terra e Aqua – e VIIRS, dos dias previamente selecionados, alusivos a produtos de clorofila e temperatura da superfície do mar. A aquisição de dados Landsat foi realizada através do site EarthExplorer, da USGS.

Os dados foram todos adquiridos em nível 2, devido à incapacidade de processamento de dados de nível 0 por computadores que não sejam Linux. Como referido na secção 3.4. os dados de nível 2 já têm correções aplicadas, e por isso, podem ser analisados sem a necessidade de passarem por um pré-processamento. Outra razão para a utilização de dados de nível 2 é o facto destes dados se encontrarem disponíveis em várias plataformas de processamento na *cloud* – no caso da criação de um sistema de monitorização esta opção é a mais prática. A aquisição de dados não foi feita através de um compósito de oito dias – agrupamento de imagens referente a 8 dias consecutivos – dado que poderia haver perda de informação. Foi, por isso, adquirida dia a dia, nomeadamente para as datas em que foi detetadas manifestações vulcânicas submarinas à superfície.

### 6.2. Análise de dados

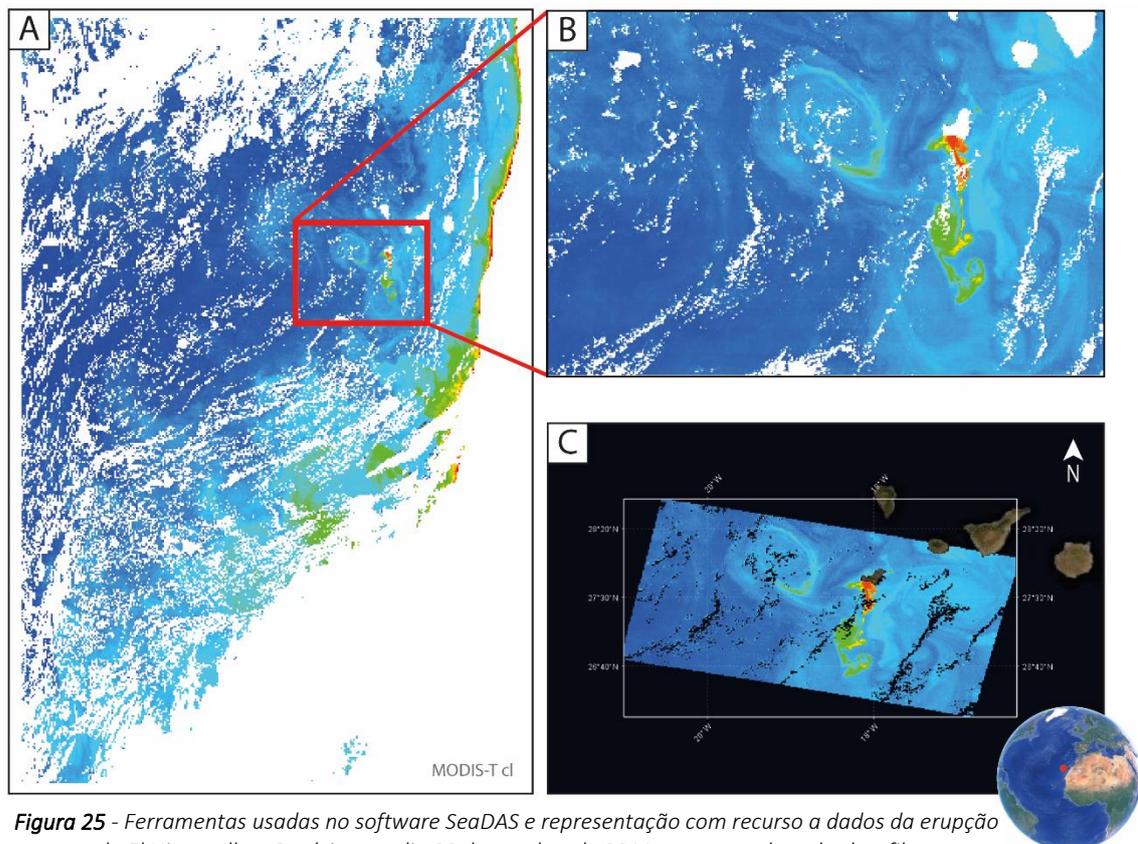
A análise dos dados MODIS e VIIRS foi realizada com recurso ao software SeaDAS, desenvolvido pela NASA. Este software permite o processamento, exibição, análise e controlo de qualidade dos dados da *Ocean Colour*. Foi desenvolvido originalmente para apoiar a missão SeaWiFS, sendo que na atualidade suporta a maioria das missões de *Ocean Colour*.

Os dados originais – que neste caso correspondem aos dados adquiridos em nível 2 – apresentam uma extensão maior do que a área de interesse e por isso, é necessário localizar estas áreas e redimensionar as imagens. Para isso foram usadas as ferramentas ‘*zoom in*’, ‘*crop*’ e ‘*reproject*’. Com recurso às ferramentas ‘*zoom in*’ é localizada a área que apresenta dados

referentes a eventos vulcânicos submarinos. A ferramenta *'crop'* cria um novo arquivo que é basicamente uma cópia espacialmente cortada do arquivo selecionado – os limites são a exibição dos dados no programa, depois de localizada a área de interesse (Figura 25 A e B). Este arquivo é posteriormente reprojetoado – é criado um novo arquivo de uma projeção de mapa específica (Figura 25 C).

De seguida, foram extraídas as assinaturas espectrais das diferentes plumas. Por assinatura espectral entende-se a intensidade com a qual um objeto reflete/emite radiação eletromagnética que incide sobre o alvo nos diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

O produto de *clorofila-a* foi um dos produtos usados para a observação das plumas e posterior extração das assinaturas espectrais – erupções vulcânicas submarinas são consideradas fonte de nutrientes para os oceanos, pelo que o fitoplâncton reagirá positivamente a eventos vulcânicos submarinos. Este produto foi usado maioritariamente para comparação das dimensões das plumas. A refletância de deteção remota (*rrs\_nnn* – Remote Sensing Reflectance) é um produto relativo aos valores de refletância da superfície dos oceanos, pelo que foi o produto mais utilizado para visualização de plumas de descoloração.



**Figura 25** - Ferramentas usadas no software SeaDAS e representação com recurso a dados da erupção do El Hierro, Ilhas Canárias, no dia 23 de outubro de 2011, com o produto de clorofila

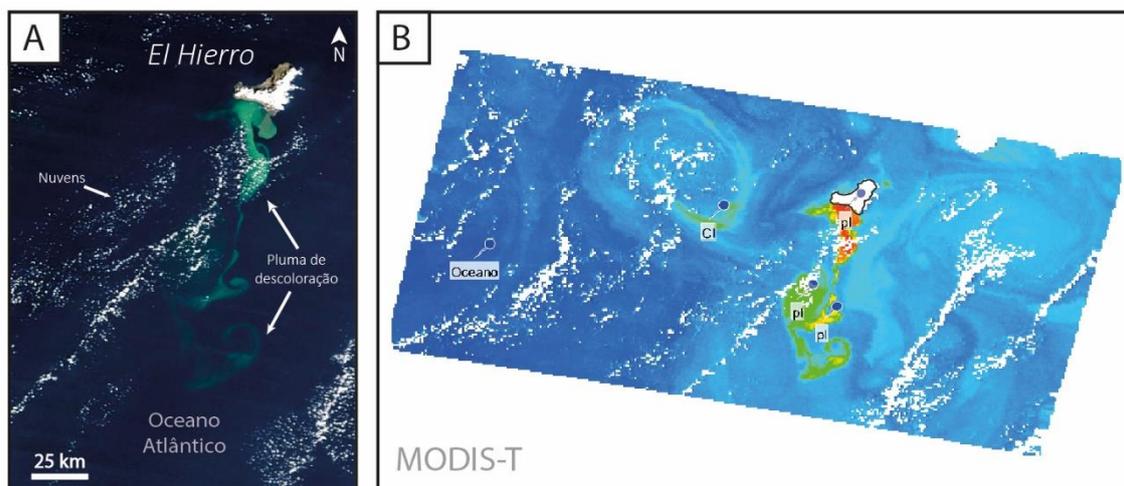
## 6. Metodologia

De maneira a realizar esta análise, foram adicionados pontos de amostragem em vários locais – ferramenta ‘add pin’. Esta ferramenta permite adicionar ‘marcadores’ numa determinada posição geográfica/pixel. Para melhor compreensão, estes pontos de amostragem foram divididos em diversas categorias:

- *pl* – plumas esbranquiçadas a esverdeadas;
- *pl\_cast* – plumas castanhas;
- *pl\_pom* – plumas referentes a tapetes de pedras pomes;
- *cl* – ‘blooms’ de clorofila
- *Oceano*.

Esta divisão é feita com base nas diferentes tonalidades da pluma de descoloração para possível tentativa de diferenciação das assinaturas espectrais das diferentes plumas. Os pontos de amostragem relativos a ‘blooms’ de clorofila e oceano servem como pontos de referência para distinção de produtos de origem biológica e vulcânica – os ‘blooms’ de clorofila podem ser confundidos com eventos vulcânicos devido à tonalidade que apresentam.

A Figura 26-A representa uma imagem de cor real, adquirida através do EOSDIS WorldView, referente à erupção submarina do vulcão El Hierro, a 23 de outubro de 2011. A figura B mostra os dados MODIS-T referentes a clorofila para esse dia, analisados no SeaDAS – cores mais quentes representam valores mais altos de concentração e cores frias valores mais baixos. O limite a preto que se observa na Figura 25-B foi inserida para uma melhor percepção dos limites da ilha.



**Figura 26** - Plumagens de descoloração referentes ao El Hierro no dia 23 de outubro de 2011, observadas na imagem de cor real (A) e representadas nos dados MODIS-T (B) através do SeaDAS.

Para visualização da assinatura espectral dos pontos de amostragem, recorreu-se à ferramenta ‘SpectrumView’ que exibe os valores de refletância do pixel associado ao marcador nos diferentes comprimentos de onda.

Os dados extraídos por análise espectral foram compilados em Excel para construção de gráficos de refletância da superfície do mar (*rrs\_nnn*) por comprimento de onda, e posteriormente, serem submetidos a testes de classificação.

Os testes de classificação realizados têm como objetivo avaliar se a informação recolhida permite a identificação de áreas de interessa para posterior análise. Para isso foi utilizado o software *Weka*, que permite a execução de algoritmos de *data mining*.

Foi realizada uma análise de atributos com base num método chamado de “*Information Gain*”, de forma a avaliar quais as melhores bandas para deteção de plumas, neste caso para separar as plumas de origem vulcânica do oceano. Este método mede o ganho de informação, ou seja, mede a quantidade de informação adquirida ao adicionarmos a banda em questão. Para tal, foi criado um conjunto de classes simplificadas onde ‘*plume*’ é referente a plumas de origem vulcânica e ‘*oc*’ é referente a oceano. A criação destas classes simplificadas permite reduzir o erro associado a estes testes. Este método apresenta sempre valores entre 0 e 1, sendo que atributos que contribuem com informação, têm um ganho superior e devem por isso ser escolhidos na construção de modelos de *machine-learning* ou de outra natureza.

De seguida, foi utilizado o método de busca ‘*ranker*’, que é usado quando se classifica atributos de acordo com a sua avaliação individual.

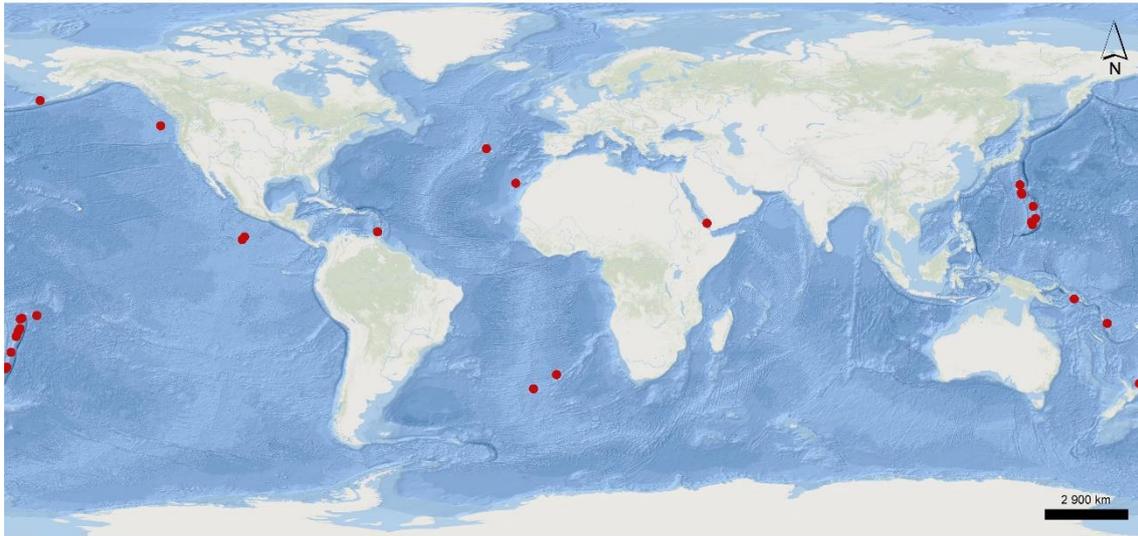
Com estes dados passou-se à construção de uma árvore de decisão, recorrendo ao algoritmo J48 – uma implementação do algoritmo C4.5 no software de *data mining*, *Weka* – para classificação dos elementos no *dataset* de treino. Foi utilizado o método de validação cruzada do tipo *k fold*, que usa todas as amostras disponíveis como amostras de treino e teste – calibração e validação. Consiste então, na divisão da amostra total de dados em vários subconjuntos. Hipoteticamente falando, se uma base de dados apresentasse 100 amostras, aplicando este método de validação cruzada com um  $k = 10$ , a base de dados será dividida em 10 subconjuntos, com 10 amostras cada.

Seguidamente é utilizado um subconjunto para validação do modelo e os restantes para calibração. Este processo é rotativo, ou seja, um subconjunto *A0* será em primeira instância utilizado para validação, e os restantes para calibração; numa segunda instância *A1* será o subconjunto a ser utilizado para validação; sendo aplicada no terceiro passo a mesma lógica utilizada e assim sucessivamente. A grande quantidade de testes efetuados tem o objetivo de aumentar a confiabilidade do cálculo da precisão do modelo. Para a separação das plumas de descoloração oceânica de origem vulcânica de dados relativos a oceano foi utilizado um *k-fold* igual a 10 – para calibração/validação os atributos são divididos em 10 grupos.

## 6. Metodologia

## 7. Apresentação de resultados

Foram pré-registadas, no período entre os anos 2000 e 2018, 60 erupções vulcânicas submarinas referentes a 31 vulcões diferentes (Figura 27). É no Oceano Pacífico que a maior parte dos vulcões estão localizados com 25 vulcões com atividade vulcânica submarina. O Oceano Atlântico apresenta 5 vulcões com atividade submarina e o Mar Vermelho apenas um.



**Figura 27** - Localização das erupções vulcânicas submarinas estudadas entre os anos 2000 e 2018 (Mapa de fundo:

A tabela 5 é um excerto da base de dados criada para este trabalho, e apresenta para cada vulcão com atividade vulcânica submarina, o respetivo nome ou número; a profundidade aproximada à qual se encontra a abertura do cone; a data à qual foi registada erupção; e se foram detetadas manifestações vulcânicas á superfície através de Detecção Remota. A profundidade aproximada à qual se encontra o cone apresenta valores positivos, devido a ocorrerem erupções submarinas em vulcões subaéreos e ao processo de formação de novas ilhas ou ilhas efémeras através de Vulcanismo Submarino.

Como podemos ver ainda nesta tabela, em 14 dos vulcões com erupções submarinas confirmadas não foi detetada a presença de manifestações vulcânicas à superfície por métodos de deteção remota, e outros dois apresentaram manifestações à superfície, no entanto, não há dados de deteção remota para as datas em que estas foram observadas.

Os restantes vulcões apresentam todos produtos vulcânicos resultantes de atividade submarina, desde plumas de descoloração, nuvens de cinzas vulcânicas, tapetes de pedras pomes, entre outros.

## 7. Apresentação de Resultados

As datas referentes a atividade vulcânica, apresentam períodos mínimos de 2 dias de atividade vulcânica e máximos de aproximadamente 7 anos. Quando a base do Smithsonian Institution apresentava datas para a qual não há certezas de atividade vulcânica, estas apresentam-se entre parênteses retos – exemplo: [17 a 19 janeiro 2009]. O Metis Shoal é um vulcão que não tem confirmação de erupções submarinas para o período de tempo estudado, segundo o seu registo na base de dados do Smithsonian. No entanto apresenta registo de uma pluma de descoloração oceânica a 14 de setembro de 2005.

**Tabela 5** - Excerto da base de dados construída referente a erupções vulcânicas submarinas entre os anos 2000 e 2018

Legenda: a) > sem dados de satélite disponíveis; ✓ > detetadas plumas vulcânicas;  
- > não houve deteção de plumas vulcânicas

Nome/Nº do vulcão	Profundidade aprox. (m)	Data da erupção	Deteção de manifestações
243091	- 296	27 a 28 setembro 2001	✓
243030	- 40	23 a 31 janeiro 2017	✓
Ahyi	-75	24 a 25 abril 2001 24 abril a 17 maio 2014	a) -
Axial Seamount	-1410	6 a 12 abril 2011 23 a 24/25 maio 2015	- -
Bogoslof	+ 150	20 dezembro 2016 a julho 2017 7 a 30 agosto 2017	✓ ✓
Curtis Island	- 47	[17 a 19 janeiro 2009]	-
El Hierro	- 89	10 outubro 2011 a 5 março 2012	✓
Epi	- 34 m	16 março 2002 ± 15 dias 16 a 24 fevereiro 2004	- -
Fukutoku-Oka-no-Ba	- 29	[8 setembro 1999 a 18 fevereiro 2000]	a)
		[26 junho 2000 a 13 julho 2001]	-
		[30 outubro 2001 a 19 julho 2002]	-
		[19 dez 2002 a 11 mar 2003]	✓
		2 a 21 julho 2005	✓
		[11 setembro 2005 a 16 fevereiro 2007]	✓
Havre Seamount	- 720	3 fevereiro a 8 abril 2010	✓
Havre Seamount	- 720	17 a 19 julho 2012	✓
Home Reef	- 10	7 a 16 agosto 2006	✓
Hunga Tonga - Hunga Ha'apai	+ 114	17 a 22 março 2009	✓
		19 dezembro 2014 a 23 janeiro 2015 ± 3 dias	✓
Ioto	+ 169	21 setembro a 23 outubro 2001	✓
		10 fevereiro a 2 maio 2012	✓
		12 a 18 setembro 2018	-
Kavachi	- 20	16 novembro 1999 a 16 agosto 2003 ± 15 dias	✓
		15 março 2004 a ...	✓
		2 a 6 abril 2007	-
		29 janeiro 2014	✓

## Caraterização de Vulcanismo Submarino por Técnicas de Detecção Remota

**Tabla 6** - Excerto da base de dados construída referente a erupções vulcânicas submarinas entre os anos 2000 e 2018. Legenda: a) > sem dados de satélite disponíveis; ✓ > detetadas plumas vulcânicas; - > não houve deteção de plumas vulcânicas

Nome/Nº do vulcão	Profundidade aprox. (m)	Data da erupção	Deteção de manifestações
Kick 'em Jenny	- 185	4 a 6 dezembro 2001	-
		23 a 24 julho 2015	-
		29 abril 2017	-
Mariana Back-Arc Segment at 15.5°N	- 4100	13 fevereiro 2013 a 1 dezembro 2015	-
Metis Shoal	+ 43	-	✓
Monowai	-132	24 maio 2002	-
		1 a 24 novembro 2002	-
		10 abril 2003 a 16 setembro 2004 ± 15 dias	✓
		2 março 2005 a 27 junho 2006	-
		12 dezembro 2006 a 4 novembro 2007 ± 3 dias	-
		8 fevereiro 2008	-
		4 maio 2009 ± 3 dias a 16 dezembro 2009 ± 4 dias	✓
3 a 4 agosto 2012	✓		
Nightingale Island	- 914 m	29 a 30 julho 2004	-
Nishino-Shima	+ 25	16 janeiro 2005 a ...	-
		20 novembro 2013 a 17 novembro 2015	✓
		18 abril 2017 ± 1 dia a 17 agosto 2017 ± 6 dias	✓
		12 a 21 julho 2018	✓
Northern EPR at 10.7°N	- 2500	31 maio 2003 ± 30 dias	-
Northern EPR at 9.8°N	- 2900	16 agosto 2005 ± 15 dias a 16 janeiro 2006 ± 15 dias	-
NW Rota-1	- 517	2 julho 2003 ± 182 dias a 16 março 2010 ± 15 dias	-
Rumble III	- 220	2 julho 2008 ± 1 ano ± 182 dias	-
Serreta	- 380	25 novembro 1998 a 16 março 2000 ± 15 dias	a)
South Sarigan Seamount	- 184	27 a 29 maio 2010	✓
Tafu-Maka	- 1400	16 novembro 2008 ± 15 dias	-
Vailulu'u	- 592	16 abril 2003 ± 2 anos ± 15 dias	-
Walvis Ridge at 33°S	- 1200	24 novembro 2001 a 16 mar 2002 ± 15 dias	-
West Mata	- 1174	16 novembro 2008 ± 15 dias a 16 maio 2009 ± 15 dias	-
Zubair Group	+ 191	18 dezembro 2011 a 12 janeiro 2012	✓
		28 setembro 2013 a 20 novembro 2013	✓

## 7. Apresentação de Resultados

Dos vulcões que apresentam produtos à superfície, foram detetadas 450 imagens com plumas de descoloração através do EOSDIS, selecionando de seguida 82 imagens de eventos submarinos significativos que foram posteriormente sujeitas a análise espectral desses produtos – recolhidos 263 pontos de amostragem. Foram utilizados produtos referentes a 3 sensores: MODIS, VIIRS e Landsat – no caso do MODIS e VIIRS as imagens foram comparadas entre elas, optando-se pelo MODIS para maior precisão; as imagens referentes ao Landsat foram utilizadas para comparação das plumas, não sendo utilizadas devido à sua resolução temporal. Para a apresentação de resultados, foram selecionadas as melhores imagens, ou imagens que retratem diferentes fases de cada erupção.

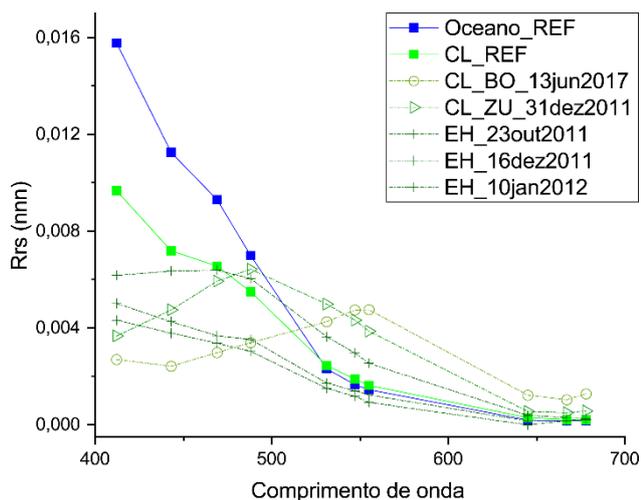
A apresentação dos resultados está organizada através dos diferentes tipos de plumas – plumas de origem biológica, plumas dos tapetes de pedras pomes, plumas verdes e plumas castanhas. A separação e classificação dos diferentes tipos de plumas de descoloração oceânica foi um processo relativamente fácil no que toca às plumas de origem biológica, às plumas associadas a tapetes de pedras pomes e também às plumas de tonalidades verdes. No entanto, a separação e classificação de plumas de descoloração oceânica de tonalidade castanha foi mais difícil de realizar, dado que as assinaturas espectrais correspondentes a esta tonalidade não apresentam curvas que correspondam à tonalidade que exibem.

Referentes às imagens de cada vulcão, a letra A retrata imagens de cor real, retiradas do EOSDIS WorldView. A letra B representa os dados adquiridos e analisados no software SeaDAS na banda dos 555 nm – de maneira a uma melhor perceção, estes dados apresentam-se à mesma escala que as imagens de cor real, e por isso podem não apresentar todos os pontos de amostragem utilizados. As assinaturas espectrais de cada material analisado correspondem à letra C, onde a cor vermelha corresponde a plumas de descoloração verdes (pl), a creme estão representadas plumas referentes a tapetes de pedras pomes (pl\_pom), as plumas de descoloração castanha (pl\_cast) apresentam uma cor castanha, a clorofila (cl) encontra-se a verde e o Oceano a azul.

### 7.1. Plumias de origem biológica

Relativamente às assinaturas espectrais de ‘*blooms*’ de clorofilas: estas apresentam valores altos nos 412 nm diminuindo exponencialmente até aos 531-555 nm. A partir desse ponto os valores continuam a diminuir de forma gradual aproximando-se cada vez mais de zero nos comprimentos de onda mais longos. No gráfico 1, foram utilizados dados das assinaturas espectrais de clorofila e oceano referentes às proximidades do vulcão Metis Shoal a 14 de setembro de 2009, devido a serem curvas que retratam o comportamento espectral expeável deste tipo de material – Oceano\_Ref e CL\_Ref. Os pontos de amostragem correspondentes ao oceano, que foram

recolhidos para servir de ponto de referência, apresentam um comportamento espectral parecido ao comportamento da clorofila, com diferença apenas nos comprimentos de onda mais curtos que apresentam valores mais altos (Gráfico 1 – curva azul referente Oceano\_ref). Estas assinaturas espectrais têm como objetivo a comparação com plumas de descoloração oceânica como resultado de erupções vulcânicas submarinas.



**Gráfico 1** - Assinaturas espectrais referentes a oceano e 'blooms' de clorofila biológica (Notas: BO – Bogoslof; ZU – Zubair Group; EH – El Hierro)

## 7.2. Plumagens referentes a tapetes de pedras pomes

Estas plumagens, como já foi dito na secção 3.4, são resultado da lixiviação de 'aglomerados' de pedra pomes, resultantes de atividade vulcânica submarina. Os vulcões Home Reef e Havre, são exemplos de vulcões onde foi possível observar este tipo de plumagens através de deteção remota.

### Home Reef

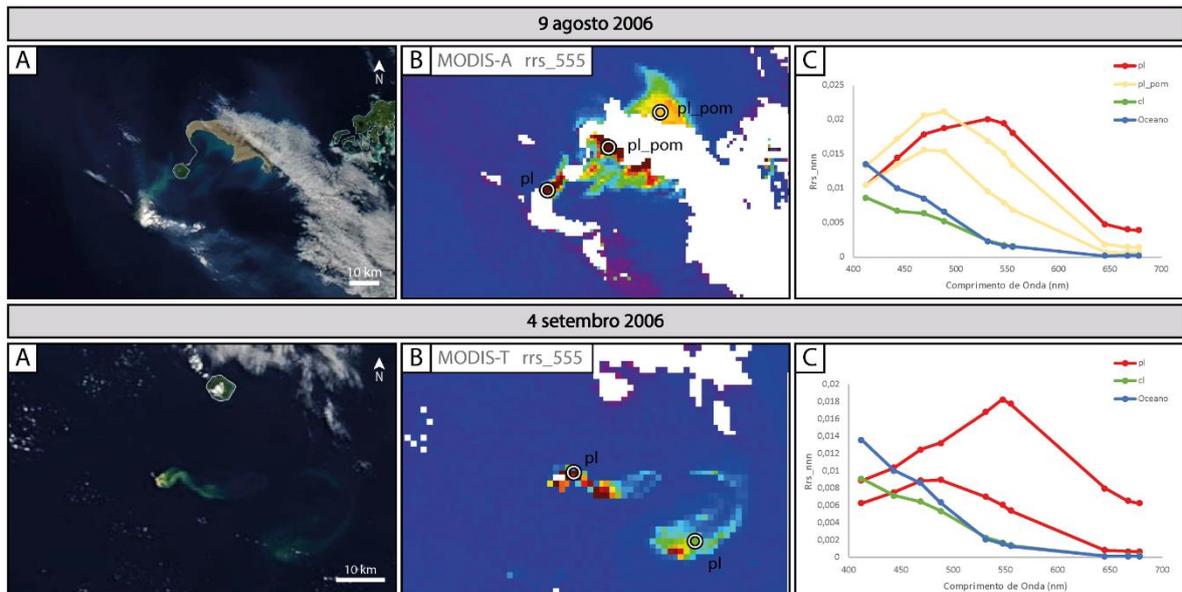
Home Reef é o nome de um vulcão submarino localizado a 22,5 km de Late, que entrou em erupção entre 7 e 16 de agosto de 2006. O que começou como uma erupção submarina rapidamente se tornou num evento subaéreo, através da formação de uma ilha efémera. Esta erupção formou ainda um tapete de pedras pomes dacíticas, que atingiram a Austrália em março de 2007.

As representações da figura 28, de dia 9 de agosto de 2006 mostram uma cobertura de nuvens parcial, que não permite a observação do tapete de pedras pomes formado na sua totalidade. Exibe também o foco da erupção, coberto com uma nuvem que possivelmente poderá ser resultado da erupção – nuvens de cinzas. No dia 4 de setembro, o tapete de pedras pomes encontra-se a uma distância considerável do local da erupção onde só é observável uma pluma vulcânica de tonalidade verde.

A imagem de cor real do dia 10 de agosto de 2006 apresenta dois tipos de plumagens: a pluma de tonalidade verde é referente à pluma da erupção, enquanto que a pluma referente ao tapete de pedra pomes apresenta uma tonalidade azul turquesa. Devido a apresentar estas duas plumagens,

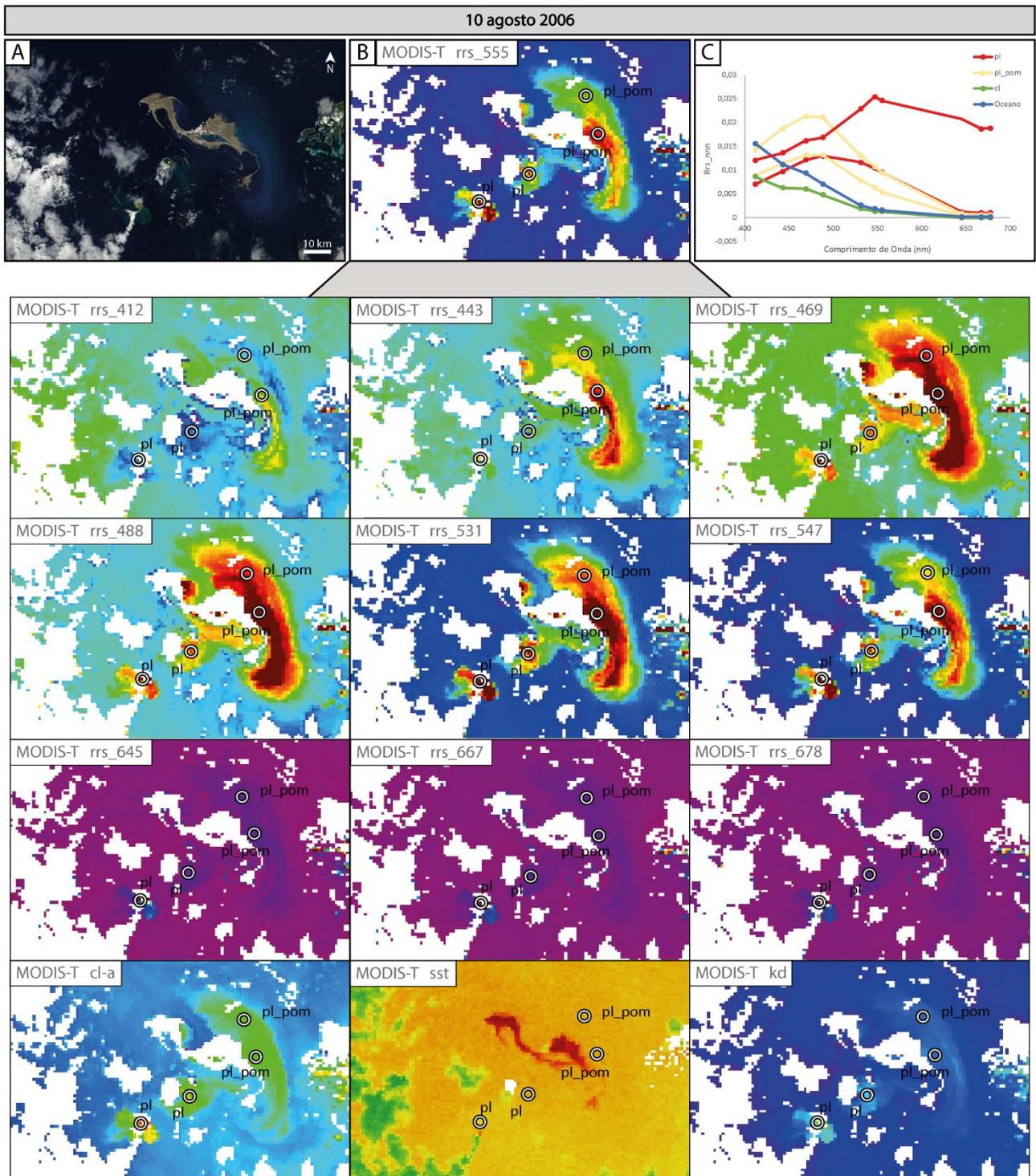
## 7. Apresentação de Resultados

esta imagem foi escolhida para mostrar as diferenças nos diferentes comprimentos de onda do sensor MODIS-A (Figura 29).



**Figura 28** - Análise da erupção em Home Reef referente a dia 9 de agosto e a 4 de setembro de 2006

Nos 412 nm, a pluma do tapete de pedras pomes não se encontra evidenciada na sua totalidade apresentando uma cor amarela, enquanto a pluma da erupção apresenta uma cor azul. Dos 443 aos 555 nm, as plumas estão sempre bem definidas, apresentando apenas menor expressão no comprimento de onda de 443 nm. O comprimento de onda correspondente aos 555 nm exibe de melhor forma as plumas de origem vulcânica e é, por isso, o comprimento de onda que vai ser apresentado nas figuras seguintes. Dos 645 aos 678 nm as plumas já estão pouco discernidas. O produto de clorofila apresenta a concentração deste pigmento fotossintético, não apresenta dados sobre refletância. A temperatura da superfície do mar (sst) evidencia uma área de cor vermelha com temperaturas entre os 28 e os 31° C. As nuvens apresentam cores verdes escuras neste produto, com temperaturas mais baixas. O coeficiente de atenuação difuso,  $K_d$  aumenta quando há uma maior acumulação de materiais nesse local e conseqüentemente, menor visibilidade. Neste caso, o coeficiente de atenuação difusa apresenta valores mais altos no foco da erupção, enquanto que na área referente ao tapete de pedras pomes apresenta valores mais baixos.



**Figura 29** - Diferenças entre os vários comprimentos de onda em plumas de descoloração referentes ao dia 10 de agosto de 2006 em Home Reef

## 7. Apresentação de Resultados

### Havre Seamount

O Havre Seamount localizado na cordilheira de Kermadec, teve a primeira evidência histórica de atividade de 17 a 19 de julho de 2012, com a observação de um tapete de pedras pomes. Ao longo do tempo, os ventos e correntes foram dispersando o tapete, chegando a estar disperso por uma área de 450 km de largura. A imagem de 21 de julho de 2012 apresenta o tapete de pedra pomes no canto superior esquerdo ainda aglomerado e o seu ‘rasto’ de tonalidade azul turquesa (Figura 30).

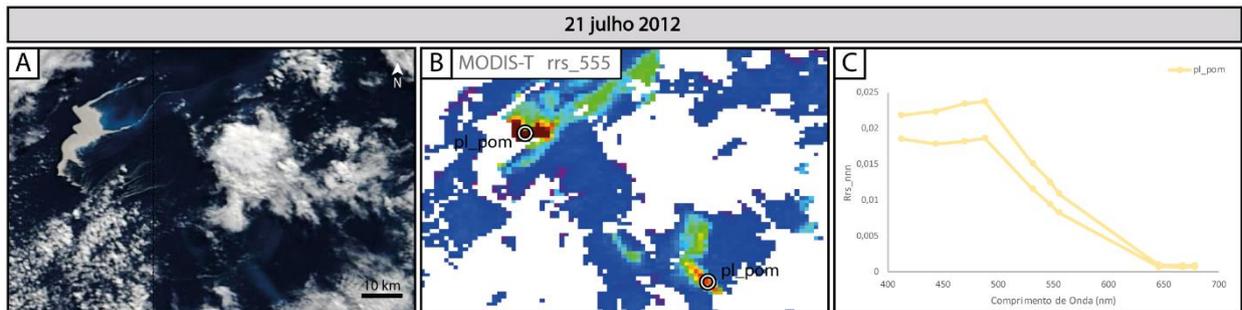
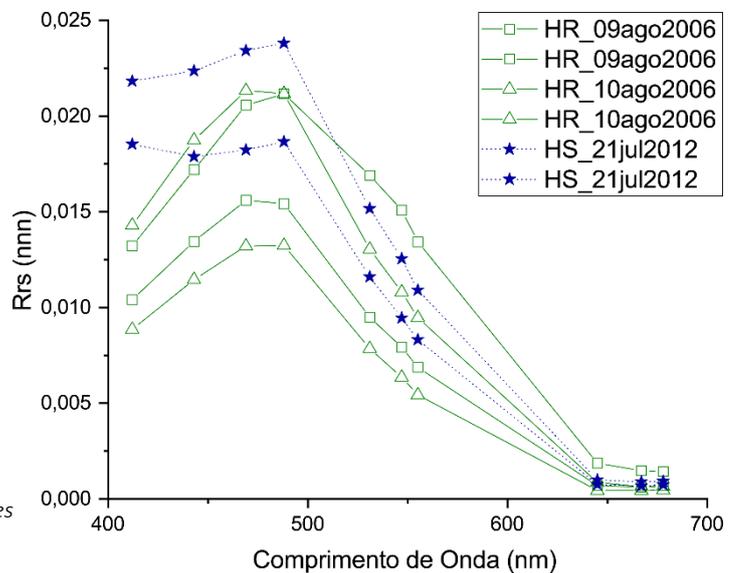


Figura 30 - Análise da erupção em Havre Seamount referente a dia 21 de julho de 2012

As plumas associadas à lixiviação dos tapetes de pedras pomes apresentam tonalidades azuis turquesas e assinaturas espectrais com valores máximos de refletância entre os comprimentos de onda dos 469 e 488 nm diminuindo acentuadamente até aos 645 nm, a partir do qual se mantém normalmente estável (Gráfico 2). As principais diferenças são nos comprimentos de onda mais curtos – as plumas referentes ao Havre Seamount exibem valores mais altos e mais ‘estáveis’ que as plumas correspondentes ao Home Reef até aos 488 nm.

Gráfico 2 - Assinaturas espectrais de plumas de descoloração associadas a tapetes de pedras pomes (Notas: HR - Home Reef; HS - Havre Seamount)



### 7.3. Plumais de tonalidade verde

Este tipo de plumas foi o tipo que mais foi observado neste trabalho, e por isso, analisado com maior detalhe. A precipitação de óxidos hidratados ricos em Al e Fe quando ocorre a mistura dos fluidos hidrotermais com água fria do mar, resulta em plumas de descoloração oceânica de tonalidades verdes.

 Bogoslof

Bogoslof é o cume emergente de um vulcão submarino que fica 40 km a Norte do arco principal de Aleuta. Tem uma elevação de 1500 m acima do fundo do mar de Bering e esteve em erupção entre 20 de dezembro de 2016 e 30 de agosto de 2017. Esta erupção mudou dramaticamente a forma da ilha visto que a sua costa a NE foi erodida e houve o nascimento de uma pequena ilha a Norte.

As imagens apresentadas relativas a este vulcão mostram plumas vulcânicas de cor azul turquesa que se prolongam por mais de 50 km. Tanto na imagem de 12 como na imagem de 13 de junho de 2017 é possível verificar uma cobertura de nuvens que esconde várias partes da pluma vulcânica. Na imagem de cor real de 13 de junho de 2017, conseguimos ainda visualizar uma pluma verde escura, onde a pluma vulcânica está inserida (Figura 31).

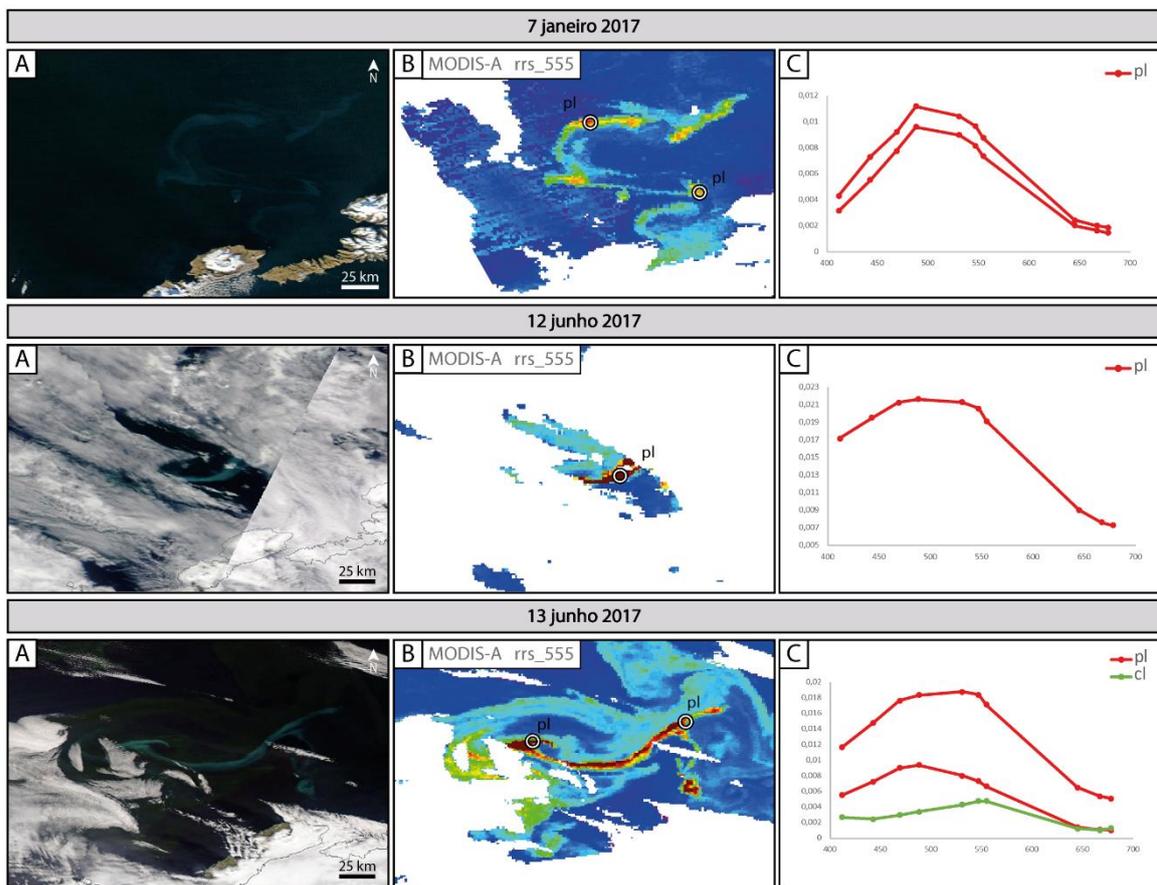


Figura 31 - Análise da erupção referente ao Bogoslof de dia 7 de janeiro, 12 e 13 de junho de 2017

 El Hierro

De 10 de outubro de 2011 a 5 março de 2012, ocorreu uma erupção submarina no flanco Sul de El Hierro, a ilha mais a SW das Ilhas Canárias. Esta erupção afetou significativamente a coluna de água num raio de 500 m à volta do cone vulcânico submarino – dos 75 aos 125 m de profundidade houve diminuição de oxigénio, atingindo quase níveis de anoxia, diminuição de pH,

## 7. Apresentação de Resultados

atenuação de luz aprimorada, concentrações altas de sulfato reduzido e de Fe (II) total, entre outros.

No dia 23 de outubro de 2011 encontramos uma pluma vulcânica de tonalidades verdes, com a presença de eddies e com orientação N-S, enquanto que a 16 de dezembro do mesmo ano estamos perante uma pluma de tonalidades mais claras, com menor expressão e uma orientação quase NE (Figura 32). No dia 10 de janeiro de 2012 a pluma encontra-se para SO e apresenta uma cor azul turquesa.

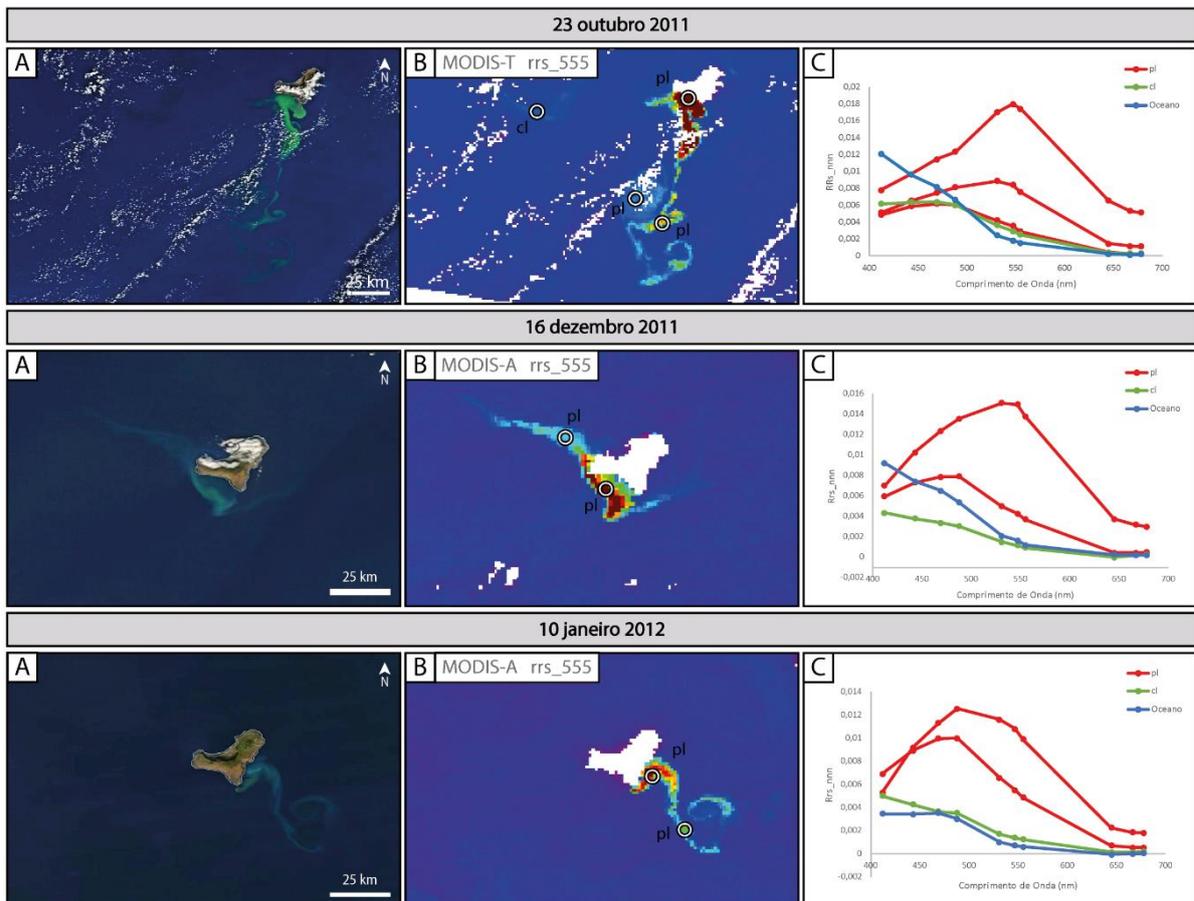
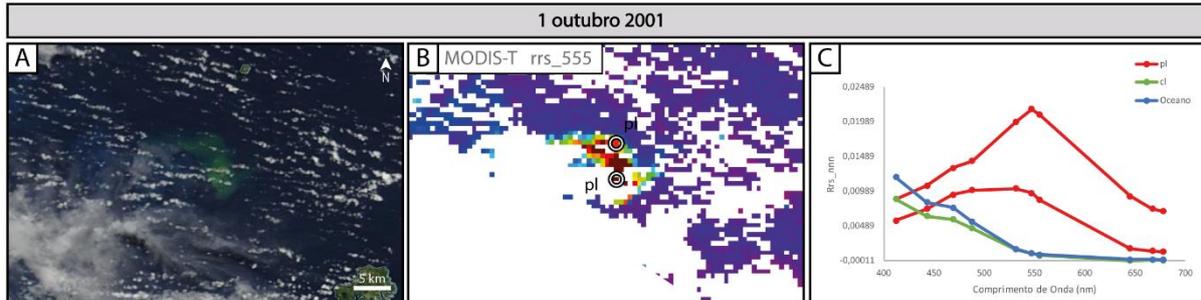


Figura 32 - Análise da erupção referente ao El Hierro de dia 23 de outubro e 16 de dezembro de 2011 e de dia 10 de janeiro de 2012

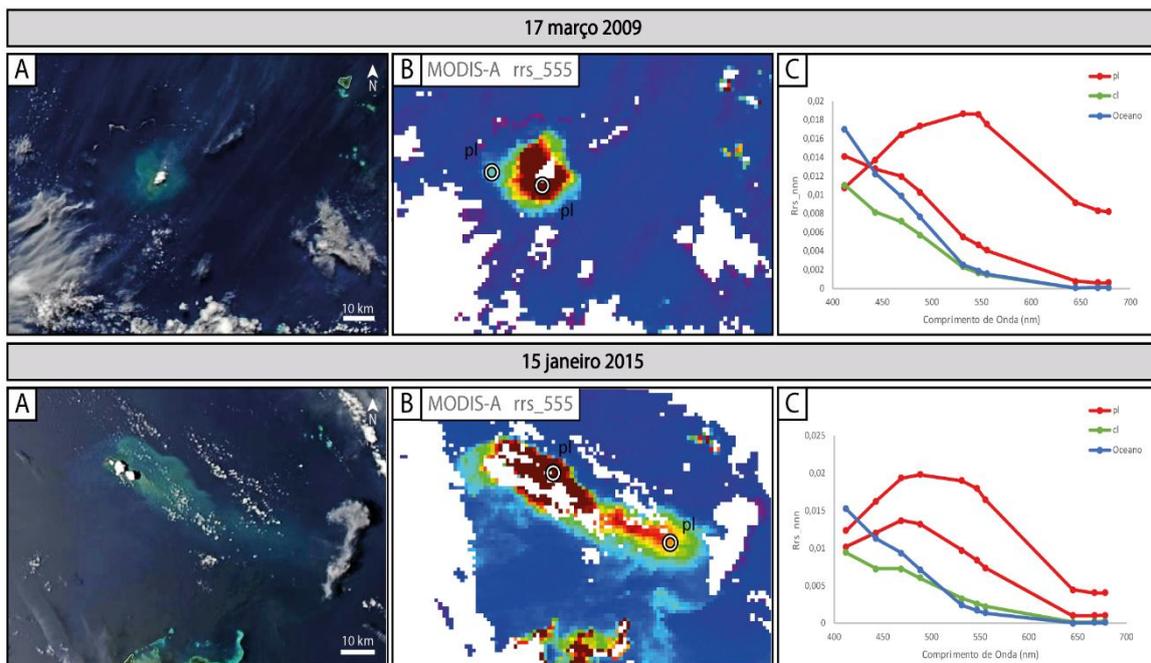
### 243091

Este vulcão representado pelo número 243091, situa-se a noroeste da ilha de Vava'u e a 60 km nordeste da ilha de Late. Entrou em erupção no ano de 2001, confirmado por sismógrafos e observações de uma coluna de cinzas em setembro. No mês seguinte foi documentada descoloração de água (Figura 33) e em novembro foram observados tapetes de pedras pomes, que não foram registados através de deteção remota.



**▲ Hunga Tonga-Hunga Há'apai**

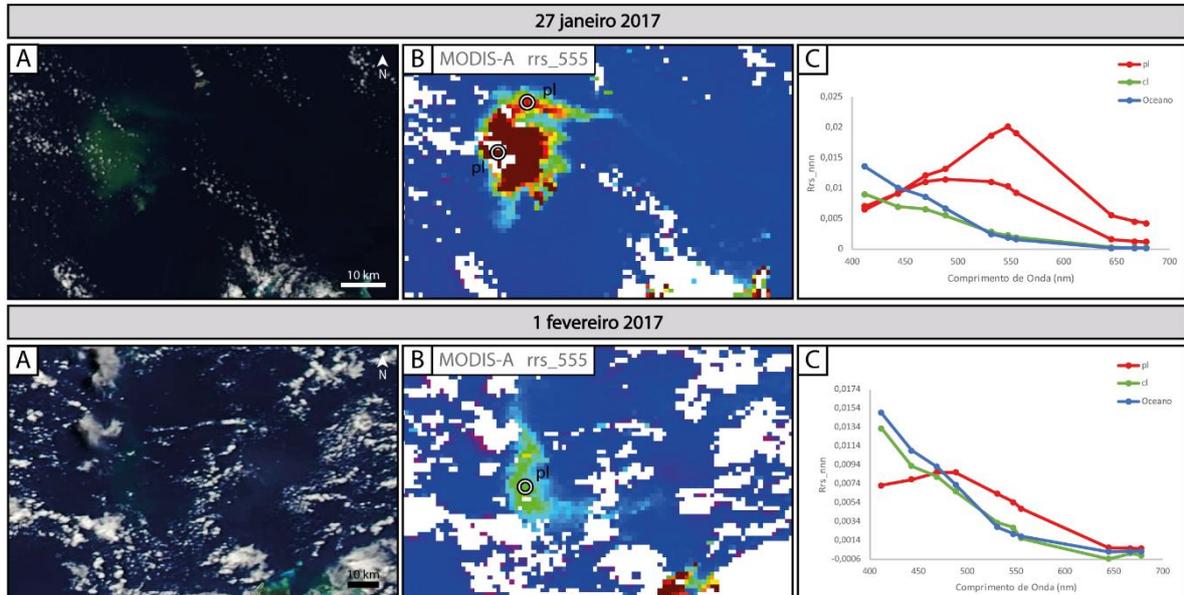
Este vulcão teve dois momentos de erupção no período analisado: de 17 a 22 de março de 2009 e de 19 de dezembro de 2014 a 23 de janeiro de 2015. A primeira erupção estudada teve dois locais de atividade – um a 100 m offshore e outro na Ilha de Hunga Há'apai. Nas imagens de satélite do dia 17 de março é visível um “cordão” de cor castanha, que possivelmente será um tapete de pedra pomes (Figura 34). A segunda erupção teve o nascimento de uma nova ilha entre as duas ilhas existentes – Hunga Tonga e Hunga Há'apai, acabando por se juntar com Hunga Há'apai a oeste. A erosão da costa e a reposição de sedimento fizeram com que esta ilha se unisse com Hunga Tonga a Norte, alguns meses depois do fim da erupção. As duas imagens apresentadas exibem nuvens no foco da erupção.



## 7. Apresentação de Resultados

### 🌋 243030

Situado a 35 km da ilha de Tongatapu, este vulcão teve uma erupção entre Tongatapu e Hunga Tonga - Hunga Há'apai em janeiro de 2017, em que foi observável plumas de descoloração de tons esverdeados/azuis turquesa. A imagem de 27 de janeiro de 2017 apresenta uma pluma concentrada de cor verde, enquanto que no dia 1 de fevereiro de 2017, a pluma quase não é observável na imagem de cor real, visto não ser tão 'concentrada' como a primeira (Figura 35).



**Figura 35** - Análise da erupção referente ao vulcão 243030 de dia 27 de janeiro e 1 de fevereiro de 2017

### 🌋 Zubair Group

Zubair Group representa um grupo de pequenas ilhas no Mar Vermelho. Em 2011 e 2013 houve o nascimento de duas novas ilhas, Sholan e Jadid. A primeira ilha a ser formada, encontra-se a NW da ilha Rugged e Jadid a 8 km SE de Sholan. O MODVOLC captou a 1ª evidência da erupção de Jadid – uma anomalia termal.

A imagem de 31 de dezembro de 2011, corresponde ao nascimento da primeira ilha e é visível a pluma vulcânica referente a esse evento (Figura 36). As restantes imagens são referentes ao nascimento da segunda ilha, que tem associadas plumas de descoloração que se prolongam por alguns km, chegando a formar eddies (Imagem de 11 de novembro de 2013).

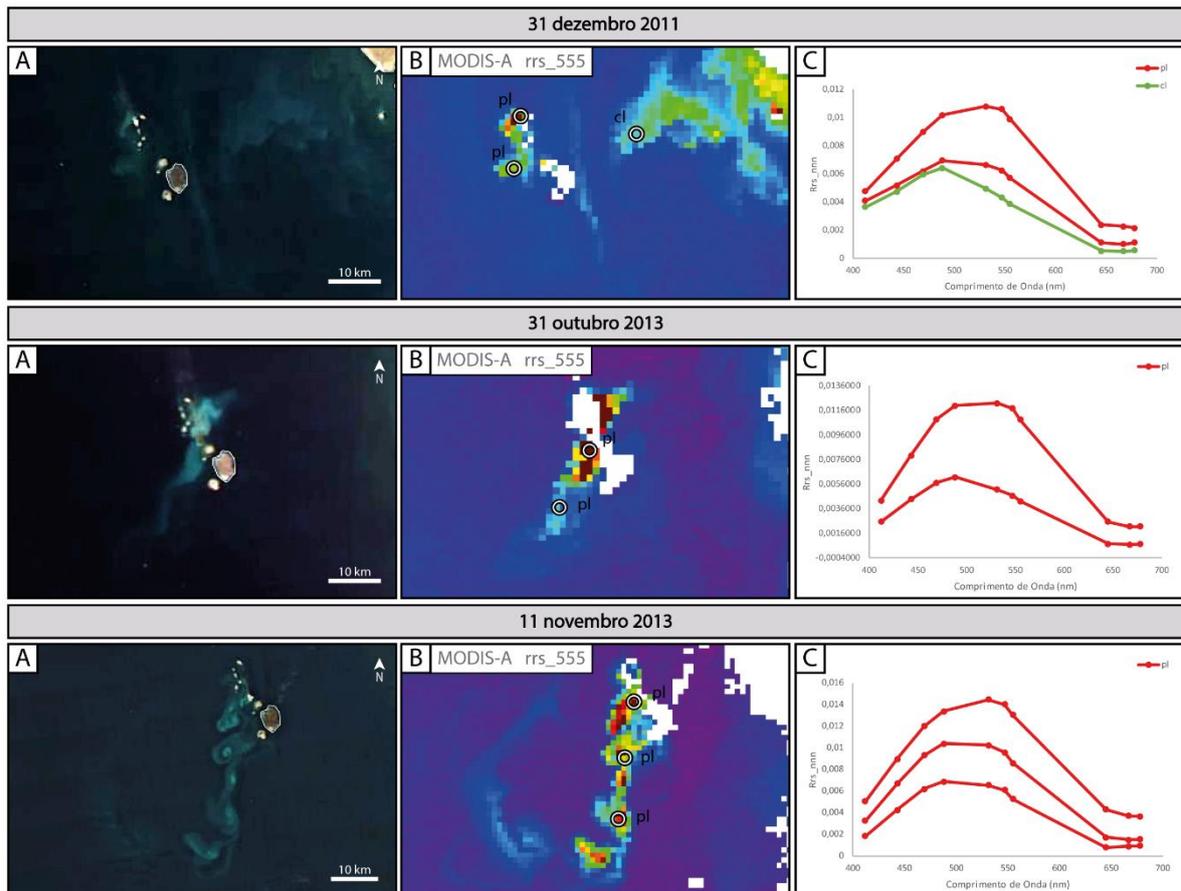


Figura 36 - Análise da erupção referente ao Zubair Group dos dias 31 de dezembro de 2011, 31 de outubro e 11 de novembro de 2013

Kavachi

Kavachi situa-se nas ilhas Salomão e é um dos vulcões submarinos mais ativos do Sudoeste Pacífico. Apresenta atividade explosiva regular entre os anos de 2006 e 2016, chegando mesmo a romper a superfície do oceano. Em dezembro de 2006 o topo do vulcão subiu acima da superfície

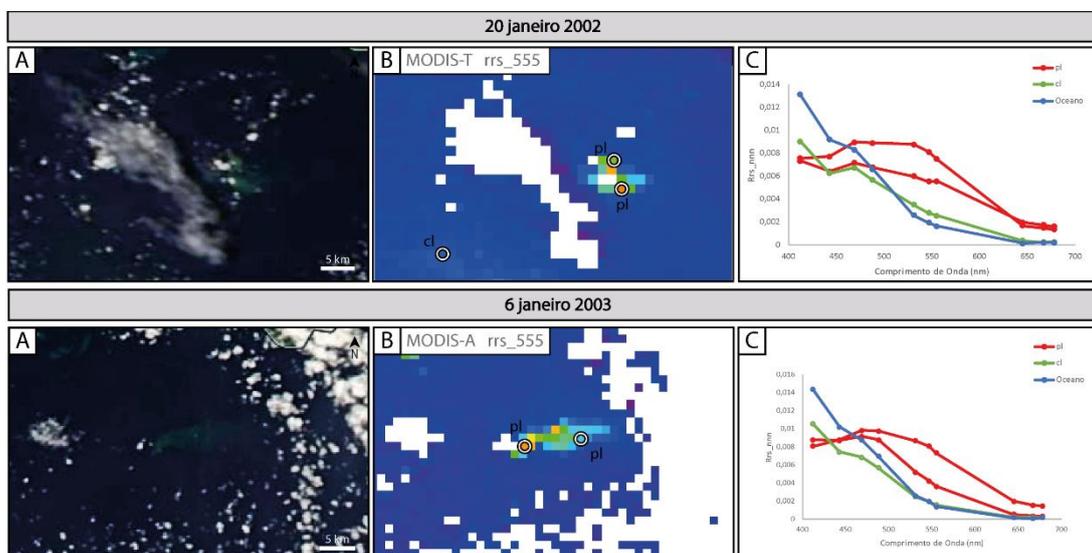


Figura 37 - Análise da erupção referente ao Kavachi de dia 20 de janeiro de 2002 e 6 de janeiro de 2003

## 7. Apresentação de Resultados

oceânica e foi posteriormente erodida por ventos e ondulação. As plumas de descoloração referentes a este vulcão são difusas e de difícil observação (Figura 37).

### Metis Shoal

Este vulcão submarino – localizado entre as ilhas de Kao e Late – apresenta, em dezembro de 2006 a presença de uma ilha. Visto que não há registo de erupções confirmadas neste período de tempo, a ilha em questão pode ser remanescente da ilha construída em 1995 ou o resultado de erupções posteriores não documentadas.

No dia 14 de setembro de 2005, era observável uma pluma que se estende por cerca de 5 km a sudoeste de Metis Shoal (Figura 38).

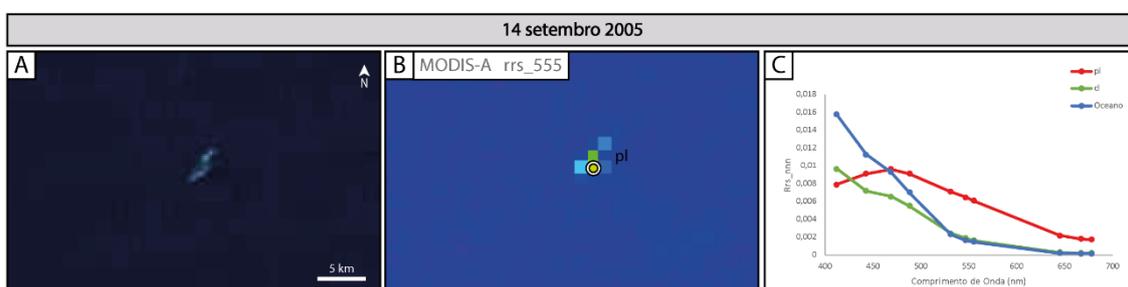


Figura 38 - Análise da erupção referente ao Metis Shoal de dia 14 de setembro de 2005

### Monowai

O Monowai fica no extremo sul da Dorsal de Tonga e é ligeiramente deslocado dos vulcões de Kermadec. Tem 8 datas de erupções confirmadas através de sismógrafos, observações de plumas de descoloração, entre outros. A 23 de outubro de 2009 é visível uma pluma que foi dispersa através da ação de correntes marítimas, com maior concentração perto do foco da erupção (Figura 39). No dia 7 de agosto de 2011, a pluma observada tem uma dispersão no sentido E-O.

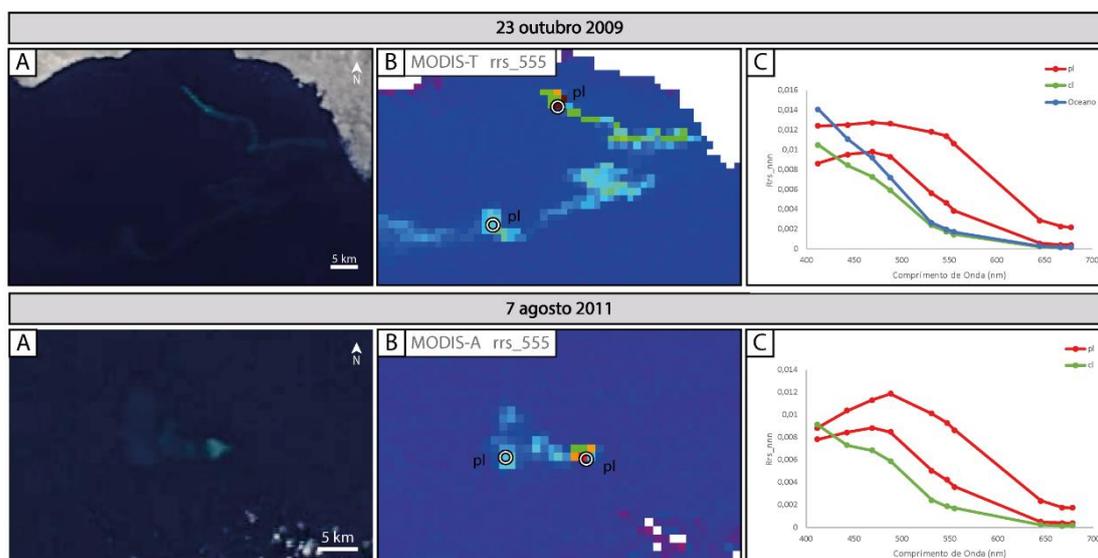


Figura 39 - Análise da erupção referente ao Monowai de dia 23 de outubro de 2009 e de 7 de agosto de 2011

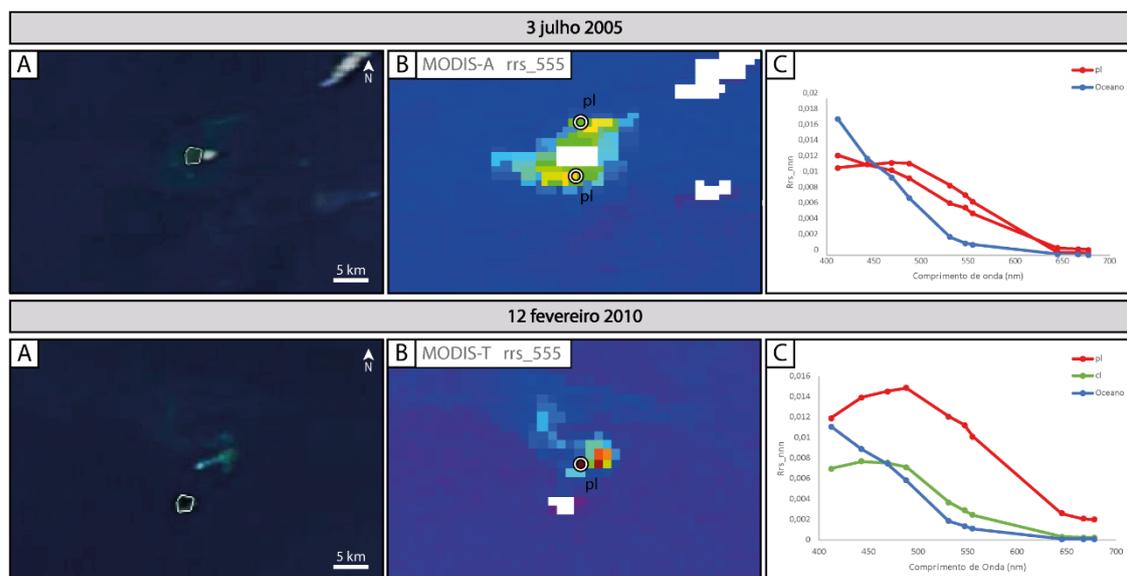
 Fukutoku-Oka-no-Ba

Este vulcão submarino encontra-se a 5 km NE da ilha de Minami-Ioto. Das suas datas de atividade eruptiva apenas duas estão confirmadas, no entanto, são observadas frequentemente plumas de descoloração – com tons esbranquiçados a esverdeados – associadas a este vulcão.

Devido à incerteza da maior parte das erupções, foram usadas imagens de cor real da Guarda Costeira Japonesa e da Agência Meteorológica do Japão para a deteção de manifestações – adquiridas através de camaras digitais de levantamentos aéreos periódicos. O Anexo 2 mostra imagens de cor real, nomeadamente imagens adquiridas através da Guarda Costeira e através do EOSDIS WorldView.

O Anexo 3 retrata os dias nos quais é possível a observação de plumas do Fukutoku-Oka-no-Ba através da Guarda Costeira Japonesa e através do EOSDIS, nomeadamente pelos satélites MODIS e VIIRS.

As plumas observadas são pequenas e bastante difusas, como podemos observar no dia 3 de julho de 2005, de tonalidades azul turquesa a verde (Figura 40).



**Figura 40** - Análise da erupção referente ao Fukutoku-Oka-no-Ba de dia 3 de julho de 2005 e de 12 de fevereiro de 2010

 South Sarigan Seamount

Esta vulcão situa-se a 12 km a sul da ilha de Sarigan e foram observadas plumas de descoloração, cinzas e vapor de água. A imagem de dia 30 de maio de 2010 exibe uma pluma difusa com uma suave cobertura de nuvens que, ainda assim, permite a sua observação (Figura 41).

## 7. Apresentação de Resultados

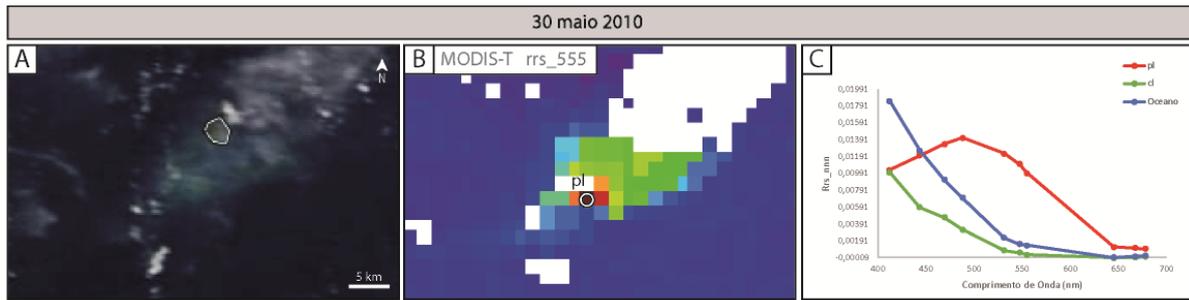


Figura 41 - Análise da erupção referente ao South Sarigan Seamount de dia 30 de maio de 2010

Ao observar todas as assinaturas espectrais constatou-se que estas plumas apresentam um comportamento espectral com picos máximos na região do espectro eletromagnético referente ao verde, apresentando valores de refletância baixos em comprimentos de onda relativos à região do azul e do vermelho.

No entanto, existem várias inconstâncias deste padrão – os gráficos 3 e 4 apresentam as assinaturas espectrais das plumas de descoloração do vulcão El Hierro e Kavachi respectivamente. As plumas dos dias 20 de janeiro de 2002 e de 6 de janeiro de 2003 referentes ao Kavachi apresentam valores de refletância mais baixos em comparação com as assinaturas espectrais das plumas do El Hierro.– no gráfico 3 verificamos que o vulcão El Hierro apresenta assinaturas espectrais com comportamentos diferentes para a mesma pluma.

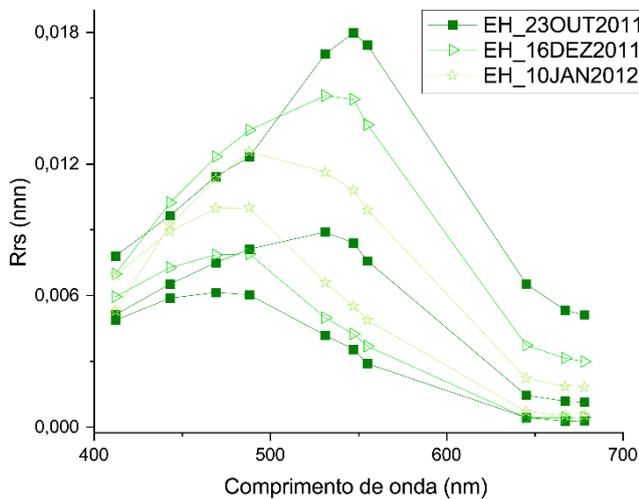


Gráfico 2 - Inconstâncias nas assinaturas espectrais de plumas de descoloração de tonalidade verde referentes ao El Hierro

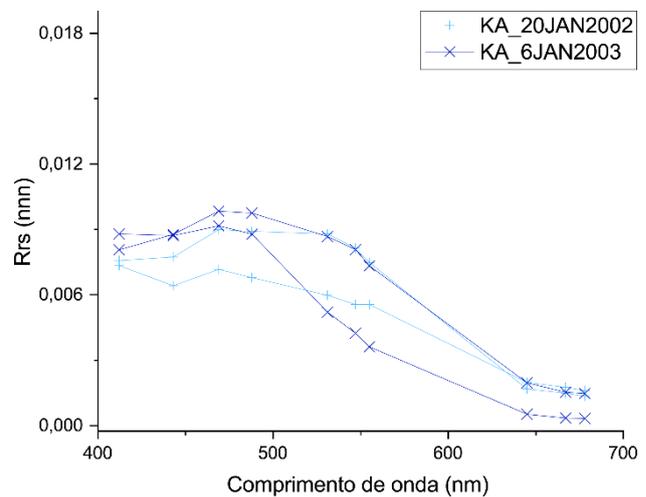


Gráfico 1 - Assinaturas espectrais associadas a plumas de descoloração verdes de concentrações mais baixas no vulcão

### 7.4. Plumais de tonalidade castanha

Este tipo de plumas é característico de vários vulcões, no entanto, apenas foram observadas plumas deste tipo por detecção remota em dois casos – Ioto e Nishinoshima.

 Loto

Localizado na parte central das Ilhas Volcano no arco das Marianas, este vulcão também conhecido por Iwo-jima, tem sofrido *uplifting*. Das erupções conhecidas apenas 3 foram consideradas submarinas enquanto as restantes são erupções freáticas, geralmente com ejeção de lamas. Estas plumas apresentam formas que são derivadas das correntes oceânicas e variações nas tonalidades das plumas (Figura 42).

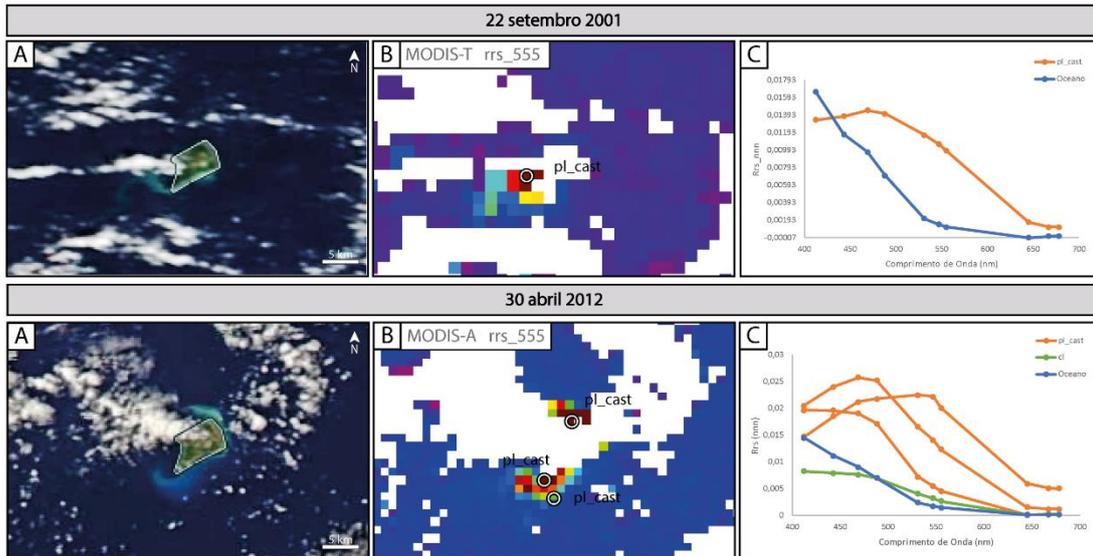


Figura 42 - Análise da erupção referente ao loto de dia 22 de setembro de 2001 e 30 de abril de 2012

 Nishino-Shima

Em novembro de 2013, nas ilhas Ogasawara, parte das Ilhas Volcano, houve a formação de uma nova ilha a 500 metros de Nishino-Shima. Em dezembro do mesmo ano, as duas ilhas uniram-se, sendo que a ilha atual é 12 vezes o tamanho da antiga ilha. A imagem de cor real do dia 26 de agosto de 2014, foi adquirida pela Guarda Costeira Japonesa, ao lado Oeste da ilha. Podemos observar uma pluma de cor castanha a Norte da ilha e a Sul, sendo esta mais fraca (Figura 43). É ainda observável uma coluna de fumo/vapor de água a sair da abertura do vulcão.

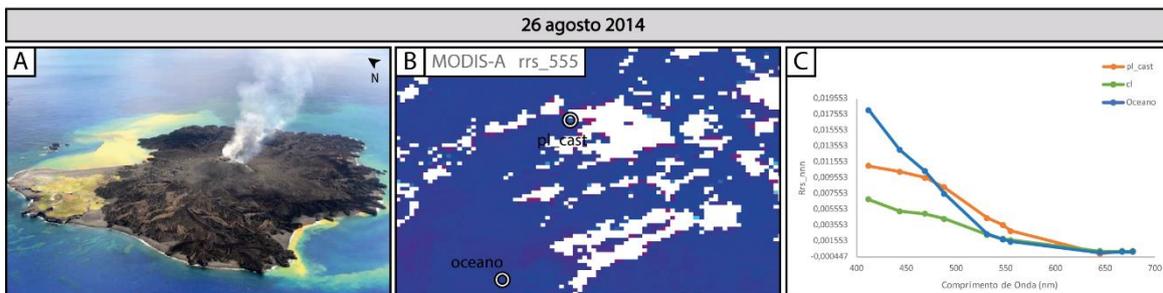


Figura 43 - Análise da erupção referente ao Nishinoshima de dia 26 de agosto de 2014

## 7. Apresentação de Resultados

Em relação às plumas de tonalidades castanhas, as assinaturas espectrais apresentam valores relativamente altos até aos comprimentos de onda dos 488 nm aproximadamente, indo diminuindo a partir desse ponto. De acordo com as curvas associadas a este tipo de plumas (Gráfico 5), a assinatura espectral de uma das plumas do vulcão Ioto, de dia 30 de abril de 2012, difere das restantes apresentando valores de refletância altos dos 469 aos 555 nm.

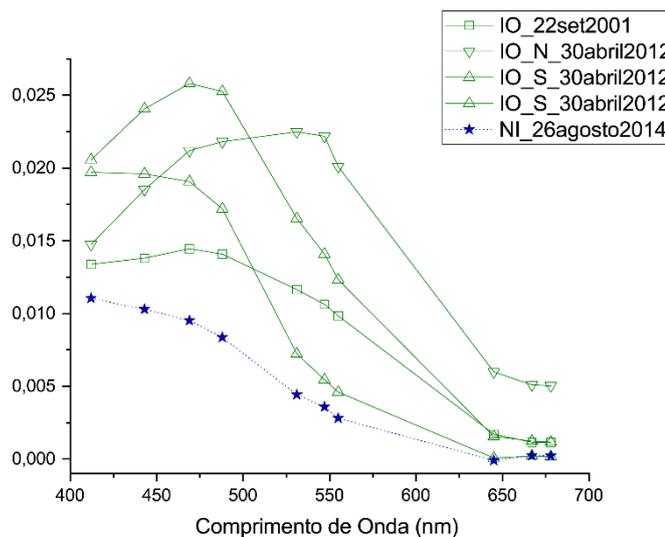


Gráfico 3 - Assinaturas espectrais de plumas de descoloração de tonalidades castanhas (Notas: IO – Ioto; NI – Nishinoshima)

### 7.5. Testes de classificação

Os testes de classificação realizados, nomeadamente os métodos “Information Gain” e “Ranker” apresentam os seguintes resultados:

Tabela 7 - Resultados dos testes de classificação - métodos “Information Gain” e “Ranker”

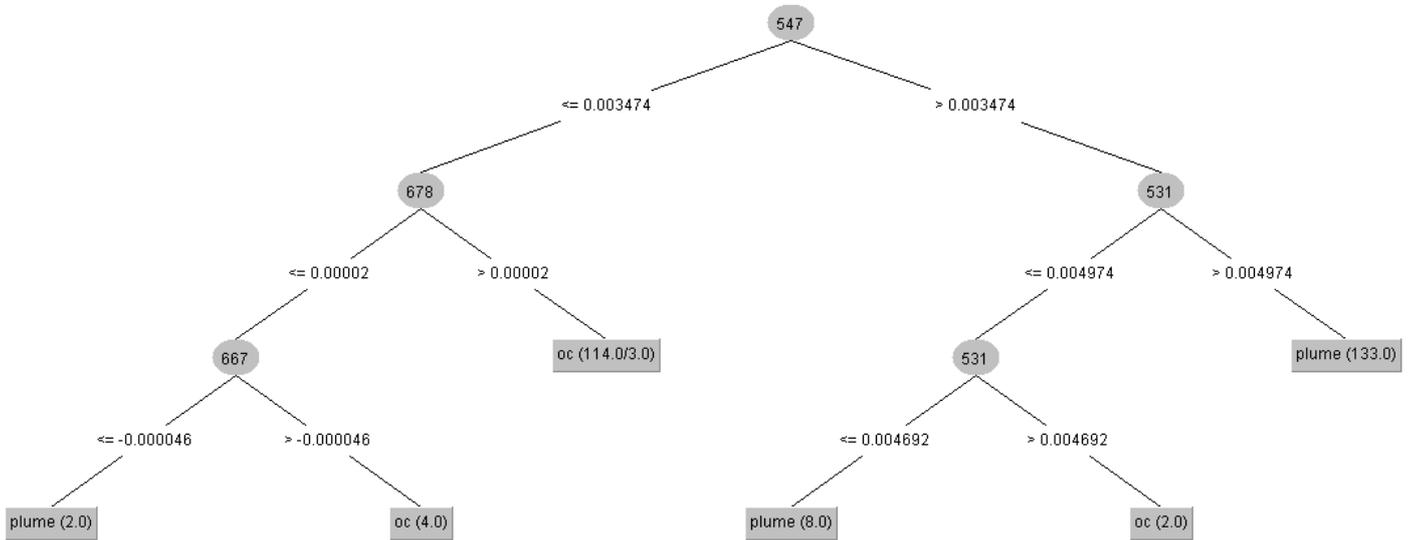
Segundo a tabela 6, o atributo mais adequado para classificar as classes utilizadas é o Index2, que resulta do cálculo da área definida pelo triângulo criado pelos valores de refletância das bandas dos 488, 547 e 645 nm (com base na análise das assinaturas) e apresenta um ganho aproximado de 0,92. É seguido pela banda dos 555 nm com um ganho de  $0,898 \pm 0,032$  e em terceiro lugar a banda dos 531 nm com um ganho de  $0,883 \pm 0,042$ .

average merit	average rank	attribute
$0,917 \pm 0,032$	$1,3 \pm 0,64$	Index2
$0,898 \pm 0,032$	$2,3 \pm 0,78$	555
$0,883 \pm 0,042$	$3,1 \pm 0,7$	531
$0,885 \pm 0,029$	$3,3 \pm 1$	547
$0,762 \pm 0,044$	$5,3 \pm 0,46$	667
$0,713 \pm 0,035$	$6,6 \pm 0,92$	678
$0,704 \pm 0,021$	$7 \pm 1,1$	488
$0,701 \pm 0,038$	$7,1 \pm 0,83$	645
$0,646 \pm 0,011$	$9 \pm 0$	Index
$0,515 \pm 0,032$	$10 \pm 0$	469
$0,372 \pm 0,024$	$11,3 \pm 0,46$	412
$0,353 \pm 0,031$	$11,7 \pm 0,46$	443

O resultado do algoritmo J48 para construção da árvore de decisão apresenta uma árvore de decisão compacta e eficiente, com aproximadamente 96% de elementos classificados corretamente e um kappa ( $k$ ) igual a 0.9154 – o valor de kappa varia entre 0 e 1, correspondendo o 0 a um agrupamento aleatório e 1 a organizado.

## Caraterização de Vulcanismo Submarino por Técnicas de Detecção Remota

A árvore de decisão em si (Figura 44) utiliza a banda dos 547 nm primeiramente, e as bandas dos 531, 678 e 667 nm nos patamares abaixo. Apresenta 6 folhas – termo que define as partes terminais da árvore – separando 263 pontos de amostragem no seu total, em 2 classes – plumas de descoloração oceânica ou o oceano em si.



**Figura 44** – Árvore de decisão resultante utilizando o algoritmo J48

## 8. Discussão de resultados

---

As assinaturas espectrais referentes a plumas de descoloração possuem características semelhantes que permitem a categorização destas plumas em diferentes classes, o que significa que as técnicas de detecção remotas utilizadas foram eficazes no contexto em que foram analisadas.

O uso de técnicas de detecção remota permite-nos a observação das datas de erupção sem ser necessário contacto direto, com elevada precisão, pequenos períodos de repetição e alta resolução espacial. Permite ainda monitorizar a superfície dos oceanos para detecção de mudanças ambientais em torno do ponto da erupção em tempo quase real.

O'Malley et al., (2014), utilizou dados do sensor SeaWIFS tal como do sensor MODIS para investigar as respostas biológicas aparentes provocadas por eventos vulcânicos submarinos referentes a 5 vulcões diferentes: Ahyi, Home Reef, Kick'em Jenny, Monowai Seamount e 243091. O objetivo deste estudo era a criação de um índice baseado em dados de detecção remota para detecção de expressões de erupções vulcânicas submarinas conhecidas à superfície, através de aumentos improváveis dos valores de clorofila e do coeficiente de retrodispersão de partículas após cada evento. Foi possível detetar respostas biológicas reais às erupções e mudanças aparentes devido a contaminantes vulcânicos, sendo que a resposta máxima da superfície do oceano é aproximadamente uma a duas semanas após o início da erupção. A presença de produtos vulcânicos na água, como tapetes de pedras pomes, cinzas e plumas de descoloração, aumentam a capacidade de detecção de eventos vulcânicos, devido a aumentos do valor de clorofila e do valor de retrodispersão de partículas em comparação com o histórico de dados de satélite dessa área.

A caracterização de eventos vulcânicos submarinos através de técnicas de detecção remota é, por isso, um dos primeiros passos a serem realizados para uma monitorização eficaz deste tipo de eventos. O estudo de erupções vulcânicas submarinas históricas contribui para o aumento da compreensão deste tipo de erupções, e por isso, foram abordadas todas as erupções vulcânicas submarinas entre os anos 2000 e 2018. Este trabalho analisa dados de refletância dos oceanos – nomeadamente de plumas de descoloração vulcânica – adquiridos especialmente pelo sensor MODIS, para caracterizar e diferenciar os diferentes tipos de plumas associados a erupções vulcânicas submarinas.

Em 14 dos 31 vulcões em que foram pré-registadas erupções vulcânicas submarinas entre 2000 e 2018, não foi possível detetar produtos de Vulcanismo Submarino à superfície através de técnicas de Detecção Remota. Desta seleção de vulcões, e segundo o relatório do *Smithsonian Institution*, o vulcão Epi apresenta produtos que foram observados à superfície, nomeadamente

plumas de descoloração e explosões. No entanto, estes dados não foram detetados por técnicas de detecção remota. A cobertura de nuvens, e a resolução espacial do sensor utilizado podem ser algumas das razões para a sua detecção não ser possível.

No que toca aos restantes vulcões sem qualquer detecção de produtos à superfície, uma das causas para a ausência destes produtos será a profundidade a que estão localizados - quando maior for a profundidade a que se encontra o vulcão, maior é a pressão hidrostática sobre ele exercida. Pode-se afirmar através destes dados, que a partir dos 900 metros de profundidade a pressão hidrostática que se faz sentir suprime manifestações vulcânicas detetáveis à superfície. Os 900 m representam também o limite para *Steam Explosion*. Outro fator para não serem observados produtos vulcânicos à superfície diz respeito a correntes oceânicas profundas – estimuladas por diferenças de densidade – que podem dispersar os produtos de erupções submarinas, fazendo assim com que estes não alcancem a superfície. Da superfície do oceano até aos 900 metros de profundidade, a observação de manifestações não é apenas dependente da profundidade à qual se encontra o vulcão. Fatores como o tipo de atividade – efusiva ou explosiva – e as caraterísticas do local podem também condicionar a observação ou não deste tipo de manifestações.

Relativamente aos comprimentos de onda e produtos utilizados:

- O produto de *Clorofila-a (Chl-a)* em mar aberto, ou seja, em águas de tipo I, apresenta propriedades dominadas pela concentração de clorofila, no entanto em águas costeiras (tipo II) são influenciadas pela presença de sedimentos em suspensão, matéria orgânica dissolvida e águas ricas em clorofila resultantes de *upwelling*. Segundo Eugenio et al., (2014), os valores precisos de concentração de clorofila através de métodos de detecção remota, não são possíveis de estimar com certeza durante uma erupção devido a condições específicas e alterações provocadas na composição química. Algoritmos de *clorofila-a* em mar aberto MODIS e MERIS foram comparados com medições *in situ*, apresentando um baixo desempenho, enquanto o algoritmo costeiro MERIS ALGAS 2 exhibe, em áreas com turbidez moderada, um melhor desempenho. Por estas razões não se pode considerar os valores de clorofila-*a* em áreas afetadas por atividade vulcânica.
- O comprimento de onda dos 555 nm é relativamente estável em águas oceânicas em comparação a comprimentos de onda maiores (Barnes et al., 2013) e foi por isso utilizado para a visualização de plumas vulcânicas para posterior extração das suas assinaturas espectrais. Um estudo realizado por Shi & Wang, (2011), utilizou o espectro normalizado da refletância da água, entre os 412 e os 859 nm, para

## 8. Discussão de Resultados

quantificar as mudanças óticas nas diferentes fases de erupção. Este, demonstra que águas ricas em produtos vulcânicos apresentam maiores valores nos 555 nm comparativamente a outros tipos – águas oligotróficas com valores de 0,2% e águas com cinzas vulcânicas exibem valores de 3,4%.

- O produto de  $K_d$  (490) – coeficiente de atenuação difusa – é uma propriedade importante da água no que toca à penetração e disponibilidade da luz em sistemas aquáticos. (Shi & Wang, 2011) utilizaram dados de satélite MODIS-Aqua antes, durante e depois da erupção do vulcão Hunga Tonga-Hunga Há'apai em 2009, para estudar as alterações ambientais causadas por este evento, através de produtos como  $K_d$  (490), sst e aot (*aerosol optical thickness*). Os resultados obtidos relatam valores de  $k_d$  (490) baixos no período anterior à erupção – aproximadamente  $0,025 \text{ m}^{-1}$ ; durante a erupção os valores deste produto subiram significativamente na região da erupção – quase 7x mais com valores aproximados de  $0,16 \text{ m}^{-1}$  – devido à deposição de cinzas vulcânicas; e após 4 semanas da erupção não há registo de águas turvas.

Menos disponibilidade de luz significará maior quantidade de sedimentos e por isso este fator poderia ser utilizado para quantificar a quantidade de sedimentos ejetados em erupções submarinas e a evolução da erupção, mas não para a extração da assinatura espectral de plumas de descoloração.

Através dos resultados apresentados na secção 6, conseguimos diferenciar os diferentes tipos de plumas de descoloração de água associadas a erupções submarinas. Plumais de tonalidade verdes, plumais com tons azulados referentes a tapetes de pedras pomes e plumais de tonalidades castanhas foram as diferentes plumais de origem vulcânica que foram estudadas - possuindo assinaturas espectrais específicas para cada uma.

As plumais relativas a tapetes pedras pomes, como podemos ver no Gráfico 2, apresentam o seu pico entre os comprimentos de onda de 469 a 488 nm, correspondente à banda do azul. O comportamento espectral deste tipo de plumais, para os vulcões em estudo – Home Reef e Havre Seamount - é distinto desde os 412 nm aos 488 nm. O Havre Seamount apresenta valores relativamente estáveis para este período – valores oscilam entre 0,002 a 0,005 – enquanto o Home Reef apresenta valores mais baixos para os 412 nm, atingindo o seu pico máximo aos 469-488 – com uma subida na ordem dos 0,005 a 0,008. Em termos geológicos, estes dois tapetes possuem uma diferença: o vulcão Home Reef formou um tapete dacítico, enquanto o Havre Seamount originou um tapete riolítico. Esta disparidade poderá originar alterações na refletância espectral do material, produzindo assim uma assinatura ligeiramente diferente.

Segundo os dados adquiridos, e de acordo com a classificação feita por Mantas & Pereira, (2010) foram considerados como tapetes de fase 2, o tapete referente ao Havre Seamount de dia 21 de julho de 2012 e o tapete de dia 10 de agosto de 2006 relativo a Home Reef. No dia 9 de agosto de 2006 o tapete de pedras pomes, ainda que metade esteja coberto por uma camada de nuvens, apresenta um único tapete, sendo por isso considerado que se encontre ainda como tapete de fase 1.

Vaughan & Webley, (2010), usaram os sensores ASTER e MODIS para estimar a magnitude, localização, início e duração da erupção do vulcão Hunga Tonga-Hunga Há'apai e para medição da evolução das caraterísticas da nova ilha. A imagem de dia 21 de março de 2009 referente ao sensor ASTER, confirma a existência de tapetes de pedras pomes associados a esta erupção. Podemos por isso confirmar que o “cordão” de cor castanha visível na imagem de dia 17 de março do mesmo ano, ilustrada na figura 26-A é referente a um tapete de pedras pomes. No entanto, a diminuta extensão do tapete não permite a observação de uma pluma de descoloração associada à lixiviação destes produtos (ver Figura 26-B). Este facto é corroborado pelas assinaturas espectrais extraídas de dia 17 de março, que não apresentam curvas idênticas a assinaturas espectrais de plumas de descoloração relativas a tapetes de pedras pomes (Figura 26-C). Os dois casos estudados apresentam grandes dimensões, o que permite a observação de plumas de descoloração gerados pela lixiviação. Estas plumas são, portanto, dependentes da extensão e dimensão dos tapetes a que estão associados.

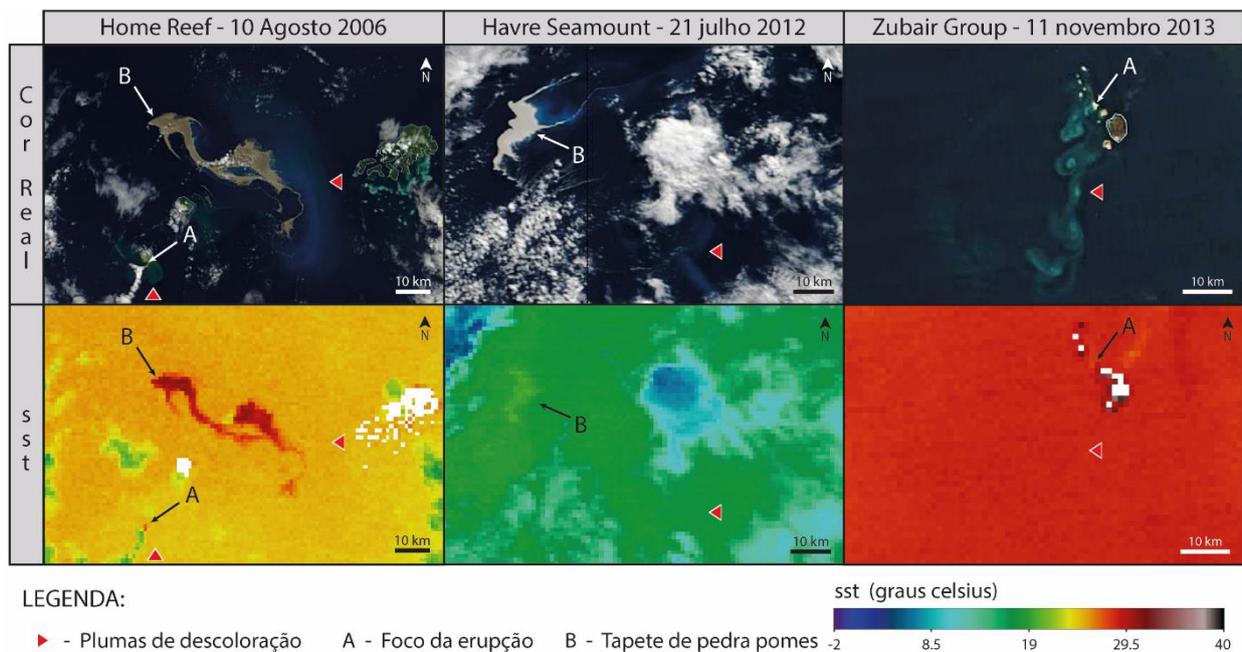
Quando comparado à temperatura do oceano, o tapete de pedra pomes referente a Home Reef está bem delimitado com temperaturas entre os 27 e os 31°C, enquanto o tapete referente ao Havre Seamount não apresenta temperaturas tão altas – por volta dos 19 aos 20°C – sendo possível também delimitar a maior parte da sua área (Figura 44). A diferença de temperaturas entre estes dois tapetes pode ser relativa à extensão dos mesmos – Home Reef apresenta uma maior área e por isso maior temperatura –, a correntes superficiais que se fazem sentir na área – Giro da Austrália Oriental que transporta águas quentes do equador – e à data de produção dos tapetes – segundo as imagens de satélite, em Home Reef, as jangadas de pedras pomes aparecem a 8 de agosto de 2006 (tendo 2 dias de existência na imagem utilizada) e no Havre Seamount o tapete aparece a partir do dia 18 de julho de 2012 (3 dias de existência). A fase em que cada tapete se encontra poderá ser, por isso, um dos fatores que afeta a temperatura à qual os tapetes se encontram.

## 8. Discussão de Resultados

O produto sst foi ainda analisado em duas outras ocasiões:

- Relativamente ao foco da erupção, verifica-se um ligeiro aumento na temperatura do oceano, tanto no caso de Home Reef como no caso do nascimento da Ilha Jadid no Zubair Group. Este aumento de temperatura poderá estar relacionado com o nascimento de ilhas que emitem energia térmica – no caso de Home Reef tratou-se de uma ilha efémera;
- As plumas de descoloração, tanto as referentes à lixiviação dos tapetes de pedras pomes como as plumas associadas à erupção, não são registadas através do produto sst, o que faz com que não seja viável a utilização do mesmo para o objetivo em causa.

Podemos, portanto, afirmar que os tapetes de pedras pomes são os produtos de erupções vulcânicas que mais emitem sinal térmico, como podemos ver na Figura 45.

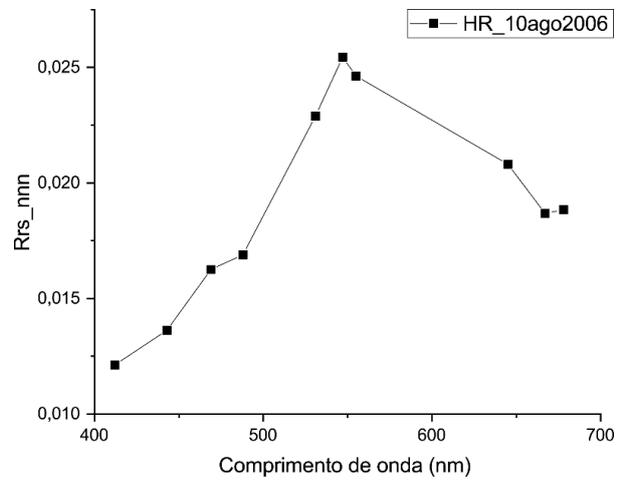


**Figura 45** - Produtos sst referentes a Home Reef de 10 de agosto de 2006, Havre Seamount de 21 de julho de 2012 e Zubair Group de 11 de novembro de 2013 (Notas: sst – sea surface temperature / temperatura da superfície do mar)

Urai (2014) demonstra, usando dados do sensor AVNIR-2, que a cor e brilho das plumas de descoloração da água indicam atividade vulcânica no vulcão Fukutoku-Oka-no-Ba. Estes dois fatores – mudanças de cor indicando descoloração de água e o seu brilho – indicam a emergência de grandes quantidades de águas termais, implicando atividade vulcânica. Estas plumas, associadas à mistura das águas termais com as águas frias do oceano, podem ser separadas de acordo com a tonalidade que apresentam, fator que é dependente da composição química das mesmas. As plumas verdes, apresentadas na secção 6.2., podem também ser divididas segundo a sua assinatura espectral.

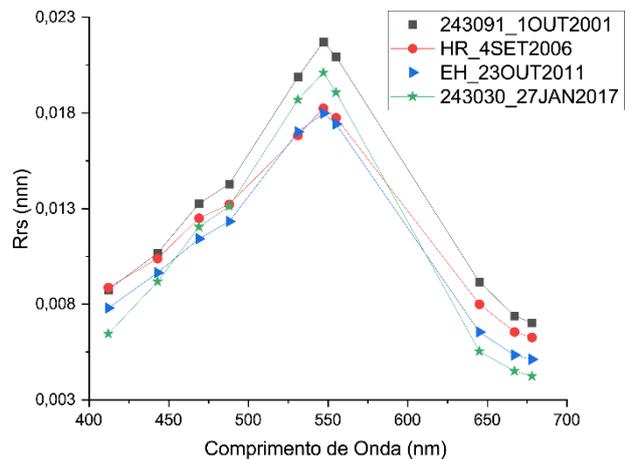
De acordo com as assinaturas espectrais obtidas, podemos observar várias assinaturas espectrais com características semelhantes entre si, pelo que se pode considerar que poderão pertencer à mesma fase.

Apenas uma assinatura espectral se assemelha à caracterização feita por Coca et al., (2014) para plumas de fase 1. Como podemos verificar no Gráfico 6, a assinatura espectral desta pluma relativa à erupção submarina do Home Reef no dia 10 de agosto de 2006, apresenta o seu pico máximo na área do verde, tendo uma ligeira descida deste comprimento de onda para o comprimento de onda da região do vermelho. Comparando a assinatura espectral à imagem de cor real, verifica-se que o ponto de amostragem relativo a esta assinatura espectral está localizado no foco da erupção, apresentando uma tonalidade verde acastanhada devido à presença de uma quantidade elevada de sedimentos.



**Gráfico 6** - Assinatura espectral de pluma de descoloração de tonalidade verde referente à 1ª fase

Seguidamente, temos assinaturas espectrais com um pico máximo na ordem dos 547 nm que tanto para o comprimento de onda da região do azul como para o vermelho tem descidas acentuadas – Gráfico 7. Este conjunto corresponde a plumas de tonalidade verde, neste caso com tonalidades mais fortes, pelo que se deduz que a concentração destas plumas será maior em relação às restantes ou que a localização do ponto de amostragem esteja mais perto do foco da erupção. Quando comparadas com a classificação de Coca et al., (2014), estas plumas parecem condizer com plumas da 2ª fase.



**Gráfico 7** - Assinatura espectral de plumas de descoloração de tonalidade verde (Notas: HR - Home Reef; EH - El Hierro)

## 8. Discussão de Resultados

Várias assinaturas espectrais – 11 ao todo – apresentam um pico máximo que varia entre os 531 e os 488 nm, sendo, portanto, classificadas como plumas de 3ª fase. Estas assinaturas exibem valores mais estáveis entre estes comprimentos de onda, sendo que a sua tonalidade está entre o azul e o verde (Gráfico 8). Segundo a localização dos pontos de amostragem relativos a estas assinaturas, a maior parte dos pontos estão situados perto do foco de erupção. Neste caso, pode-se considerar que a concentração química dos materiais e fluidos termais ejetados na água poderá ser um dos fatores que leva à diferenciação das tonalidades das plumas, visto que, nesta classe, metade das assinaturas são relativas ao início da erupção e a outra metade ao fim.

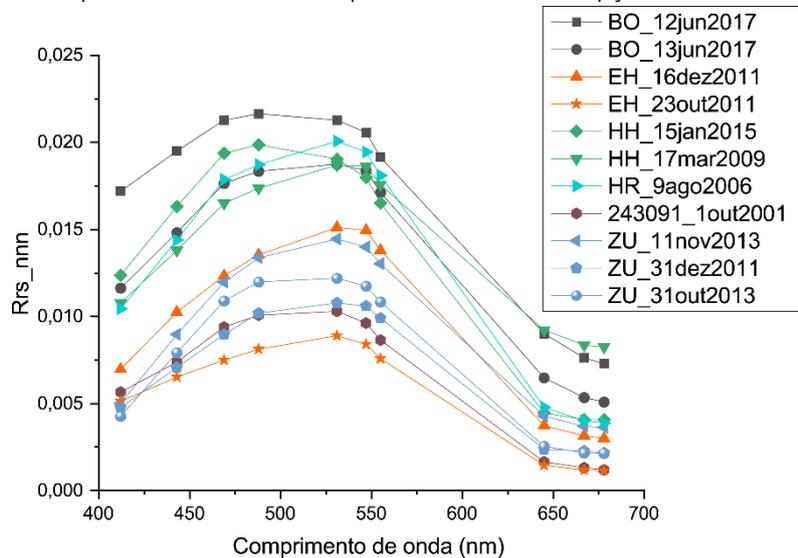


Gráfico 4 - Assinatura espectral de pluma de descoloração de tonalidade verde referente à 3ª fase

Os pontos de amostragem que apresentam assinaturas espectrais com pico máximo nos 488 nm são no seu todo 16, correspondendo assim à fase 4 (Gráfico 9). Apresentam semelhanças entre si, embora algumas assinaturas exibam comportamentos ligeiramente diferentes, ainda que o seu pico se encontre na região do azul – as diferenças no comportamento poderá ser relativo também à concentração das plumas dado que os pontos de amostragem das plumas relativas a esta fase encontram-se em zonas onde exibem concentrações baixas ou a zonas onde ocorreu a dispersão deste produto.

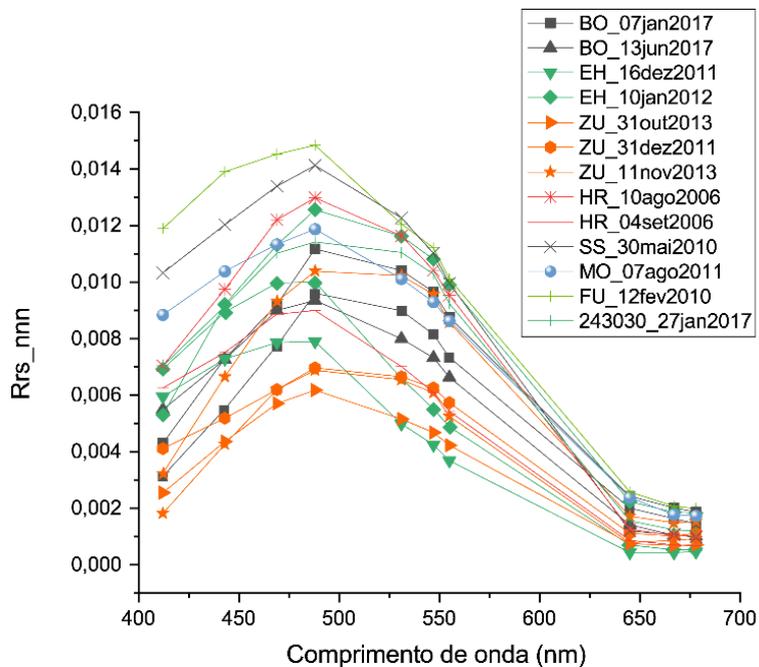


Gráfico 5 - Assinatura espectral de pluma de descoloração de tonalidade verde referente à 4ª fase

Há, no entanto, algumas assinaturas espectrais que não se encaixam em nenhuma destas fases. É proposta, por isso, uma 5ª fase caracterizada por um pico máximo no comprimento de onda dos 469 nm, com uma descida acentuada até à região dos verdes e posterior descida até à região do vermelho (Gráfico 10). Esta fase corresponderá a plumas com concentrações muito baixas, geralmente localizadas nos limites das plumas ou em zonas onde estas foram dispersas, difundindo-as.

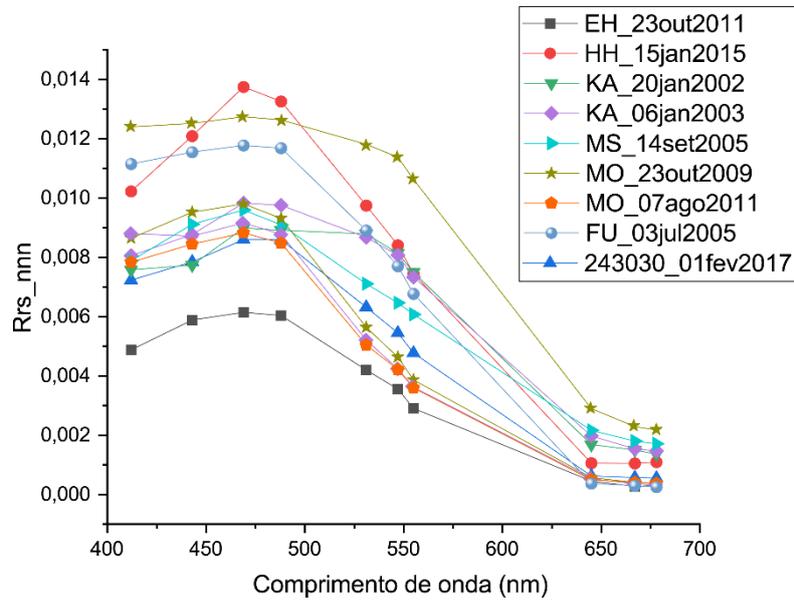


Gráfico 6 - Assinatura espectral de pluma de descoloração de tonalidade verde referente à 5ª fase

Como foram escolhidos os eventos significativos para cada erupção, não é possível relacionar estas plumas e as fases em que se encontram com um período específico das erupções em si, como por exemplo, período inicial, ao longo da erupção e no final da mesma. Porém, através das datas de início e fim das erupções constata-se que para a maior parte das plumas correspondentes às fases 3, 4 e 5 estão relacionadas com os meados das erupções e também com o seu fim. Para correlacionar as assinaturas espectrais com o período específico da erupção em si, era necessário outro tipo de amostragem, nomeadamente a análise de séries temporais para observação e estudo da evolução da pluma de descoloração oceânica.

Existem ainda 3 assinaturas espectrais que não correspondem a nenhuma das fases acima descritas (Gráfico 11). Estes pontos de amostragem estão localizados nos limites das plumas, pelo que assumem comportamentos semelhantes às assinaturas espectrais relativos ao oceano.

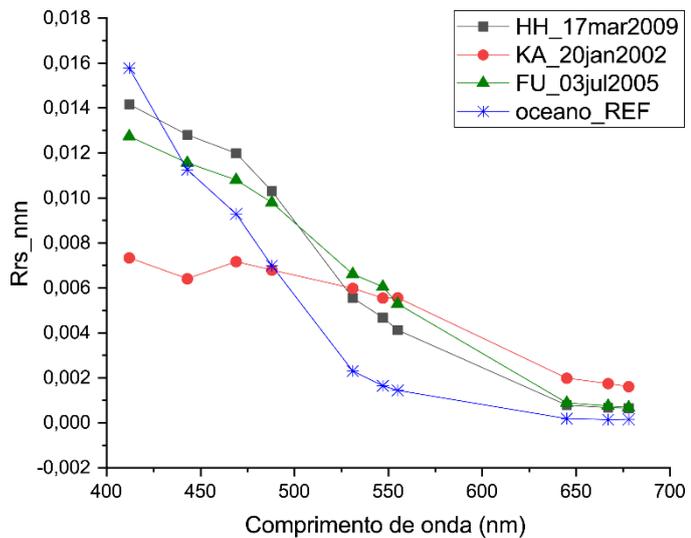


Gráfico 7 - Assinaturas espectrais incompatíveis com as fases propostas (Notas: HH – Hunga Tonga-Hunga Há’apai; FU – Fukutoku-Oka-no-Ba; KA – Kavachi)

## 8. Discussão de Resultados

No que toca às plumas de tonalidade castanha, as assinaturas não apresentam muitas semelhanças entre elas, denotando-se apenas que a descida entre os comprimentos de onda na região do verde e a região do vermelho é uma descida relativamente suave. Nas inconstâncias da assinatura espectral destas plumas, é de referir que a pluma referente ao vulcão Ioto, de dia 30 de abril de 2012 apresenta uma mistura de plumas castanhas e turquesas na imagem de cor real, o que provavelmente corresponde a uma expressão variável de cada componente ao longo do tempo, apresentando por isso um comportamento parecido ao das plumas de coloração verde de 3ª fase.

Os pontos de amostragem relativos a este tipo de plumas foram retirados segundo as imagens de cor real, no entanto a baixa resolução do sensor utilizado pode impossibilitar uma extração eficaz.

As assinaturas espectrais do oceano e da clorofila, foram extraídos para serem utilizados como valores de referência. Os valores de clorofila apresentam, todavia, algumas assinaturas relativamente diferentes do expectável:

- A imagem de 13 de junho de 2017 referente ao Bogoslof apresenta uma pluma de tonalidade verde escura que envolve a pluma de origem vulcânica (Figura 31). A assinatura espectral associada a esta pluma – que foi considerada neste trabalho como clorofila – apresenta uma assinatura espectral com valores máximos nos comprimentos de onda dos 547 e 555 nm.
- Um dos pontos de amostragem de clorofila, referente à data de erupção do Zubair Group, no Mar Vermelho também possui uma curva distinta da curva de referência – valores aumentam até atingirem o seu máximo aos 488 nm diminuído gradualmente a partir desse ponto.
- Referente ao El Hierro, temos duas curvas que seguem o comportamento normal da clorofila apenas em valores mais baixos. A terceira curva mostra um aumento irrisório dos 412 aos 469 nm, diminuindo a partir desse ponto.

Estes três vulcões com curvas díspares encontram-se todos localizados em zonas que não são consideradas ‘mar aberto’: o El Hierro encontra-se em zona de transição costeira, o Bogoslof no Mar de Bering e o Zubair Group no Mar Vermelho. Estão por isso condicionados a diferentes fatores, como correntes de *upwelling*, efeito de marés, variabilidade sazonal da concentração de clorofila, entre outros. Outro fator que pode influenciar a assinatura espectral destes *blooms* é a espécie associada – diferentes espécies de fitoplâncton apresentam diferentes assinaturas espectrais (Hunter, Tyler, Presing, Kovacs, & Preston, 2008; Londe, Novo, & Calijuri, 2005) – contudo,

só é possível fazer a distinção de espécies através de recolha de amostras *'in situ'* ou com o conhecimento/estudo da assinatura espectral de cada espécie.

Há registos onde se pode observar a influência de correntes marinhas na direção das plumas vulcânicas de tonalidade azul turquesa a verde. A Figura 32 referente ao vulcão El Hierro de dia 23 de outubro de 2011 exibe uma pluma vulcânica de tonalidades verdes que está a ser dispersa através de *eddies*, com orientação N-S.

Relativamente aos testes de classificação realizados, foram apenas utilizadas duas categorias (plumas de origem vulcânica e oceano) com o intuito de reduzir o erro associado a estes testes. No entanto, as diferentes concentrações das plumas vulcânicas contribuem para o aumento deste erro – quanto mais difusa for uma pluma, mais difícil será a sua deteção.

A realização dos métodos *'Gain Information'* e *'Ranker'* contribuem para uma melhor perceção das diferenças entre plumas e oceano. Apresentam valores entre 0 e 1, com valores mais perto de 1 a ter um maior ganho de informação. Segundo o ranking apresentado, a banda dos 555 nm é a banda onde é mais óbvia a diferença entre plumas e oceano, com um ganho de informação igual a 0,898.

A árvore de decisão criada é bastante compacta, o que retrata a *'facilidade'* com que o modelo separa o oceano das plumas de origem vulcânica. Esta árvore não utiliza a banda dos 555 nm, mas o 4º melhor atributo, a banda dos 547 nm. Como referido acima, os picos associados a esta banda são relativos a plumas de tonalidade verde de 2ª fase.

O modelo criado obteve uma performance de 96%, o que retrata uma boa percentagem na separação das duas categorias. Contudo, este valor poderá ser bom demais e existir algum ruído associado. Este modelo pode não estar preparado para a deteção de plumas de tonalidades castanhas devido às plumas em questão não terem uma assinatura espectral completamente diferente das plumas de tonalidades verdes. Isto acontece visto que as erupções e datas estudadas mostram transições das tonalidades.

Um dos problemas mais recorrentes deste processo foi a cobertura de nuvens. Como podemos verificar no Anexo 3, a maior parte dos dias em que a Guarda Costeira Japonesa regista a existência de plumas de descoloração referentes ao Fukutoku-Oka-no-Ba, estas não são observáveis através das técnicas de Detecção Remota utilizadas devido à existência de uma cobertura de nuvens. Há casos ainda que tapam porções parciais dos objetos em estudo – Figura 27 referente ao vulcão Home Reef, no dia 9 agosto de 2006 apresenta uma porção do tapete de pedra pomes e da pluma associada, que se encontram tapadas por nuvens; na Figura 30 podemos

## 8. Discussão de Resultados

observar que a pluma correspondente ao vulcão Bogoslof de dia 12 junho de 2017 se encontra por baixo de uma camada de nuvens, que não nos permitem observar esta pluma vulcânica na sua totalidade.

Visto que a água é um material refletor, em certos ângulos de incidência dos raios solares, não é possível obter nenhuns dados da superfície do oceano devido ao brilho provocado pelo reflexo da água do oceano. A figura 33 corresponde a um exemplo deste fenómeno – no dia 15 de janeiro de 2015 referente ao Hunga Tonga-Hunga Há'apai – onde é possível verificar no lado esquerdo da imagem de cor real a presença de 'glint', o que na imagem MODIS se retrata na ausência de dados adquiridos.

Nas imagens de cor real podemos ter dois tipos de fitoplâncton que podem ser confundidos com produtos de atividade vulcânica: *Trichodesmium* e cocolitoforos. Em relação aos 'blooms' de *Trichodesmium* estes podem ser confundidos com tapetes de pedras pomes devido à sua cor acastanhada, porém apresentam formas geralmente lineares enquanto os tapetes de pedra pomes exibem formas aleatórias. Mantas et al., (2011), relacionaram um 'bloom' de *Trichodesmium* nas imediações do vulcão Home Reef a uma pluma vulcânica submarina referente ao vulcão mencionado. Como referido na secção 3.4, a atividade vulcânica submarina introduz Fe nos meios oceânicos e é considerada decisiva para a estimulação da resposta deste tipo de fitoplâncton, que reage positivamente à entrada de Fe na água. Os cocolitoforos, outra espécie de fitoplâncton, quando em ambientes favoráveis multiplica-se, apresentando tonalidades parecidas às plumas de descoloração resultantes de atividade vulcânica.

A falta de imagens está associada à cobertura de nuvens e, em parte, à resolução espacial dos sensores utilizados. Esta última causa foi mais sentida no que toca às plumas castanhas, que devido à sua pequena dimensão quase não são observáveis tanto nas imagens de cor real como nos produtos de clorofila dos sensores MODIS.

A resolução temporal dos sensores também é um fator dominante para a observação destas plumas. O recurso mais utilizado foram as imagens MODIS devido ao seu pequeno tempo de repetição – conseguimos obter dados novos a cada dia. No caso do Landsat-8, tendo 16 dias de resolução temporal, haveria um período de tempo para o qual não seria possível a aquisição de dados da superfície oceânica e posterior deteção de plumas, pelo que não foram utilizadas imagens deste sensor para análise.

Como podemos observar no Anexo 2, as imagens recolhidas pela Guarda Costeira Japonesa têm melhor resolução espectral, ou seja, é possível detetar uma maior quantidade de tons na imagem. No entanto, devido aos satélites se encontrarem acima da camada atmosférica onde se

formam nuvens, a maior parte das imagens recolhidas pelos satélites não apresentam as plumas de descoloração resultantes das erupções vulcânicas. Outro problema das imagens adquiridas pela Guarda Costeira é referente à falta de um ponto que possa ser usado como escala, para discernimento das dimensões destas plumas e da sua evolução.

A caraterização necessária para a criação de um sistema de monitorização de erupções vulcânicas submarinas está por isso concretizada através da análise das assinaturas espetrais das plumas associadas a estes eventos. Como resultado sugere-se também a expansão da metodologia utilizada com recurso a aquisição de dados multimissão e análise de séries temporais para cada vulcão, com posterior comparação com os valores do coeficiente de atenuação difusa.

Existem, no entanto, vários passos a serem realizados para a criação deste sistema. A validação do modelo é um dos passos necessários e consiste na sua aplicação a várias imagens, testando assim a eficácia com que são separadas as plumas de origem vulcânica de plumas de origem biológica, alterando alguns parâmetros, como por exemplo o contexto geográfico. Esta validação é necessária para verificar a existência de falsos negativos – assinalada uma pluma, quando na realidade não existe – ou falsos positivos – pluma que não foi detetada.

Estes dados podem ser ainda melhorados através da conjugação de dados sísmicos, de batimetria e *in situ*. A instalação de um observatório submarino – através de um cabo – que monitoriza o Axial Seamount, em 2014, é um exemplo de dados que podem ser conjugados para a monitorização de eventos vulcânicos submarinos.

Devido à falta de conhecimento sobre os oceanos, a necessidade da criação de um sensor hiperespectral para fins oceânicos e com alta resolução espacial, que dê ênfase à deteção e monitorização de erupções vulcânicas submarinas é, de facto, importante. Este sensor conseguiria adquirir dados fiáveis, principalmente para casos de plumas de descoloração de tonalidade castanha, podendo ser usado também para a deteção de ilhas de lixo flutuante ou plástico, deteção e monitorização de manchas de petróleo em casos de derrame, análise de avanço e recuo costeiro, entre outros.

## 9. Considerações Finais

---

Neste estudo, foram usados principalmente dados do sensor MODIS para análise de refletância de plumas de descoloração associadas a erupções vulcânicas submarinas ocorridas entre os anos 2000 e 2018.

Foram registadas 60 erupções vulcânicas submarinas referentes a 31 vulcões diferentes. Destes vulcões a maior parte encontra-se localizada no Oceano Pacífico, ao longo do Anel de Fogo, estando apenas 5 vulcões no Oceano Atlântico e 1 no Mar Vermelho.

Em 16 vulcões não foram detetados quaisquer produtos vulcânicos à superfície – para 2 existem relatos de plumas de descoloração e explosões, mas para essa data não existiam ainda dados de satélite disponíveis. De acordo com a profundidade à qual estes vulcões se situam, podemos afirmar que a partir dos 900 m de profundidade não há registos de produtos vulcânicos à superfície.

No que toca aos restantes vulcões, estes apresentam registos desde nuvens de cinzas, vapor, plumas de descoloração e tapetes de pedras pomes como expressão superficial de atividade submarina.

A análise de plumas de descoloração associadas a estes eventos através das suas assinaturas espectrais permitiu separar as plumas em várias categorias diferentes – apresentando comportamentos espectrais semelhantes entre si e diferentes de *blooms* de clorofila e do oceano:

- Plumam de descoloração de pedras pomes: Estas plumas, associadas à lixiviação de tapetes de pedras pomes, apresentam tonalidades azuladas e a sua assinatura espectral exhibe picos máximos na ordem dos 469-488 nm. De acordo com a sua composição, este comportamento pode mudar – Havre Seamount produziu um tapete de pedras pomes riolítico apresentando uma assinatura espectral com valores estáveis até aos 488 nm e caindo abruptamente para a região do vermelho e o Home Reef produziu um tapete de pedras pomes dacítico que exhibe picos entre os 469-488 com uma ligeira descida para comprimentos de onda mais baixos e uma descida acentuada para a região do vermelho;
- Plumam de descoloração de tonalidade verde: Associadas à mistura de fluidos termais com águas frias do oceano e caracterizadas por um aumento de Al, estas plumas podem ser divididas em várias fases. Numa primeira fase, a assinatura espectral correspondente apresenta valores máximos na região do verde com uma descida acentuada para os azuis e uma ligeira descida para a região do vermelho, correspondendo assim a pixéis

acastanhados, resultado da elevada quantidade de material vulcânico/sedimentos ejetados pelos vulcões. A segunda fase, é referente a tonalidades verdes mais fortes, apresentando por isso, o seu pico aos 547 nm com descidas abruptas tanto para a região dos azuis como para a região dos vermelhos. Numa terceira fase estão incorporadas as plumas com assinaturas espectrais com picos máximos entre os 488 e os 531 nm. Assinaturas espectrais com picos aos 488 nm e caraterizadas com uma descida ligeiramente constante para a região do azul e uma mais ingreme para a região dos vermelhos corresponde à fase 4. É ainda sugerida a criação de uma nova fase, com picos nos 469 nm, com uma ligeira descida até à região do verde e posterior descida mais acentuada até à região do vermelho. Estas três últimas fases poderão estar associadas a plumas de tonalidades mais claras, fruto de erupções mais fracas ou da dispersão das plumas por efeito de ventos e/ou correntes oceânicas.

- Plumam de descoloração de tonalidade castanha: os resultados não são compatíveis com a tonalidade apresentada. Isto pode ser devido às plumas terem expressões relativamente pequenas em que os sensores utilizados – que não são de alta resolução espacial – não conseguem detetar as plumas nas suas totalidades ou pelo facto das plumas estudadas terem expressões que variam entre as plumas castanhas e as plumas de tonalidade verde. As plumas castanhas estão associadas à precipitação de Fe.

Os testes de classificação realizados avaliaram os dados adquiridos de maneira a ser possível a construção de um modelo que apresenta um bom desempenho com 96% de *performance*. Significa, por isso, que este modelo – que utiliza os dados apresentados neste trabalho – separa com sucesso plumas de descoloração, principalmente nas imediações da fonte, de outros alvos, como por exemplo, *blooms* de fitoplâncton e abre as portas para a aplicação de deteção automática.

Contudo, é de referir que a cor associada à descoloração de água depende da composição química da mesma e da dispersão destas plumas. Por serem fruto de erupções submarinas estas plumas são influenciadas por partículas minerais, podendo por isso serem consideradas águas de tipo II.

As erupções submarinas são eventos recorrentes – em 2019, o vulcão 243091 formou um extenso tapete de pedras pomes captado por satélites e o Metis Shoal estendeu a sua ilha. Este tipo de atividade têm os seus riscos associados e é por isso necessário monitorizar este tipo de atividade. A compreensão de Vulcanismo Submarino ajuda também a entender processos planetários – o Mars Reconnaissance Orbiter da NASA mapeou pequenos vulcões semelhantes aos

## 9. Considerações finais

de Tonga, que podem ter entrado em erupção em mares rasos produzindo assim paisagens que refletem a profundidade e a ação das ondas. A monitorização e estudo deste tipo de atividade é por isso uma tarefa importante.

Como trabalhos futuros para a criação de uma rede de monitorização de erupções submarinas e para uma maior compreensão nesta área sugere-se uma ampliação deste estudo com testes exaustivos, como por exemplo, uso de dados de satélite adquiridos por sensores com resoluções espaciais altas e aplicação de mais sensores, comparação dos valores de refletância com os coeficientes de difusão, análise temporal da totalidade das datas de atividade para verificar a evolução das mesmas, utilização da plataforma GIOVANNI da NASA – que permite a aquisição de dados de batimetria, onde são escolhidos os pontos favoráveis e é posteriormente aplicado o algoritmo em dados descarregados da plataforma, por exemplo.

O baixo custo associado à aplicação de técnicas de deteção remota e os elevados benefícios da utilização destes dados são dois dos pontos mais importantes retirados deste estudo. A metodologia utilizada permitiu a deteção e caracterização de plumas de descoloração associadas a Vulcanismo Submarino de maneira eficaz, trazendo novos dados a esta temática. Conclui-se, portanto, que a deteção e diferenciação de plumas de descoloração associadas a eventos vulcânicos submarinos através de dados remotos é possível ser realizada de uma maneira eficaz e eficiente.

## 10. Bibliografia

---

- Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2018). *Artificial Intelligence, Automation and Work*. Cambridge, MA. <https://doi.org/10.3386/w24196>
- Acocella, V. (2014). Great challenges in volcanology: how does the volcano factory work? *Frontiers in Earth Science*, 2(April), 1–10. <https://doi.org/10.3389/feart.2014.00004>
- Ajmi, D. Al, & Din, S. ud. (2009). Remote Sensing: Fundamentals, Types and Monitoring Applications of Environmental Consequences of War. In *Handbook of Environmental Chemistry, Volume 3: Anthropogenic Compounds* (Vol. 3, pp. 41–124). [https://doi.org/10.1007/978-3-540-87963-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-87963-3_3)
- Andrade, C., Cruz, J. V, Viveiros, F., Coutinho, R., & Freire, P. (2014). *Emissão de CO 2 na Lagoa das Furnas (São Miguel, Açores): resultados preliminares CO 2 emission in Furnas lake (São Miguel, Azores): preliminary results. Especial* (Vol. 101). Retrieved from <http://www.lneg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/185>
- Augustin, N., Devey, C. W., van der Zwan, F. M., Feldens, P., Tominaga, M., Bantan, R. A., & Kwasnitschka, T. (2014). The rifting to spreading transition in the Red Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 395, 217–230. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.047>
- Baker, E. T., Embley, R. W., Walker, S. L., Resing, J. A., Lupton, J. E., Nakamura, K. I., ... Massoth, G. J. (2008). Hydrothermal activity and volcano distribution along the Mariana arc. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(8), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2007JB005423>
- Barnes, B. B., Hu, C., Schaeffer, B. A., Lee, Z., Palandro, D. A., & Lehrter, J. C. (2013). MODIS-derived spatiotemporal water clarity patterns in optically shallow Florida Keys waters: A new approach to remove bottom contamination. *Remote Sensing of Environment*, 134, 377–391. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.016>
- Baumberger, T., Lilley, M. D., Resing, J. A., Lupton, J. E., Baker, E. T., Butterfield, D. A., ... Früh-Green, G. L. (2014). Understanding a submarine eruption through time series hydrothermal plume sampling of dissolved and particulate constituents: West Mata, 2008-2012. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(12), 4631–4650. <https://doi.org/10.1002/2014GC005460>
- Becerril, L., Cappello, A., Galindo, I., Neri, M., & Del Negro, C. (2013). Spatial probability distribution of future volcanic eruptions at El Hierro Island (Canary Islands, Spain). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 257, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.03.005>
- Boyd, P. W., Watson, A. J., Law, C. S., Abraham, E. R., Trull, T., Murdoch, R., ... Zeldis, J. (2000). A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/35037500>
- Brink, U. S. ten, & López-Venegas, A. M. (2012). Plate interaction in the NE Caribbean subduction zone from continuous GPS observations. *Geophysical Research Letters*, 39(10), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2012GL051485>
- Bryan, S. E., Cook, A. G., Evans, J. P., Hebden, K., Hurrey, L., Colls, P., ... Firn, J. (2012). Rapid, Long-Distance Dispersal by Pumice Rafting. *PLoS ONE*, 7(7), e40583. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040583>
- Buck, N. J., Resing, J. A., Baker, E. T., & Lupton, J. E. (2018). Chemical Fluxes From a Recently Erupted Shallow Submarine Volcano on the Mariana Arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(5), 1660–1673. <https://doi.org/10.1029/2018GC007470>
- Campbell, L., Carpenter, E. J., Montoya, J. P., Kustka, A. B., & Capone, D. G. (2005). Picoplankton community structure within and outside a Trichodesmium bloom in the southwestern Pacific Ocean. *Vie et Milieu*, (55), 185–195.
- Camps-Valls, G., Tuia, D., Gómez-Chova, L., Jiménez, S., & Malo, J. (2011). Remote Sensing

## 10. Bibliografia

- Image Processing. *Synthesis Lectures on Image, Video, and Multimedia Processing*, 5(1), 1–192. <https://doi.org/10.2200/S00392ED1V01Y201107IVM012>
- Carracedo, J. C., Torrado, F. P., González, A. R., Soler, V., Turiel, J. L. F., Troll, V. R., & Wiesmaier, S. (2012). The 2011 submarine volcanic eruption in El Hierro (Canary Islands). *Geology Today*, 28(2), 53–58. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2451.2012.00827.x>
- Cas, R. A. F., & Simmons, J. M. (2018). Why Deep-Water Eruptions Are So Different From Subaerial Eruptions. *Frontiers in Earth Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00198>
- Chekhovich, V. D., Sukhov, A. N., Sheremet, O. G., & Kononov, M. V. (2012). Cenozoic geodynamics of the Bering Sea region. *Geotectonics*, 46(3), 212–231. <https://doi.org/10.1134/S001685211203003X>
- Coca, J., Ohde, T., Redondo, A., García-Weil, L., Santana-Casiano, M., González-Dávila, M., ... Ramos, A. G. (2014). Remote sensing of the El Hierro submarine volcanic eruption plume. *International Journal of Remote Sensing*, 35(17), 6573–6598. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.960613>
- Coppola, D., Ripepe, M., Laiolo, M., & Cigolini, C. (2017). Modelling satellite-derived magma discharge to explain caldera collapse. *Geology*, 45(6), 523–526. <https://doi.org/10.1130/G38866.1>
- Costa, K. M., McManus, J. F., Boulahanis, B., Carbotte, S. M., Winckler, G., Huybers, P. J., & Langmuir, C. H. (2016). Sedimentation, stratigraphy and physical properties of sediment on the Juan de Fuca Ridge. *Marine Geology*, 380, 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.08.003>
- Costa, R. P. F. G. R. (2012). *Modelação térmica da Central Geotérmica do Pico Vermelho*. Universidade de Aveiro.
- Cross, R. S., & Freymueller, J. T. (2008). Evidence for and implications of a Bering plate based on geodetic measurements from the Aleutians and western Alaska. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(7), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2007JB005136>
- Cruden, A. R., & Weinberg, R. F. (2018). Mechanisms of Magma Transport and Storage in the Lower and Middle Crust—Magma Segregation, Ascent and Emplacement. In *Volcanic and Igneous Plumbing Systems* (pp. 13–53). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809749-6.00002-9>
- de Ronde, C. E. J., Baker, E. T., Massoth, G. J., Lupton, J. E., Wright, I. C., Feely, R. A., & Greene, R. R. (2001). Intra-oceanic subduction-related hydrothermal venting, Kermadec volcanic arc, New Zealand. *Earth and Planetary Science Letters*, 193(3–4), 359–369. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00534-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00534-9)
- de Ronde, C. E. J., Baker, E. T., Massoth, G. J., Lupton, J. E., Wright, I. C., Sparks, R. J., ... Lebon, G. T. (2007). Submarine hydrothermal activity along the mid-Kermadec Arc, New Zealand: Large-scale effects on venting. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(7), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2006GC001495>
- Duarte, J. C., Rosas, F. M., Terrinha, P., Schellart, W. P., Boutelier, D., Gutscher, M. A., & Ribeiro, A. (2013). Are subduction zones invading the atlantic? Evidence from the southwest iberia margin. *Geology*. <https://doi.org/10.1130/G34100.1>
- Dumont, S., Sigmundsson, F., Parks, M. M., Drouin, V. J. P., Pedersen, G. B. M., Jónsdóttir, I., ... Oddsson, B. (2018). Integration of SAR Data Into Monitoring of the 2014–2015 Holuhraun Eruption, Iceland: Contribution of the Icelandic Volcanoes Supersite and the FutureVolc Projects. *Frontiers in Earth Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00231>
- Eibe Frank, Mark A. Hall, and Ian H. Witten (2016). The WEKA Workbench. Online Appendix for "Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques", Morgan Kaufmann, Fourth Edition, 2016.
- Embley, R., Tamura, Y., Merle, S., Sato, T., Ishizuka, O., Chadwick, W., ... Stern, R. (2014). Eruption of South Sarigan Seamount, Northern Mariana Islands: Insights into Hazards from

- Submarine Volcanic Eruptions. *Oceanography*, 27(2), 24–31. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2014.37>
- Embley, R. W., Chadwick, W. W., Baker, E. T., Butterfield, D. A., Resing, J. A., de Ronde, C. E. J., ... Tamura, Y. (2006). Long-term eruptive activity at a submarine arc volcano. *Nature*, 441(7092), 494–497. <https://doi.org/10.1038/nature04762>
- ESA. (n.d.). Retrieved August 17, 2019, from [http://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Overview4](http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4)
- Eugenio, F., Martin, J., Marcello, J., & Fraile-Nuez, E. (2014). Environmental monitoring of El Hierro Island submarine volcano, by combining low and high resolution satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 29(1), 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.12.009>
- Feldman, G. C. (n.d.). Monitoring the Earth from Space with SeaWiFS. Retrieved February 12, 2020, from [https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/TEACHERS/sanctuary\\_3.html](https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/TEACHERS/sanctuary_3.html)
- Forjaz, V. H.; Rocha, F. M.; Medeiros, J. M.; Meneses, L. F. & Sousa, C. (2000) "Notícias sobre o Vulcão Oceânico da Serreta, Ilha Terceira dos Açores" Ed. OGVA
- Franz, B. A. (2008). Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer on Terra: limitations for ocean color applications. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2(1), 023525. <https://doi.org/10.1117/1.2957964>
- Fundamentals of Remote Sensing*. (n.d.). Natural Resources Canada. Retrieved from <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>
- Gabsatarov, Y. V., Steblov, G. M., & Frolov, D. I. (2013). The new GPS evidence for the region of Bering microplate. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 49(3), 411–415. <https://doi.org/10.1134/S106935131302002X>
- Gardner, J. V., Armstrong, A. A., Calder, B. R., & Beaudoin, J. (2014). So, How Deep Is the Mariana Trench? *Marine Geodesy*, 37(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/01490419.2013.837849>
- Goldberg, M., Cikanek, H., Zhou, L., & Price, J. (2017). Remote Sensing Missions and Sensors. In S. Liang (Ed.), *Comprehensive remote sensing* (1st ed., Vol. 9, pp. 1–3). Elsevier Science & Technology.
- González, M. N. (2017). Fire Meets Water - Schmidt Ocean Institute. Retrieved February 12, 2020, from <https://schmidtocean.org/cruise-log-post/fire-meets-water/>
- Graff, A. J. L. (2017). *Águas termais e termalismo em São Miguel, Açores*. Ponta Delgada: Universidade dos Açores.
- Green, D. N., Evers, L. G., Fee, D., Matoza, R. S., Snellen, M., Smets, P., & Simons, D. (2013). Hydroacoustic, infrasonic and seismic monitoring of the submarine eruptive activity and sub-aerial plume generation at South Sarigan, May 2010. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 257, 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.03.006>
- Gudmundsson, M. T., Pedersen, R., Vogfjörd, K., Thorbjarnardóttir, B., Jakobsdóttir, S., & Roberts, M. J. (2010). Eruptions of eyjafjallajökull Volcano, Iceland. *Eos*, 91(21), 191. <https://doi.org/10.1029/2010EO210003>
- Gudmundsson, M. T., Thordarson, T., Höskuldsson, Á., Larsen, G., Björnsson, H., Prata, F. J., ... Jónsdóttir, I. (2012). Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland. *Scientific Reports*, 2(1), 572. <https://doi.org/10.1038/srep00572>
- Gupta, H. K. (2011). Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. In *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8702-7>
- Gupta, R. P. (2017). *Remote sensing geology: Third edition*. *Remote Sensing Geology: Third Edition*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55876-8>
- Hu, C., Feng, L., Lee, Z., Davis, C. O., Mannino, A., McClain, C. R., & Franz, B. A. (2012). Dynamic

## 10. Bibliografia

- range and sensitivity requirements of satellite ocean color sensors: learning from the past. *Applied Optics*, 51(25), 6045. <https://doi.org/10.1364/AO.51.006045>
- Huang, F., Lundstrom, C. C., Sigurdsson, H., & Zhang, Z. (2011). U-series disequilibria in Kick'em Jenny submarine volcano lavas: A new view of time-scales of magmatism in convergent margins. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(1), 195–212. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.05.036>
- Hunter, P., Tyler, A., Presing, M., Kovacs, A., & Preston, T. (2008). Spectral discrimination of phytoplankton colour groups: The effect of suspended particulate matter and sensor spectral resolution. *Remote Sensing of Environment*, 112(4), 1527–1544. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.003>
- Global Volcanism Program, 2013. Volcanoes of the World, v. 4.8.6 (20 Jan 2019). Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>.
- IBGE, P. D. de G. do N. (2001). *Introdução ao Processamento Digital de Imagens*. (IBGE, Ed.). Rio de Janeiro: IBGE.
- Innman, A., Easson, G., Asper, V. L., & Diercks, A. (2010). The effectiveness of using MODIS products to map sea surface oil. In *OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2010.5664416>
- IOC, IHO and BODC, 2003, "Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas", published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans; British Oceanographic Data Centre, Liverpool.
- Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, 31(8), 651–666. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011>
- Jensen, J. R. (2015). *Introductory digital image processing : a remote sensing perspective* (4th ed.). Pearson Education.
- Karlstrom, L., Talling, P. J., Carey, R. J., Jutzeler, M., White, J. D. L., & Marsh, R. (2014). On the fate of pumice rafts formed during the 2012 Havre submarine eruption. *Nature Communications*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/ncomms4660>
- Keith, D. J., Schaeffer, B. A., Lunetta, R. S., Gould, R. W., Rocha, K., & Cobb, D. J. (2014). Remote sensing of selected water-quality indicators with the hyperspectral imager for the coastal ocean (HICO) sensor. *International Journal of Remote Sensing*, 35(9), 2927–2962. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.894663>
- Kelley, D. S., Delaney, J. R., & Juniper, S. K. (2014). Establishing a new era of submarine volcanic observatories: Cabling Axial Seamount and the Endeavour Segment of the Juan de Fuca Ridge. *Marine Geology*, 352, 426–450. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.010>
- Kemner, F., Haase, K. M., Beier, C., Krumm, S., & Brandl, P. A. (2015). Formation of andesite melts and Ca-rich plagioclase in the submarine Monowai volcanic system, Kermadec arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(12), 4130–4152. <https://doi.org/10.1002/2015GC005884>
- Kueppers, U., Nichols, A. R. L., Zanon, V., Potuzak, M., & Pacheco, J. M. R. (2012). Lava balloons-peculiar products of basaltic submarine eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 74(6), 1379–1393. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0597-x>
- Lacroix. (1906). La Montagne Pelee et ses Eruptions. *Bulletin of the American Geographical Society*, 38(1), 60. <https://doi.org/10.2307/198615>
- Ligi, M., Bonatti, E., & Rasul, N. M. A. (2015). Seafloor Spreading Initiation: Geophysical and Geochemical Constraints from the Thetis and Nereus Deeps, Central Red Sea. In *The Red Sea* (pp. 79–98). Springer Earth System Sciences. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-45201-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45201-1_4)
- Londe, L. de R., Novo, E. M. L. de M., & Calijuri, M. do C. (2005). Avanços no estudo do

- comportamento espectral do fitoplâncton e identificação remota de algas. In *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE*.
- Macdonald, I. R., Guinasso, N. L., Ackleson, S. G., Amos, J. F., Duckworth, R., Sassen, R., & Brooks, J. M. (1993). Natural oil slicks in the Gulf of Mexico visible from space. *Journal of Geophysical Research*, 98(C9), 16351. <https://doi.org/10.1029/93JC01289>
- Mackey, D. J., O'Sullivan, J. E. Os., & Watson, R. J. (2002). Iron in the western Pacific: a riverine or hydrothermal source for iron in the Equatorial Undercurrent? *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 49(5), 877–893. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(01\)00075-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(01)00075-9)
- Madureira, P., Rosa, C., Marques, A. F., & Silva, P. (2016). The 1998-2001 submarine lava balloon eruption at the Serreta ridge (Azores archipelago): Constraints from volcanic facies architecture, isotope geochemistry and magnetic data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.11.006>
- Maio, A. Di, Rudorff, B. F. T., Moraes, E. C. de, Pereira, G., Moreira, M. A., Sausen, T. M., & Florenzano, T. G. (2008). Sensoriamento remoto, 82.
- Manga, M., Fauria, K. E., Lin, C., Mitchell, S. J., Jones, M., Conway, C. E., ... Tani, K. (2018). The pumice raft-forming 2012 Havre submarine eruption was effusive. *Earth and Planetary Science Letters*, 489, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.02.025>
- Mantas, V. M., & Pereira, A. J. S. C. (2010). Pumice Rafts Monitoring Using Multi-Mission Data As an Aid for Ship Navigation and Marine / Coastal Resource-Management. In H. Lacoste-Francis (Ed.), *ESA Living Planet Symposium* (Vol. 2010, pp. 1–8). Bergen, Norway: ESA.
- Mantas, V. M., Pereira, A. J. S. C., & Morais, P. V. (2011). Plumes of discolored water of volcanic origin and possible implications for algal communities. The case of the Home Reef eruption of 2006 (Tonga, Southwest Pacific Ocean). *Remote Sensing of Environment*, 115(6), 1341–1352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.01.014>
- Matos, J. (2008). *Fundamentos de Informação Geográfica*. (LIDEL, Ed.).
- McClain, C. R. (2009). A Decade of Satellite Ocean Color Observations. *Annual Review of Marine Science*. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163650>
- Meister, G., & Franz, B. A. (2014). Corrections to the MODIS Aqua Calibration Derived From MODIS Aqua Ocean Color Products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(10), 6534–6541. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2297233>
- Meyer, J. L., Akerman, N. H., Proskurowski, G., & Huber, J. A. (2013). Microbiological characterization of post-eruption “snowblower” vents at axial seamount, Juan de Fuca ridge. *Frontiers in Microbiology*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00153>
- Mobley, C., Stramski, D., Bissett, P., & Boss, E. (2004). Optical Modeling of Ocean Waters: Is the Case 1 - Case 2 Classification Still Useful? *Oceanography*, 17(2), 60–67. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2004.48>
- Moore, T. S., Dowell, M. D., & Franz, B. A. (2012). Detection of coccolithophore blooms in ocean color satellite imagery: A generalized approach for use with multiple sensors. *Remote Sensing of Environment*, 117, 249–263. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.001>
- Moreira, M. A. (2007). *Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação*. (Universidade Federal de Viçosa, Ed.) (3rd ed.).
- Morgan, D. J., Blake, S., Rogers, N. M., De Vivo, B., Rolandi, G., & Davidson, J. P. (2006). Magma chamber recharge at Vesuvius in the century prior to the eruption of A.D. 79. *Geology*, 34(10), 845–848. <https://doi.org/10.1130/G22604.1>
- Nakanishi, M., & Hashimoto, J. (2011). A precise bathymetric map of the world's deepest seafloor, Challenger Deep in the Mariana Trench. *Marine Geophysical Research*, 32(4), 455–463. <https://doi.org/10.1007/s11001-011-9134-0>
- NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing

## 10. Bibliografia

- Group; (2014): Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) Ocean Color Data, NASA OB.DAAC. doi: 10.5067/ORBVIEW-2/SEAWIFS\_OC.2014.0. Accessed on 2016/02/29.
- Nogami, K., Yoshida, M., & Ossaka, J. (1993). Chemical Composition of Discolored Seawater around Satsuma-Iwojima, Kagoshima, Japan. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*. [https://doi.org/10.18940/kazan.38.3\\_71](https://doi.org/10.18940/kazan.38.3_71)
- Novo, E. M. L. de M., & Ponzoni, F. J. (2001). *Introdução ao Sensoriamento Remoto*. São José dos Campos: Instituto Nacional de pesquisas Espaciais, Divisão de Sensoriamento Remoto.
- O'Connor, J. M., & Jokat, W. (2015). Tracking the tristan-gough mantle plume using discrete chains of intraplate volcanic centers buried in the walvis ridge. *Geology*, 43(8), 715–718. <https://doi.org/10.1130/G36767.1>
- O'hara, K. D., & Esawi, E. K. (2013). Model for the eruption of the Old Faithful geyser, Yellowstone National Park. *GSA Today*. <https://doi.org/10.1130/GSATG166A.1>
- O'Leary, D. E. (2013). 'BIG DATA', THE 'INTERNET OF THINGS' AND THE 'INTERNET OF SIGNS.' *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management*, 20(1), 53–65. <https://doi.org/10.1002/isaf.1336>
- O'Malley, R. T., Behrenfeld, M. J., Westberry, T. K., Milligan, A. J., Reese, D. C., & Halsey, K. H. (2014). Improbability mapping: A metric for satellite-detection of submarine volcanic eruptions. *Remote Sensing of Environment*, 140, 596–603. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.029>
- Ono, T. (2015). Volcanic activity of Nishinoshima volcano in 2013-2015. In *Japan Geoscience Union Meeting* (p. 2015).
- Ossaka, J., Hirabayashi, J., Nogami, K., Tsuchide, M., & Adachi, N. (1996). Chemical Composition of Discolored Seawater Corresponding to Activity of Fukutoku-Oka-no-Ba Submarine Volcano: As an Index of Submarine Volcanism November 1996. [https://doi.org/10.18940/kazan.41.3\\_107](https://doi.org/10.18940/kazan.41.3_107)
- Parfitt, E. A., & Wilson, L. (2008). *Fundamentals of Physical Volcanology*. Blackwell Publishing.
- Pimentel, A., Pacheco, J., & Self, S. (2015). The ~1000-years BP explosive eruption of Caldeira Volcano (Faial, Azores): the first stage of incremental caldera formation. *Bulletin of Volcanology*, 77(5). <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0930-2>
- Pyle, D. M. (2015). Sizes of Volcanic Eruptions. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 257–264). Oxford, UK: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00013-4>
- Raitsos, D. E., Pradhan, Y., Brewin, R. J. W., Stenchikov, G., & Hoteit, I. (2013). Remote Sensing the Phytoplankton Seasonal Succession of the Red Sea. *PLoS ONE*, 8(6), e64909. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064909>
- Resing, J. A., Baker, E. T., Lupton, J. E., Walker, S. L., Butterfield, D. A., Massoth, G. J., & Nakamura, K. (2009). Chemistry of hydrothermal plumes above submarine volcanoes of the Mariana Arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(2), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2008GC002141>
- Resing, J. A., Chadwick, W., & Merle, S. G. (2016). *FK151121 - Cruise Report Hydrothermal Hunt on the Mariana Back-arc*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2061.3528>
- Rhodes, J. M., Morgan, C., & Li, R. A. S. (1990). Geochemistry of Axial Seamount Lavas ' Magmatic Relationship Between the Cobb Hotspot and the Juan de Fuca Ridge individual dredge hauls was selected for geochemical analysis . according to the five ridge segments , are given in Table from Liias Then the, 95.
- Rivera, J., Lastras, G., Canals, M., Acosta, J., Arrese, B., Hermida, N., ... Amblas, D. (2013). Construction of an oceanic island: Insights from the El Hierro (Canary Islands) 2011-2012 submarine volcanic eruption. *Geology*, 41(3), 355–358. <https://doi.org/10.1130/G33863.1>
- Rocha, F. J. P. da S. P. (2002). *Integração de dados estatísticos na classificação de imagens de satélite*. Universidade Técnica de Lisboa.

- Rocha, J. (2002). INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO INTEGRAÇÃO DE DADOS ESTATÍSTICOS NA CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas de Informação Geográfica Fernando Jorge Pedro da Silva Pinto da Rocha ( Licenciado ) Orientador Cie.
- Rodrigues, S. V., Marinho, M. M., de Azevedo Cubas Jonck, C. C., Correa, R. M., Oliveira, A. C. L., Gonçalves, E. S., ... de Paiva Brandão, F. (2017). COMPOSIÇÃO DO FITOPLÂNCTON A PARTIR DA AVALIAÇÃO DE PIGMENTOS MARCADORES (CAROTENOIDES E CLOROFILAS) \*Rodrigues, S.V., Marinho, M.M., Jonck, C.C.A.C., Correa, R.M., Oliveira, A.C.L., Gonçalves, E.S., Santos, M.C., Brant, V.F., Brandão, F.P. 2017. Compos. In *Ambiente Pelágico* (pp. 89–125). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-85-352-7276-5.50013-0>
- Romero, A., Gatta, C., & Camps-Valls, G. (2016). Unsupervised Deep Feature Extraction for Remote Sensing Image Classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(3), 1349–1362. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2478379>
- Rong-Rong Li, Kaufman, Y. J., Bo-Cai Gao, & Davis, C. O. (2003). Remote sensing of suspended sediments and shallow coastal waters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(3), 559–566. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.810227>
- Rotella, M. D., Wilson, C. J. N., Barker, S. J., Ian Schipper, C., Wright, I. C., & Wysoczanski, R. J. (2015). Dynamics of deep submarine silicic explosive eruptions in the Kermadec arc, as reflected in pumice vesicularity textures. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 314–332. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.021>
- Rubin, K., Soule, S. A., Chadwick, W., Fornari, D., Clague, D., Embley, R., ... Dziak, R. (2012). Volcanic Eruptions in the Deep Sea. *Oceanography*, 25(1), 142–157. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.12>
- Salters, V. J. M., & Sachi-Kocher, A. (2010). An ancient metasomatic source for the Walvis Ridge basalts. *Chemical Geology*, 273(3–4), 151–167. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.02.010>
- Santana-Casiano, J. M., González-Dávila, M., Fraile-Nuez, E., de Armas, D., González, A. G., Domínguez-Yanes, J. F., & Escánez, J. (2013). The natural ocean acidification and fertilization event caused by the submarine eruption of El Hierro. *Scientific Reports*, 3(1), 1140. <https://doi.org/10.1038/srep01140>
- Sawyer, G. M., Salerno, G. G., Le Blond, J. S., Martin, R. S., Spampinato, L., Roberts, T. J., ... Oppenheimer, C. (2011). Gas and aerosol emissions from Villarrica volcano, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 203(1–2), 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.04.003>
- Schowengerdt, R. A. (2012). *Remote sensing: Models and methods for image processing: Second edition. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing: Second Edition* (2nd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21902-7>
- Shi, W., & Wang, M. (2011). Satellite observations of environmental changes from the Tonga volcano eruption in the southern tropical Pacific. *International Journal of Remote Sensing*, 32(20), 5785–5796. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.507679>
- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S. R., Rymer, H., & Stix, J. (Eds.). (2015). *The Encyclopedia of Volcanoes* (2nd ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00175-7>
- Sivakumar, M. V. K., Roy, P. S., Harmsen, K., & Saha, S. K. (2004). Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology. *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Meteorology*, 1–427. Retrieved from [http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/gamp/documents/WMO\\_No134\\_en.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/gamp/documents/WMO_No134_en.pdf)
- Slonecker, E. T., Jones, D. K., & Pellerin, B. A. (2016). The new Landsat 8 potential for remote sensing of colored dissolved organic matter (CDOM). *Marine Pollution Bulletin*, 107(2), 518–527. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.02.076>
- Smith, I. E. M., & Price, R. C. (2006). The Tonga-Kermadec arc and Havre-Lau back-arc system: Their role in the development of tectonic and magmatic models for the western Pacific. *Journal*

## 10. Bibliografia

- of Volcanology and Geothermal Research*, 156(3–4), 315–331. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.03.006>
- Sousa, A. M. O., & Silva, J. R. M. (2011). *Fundamentos Teóricos de Detecção Remota*. Évora: Departamento de Engenharia Rural - Universidade de Évora.
- Spietz, R., Butterfield, D., Buck, N., Larson, B., Chadwick, W., Walker, S., ... Morris, R. (2018). Deep-Sea Volcanic Eruptions Create Unique Chemical and Biological Linkages Between the Subsurface Lithosphere and the Oceanic Hydrosphere. *Oceanography*, 31(1), 128–135. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.120>
- Sutcliffe, A., Catalão, J., & Brito, A. C. (2016). *Observação da Terra: uso de imagens SAR para a monitorização de águas costeiras e oceânicas*. (DGRM, Ed.). Lisboa, Portugal.
- Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., & Iwasaki, A. (2011). Characteristics of ASTER GDEM. In *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 3657–3660). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6050017>
- Tweed, F. S. (2012). “Now that the dust has settled...” the impacts of Icelandic volcanic eruptions. *Geology Today*, 28(6), 217–223. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2451.2012.00854.x>
- Urai, M. (2014). Time series analysis of discolored seawater reflectance observed by Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2 (AVNIR-2) at Fukutoku-Onokaba submarine volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 269, 23–27. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.11.006>
- Urai, M., & Machida, S. (2005). Discolored seawater detection using ASTER reflectance products: A case study of Satsuma-Iwojima, Japan. *Remote Sensing of Environment*, 99(1–2), 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.04.028>
- Urai, M., & Pieri, D. (2011). ASTER applications in volcanology. In *Remote Sensing and Digital Image Processing*. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6749-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6749-7_12)
- Vaughan, R. G., & Webley, P. W. (2010). Satellite observations of a surtseyan eruption: Hunga Ha’apai, Tonga. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 198(1–2), 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.08.017>
- Vithana, M. V. P., Xu, M., Zhao, X., Zhang, M., & Luo, Y. (2019). Geological and geophysical signatures of the East Pacific Rise 8°–10°N. *Solid Earth Sciences*, 4(2), 66–83. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2019.04.001>
- Volpe, G., Colella, S., Forneris, V., Tronconi, C., & Santoleri, R. (2012). The Mediterranean Ocean Colour Observing System &ndash; system development and product validation. *Ocean Science*, 8(5), 869–883. <https://doi.org/10.5194/os-8-869-2012>
- Volpe, G., Santoleri, R., Vellucci, V., Ribera d’Alcalà, M., Marullo, S., & D’Ortenzio, F. (2007). The colour of the Mediterranean Sea: Global versus regional bio-optical algorithms evaluation and implication for satellite chlorophyll estimates. *Remote Sensing of Environment*, 107(4), 625–638. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.10.017>
- Waters, C. L., Sims, K. W. W., Perfit, M. R., Blichert-Toft, J., & Blusztajn, J. (2011). Perspective on the Genesis of E-MORB from Chemical and Isotopic Heterogeneity at 9–10°N East Pacific Rise. *Journal of Petrology*, 52(3), 565–602. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq091>
- Waythomas, C. F., & Cameron, C. E. (2018). *Historical eruptions and hazards at Bogoslof volcano, Alaska: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018-5085*. Reston, VA. <https://doi.org/10.3133/sir20185085>
- Weekly, R. T., Wilcock, W. S. D., Hooft, E. E. E., Toomey, D. R., McGill, P. R., & Stakes, D. S. (2013). Termination of a 6 year ridge-spreading event observed using a seafloor seismic network on the Endeavour Segment, Juan de Fuca Ridge. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(5), 1375–1398. <https://doi.org/10.1002/ggge.20105>
- White, R., & McCausland, W. (2016). Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal*

*Research*, 309, 139–155. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.10.020>

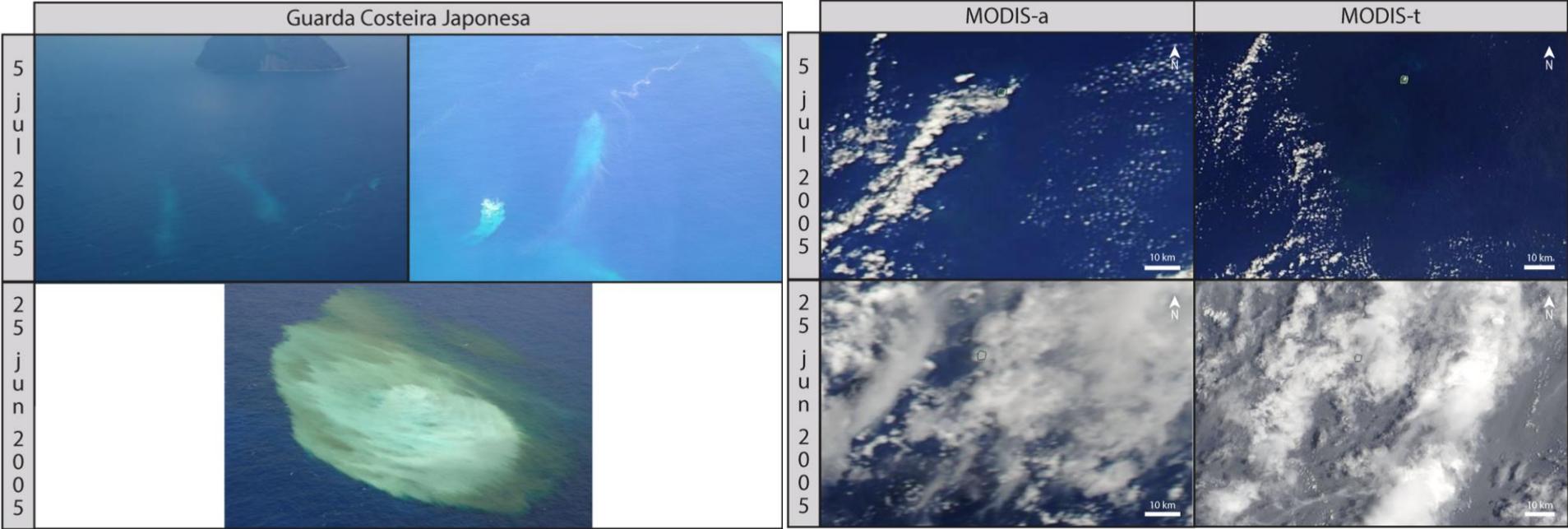
- Wright, R., Flynn, L. P., Garbeil, H., Harris, A. J. ., & Pilger, E. (2004). MODVOLC: near-real-time thermal monitoring of global volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135(1–2), 29–49. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2003.12.008>
- Xiong, X., Chiang, K., Sun, J., Barnes, W. L., Guenther, B., & Salomonson, V. V. (2009). NASA EOS Terra and Aqua MODIS on-orbit performance. *Advances in Space Research*, 43(3), 413–422. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.04.008>
- Xu, W., Ruch, J., & Jónsson, S. (2015). Birth of two volcanic islands in the southern Red Sea. *Nature Communications*, 6(1), 7104. <https://doi.org/10.1038/ncomms8104>
- Ye, L., Kanamori, H., Rivera, L., Lay, T., Zhou, Y., Sianipar, D., & Satake, K. (2020). The 22 December 2018 tsunami from flank collapse of Anak Krakatau volcano during eruption. *Science Advances*, 6(3), eaaz1377. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz1377>
- Zodiatis, G., Lardner, R., Solovyov, D., Panayidou, X., & De Dominicis, M. (2012). Predictions for oil slicks detected from satellite images using MyOcean forecasting data. *Ocean Science*, 8(6), 1105–1115. <https://doi.org/10.5194/os-8-1105-2012>

### Anexo 1 - Características dos Landsat 1, 7 e 8 (Adaptado de: Rocha 2002)

Landsat 1											
	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8	Banda 9	Banda 10	Banda 11
Canal	Visível (Azul - Verde)	Visível (Laranja-Vermelho)	Visível (Vermelho - IV prox)	Visível Verde	Visível vermelho	IV - prox	IV - prox				
$\lambda$	475 - 575 nm	580 - 680 nm	690 - 830 nm	0,5 - 0,6 $\mu\text{m}$	0,6 - 0,7 $\mu\text{m}$	0,7 - 0,8 $\mu\text{m}$	0,8 - 1,1 $\mu\text{m}$	-	-	-	-
Res. espacial	80 m	80 m	80 m	80 m	80 m	80 m	80 m				
Sensor	RBV			MSS							
Landsat 7											
Canal	Visível Azul	Visível Verde	Visível vermelho	IV - prox	IV - prox	Termal	IV - med	PAN			
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0,45 - 0,52	0,52 - 0,60	0,63 - 0,69	0,7 - 0,9	1,55 - 1,75	10,40 - 12,50	2,08 - 2,35	0,52 - 0,9	-	-	-
Res. espacial	30 m	30 m	30 m	30 m	30 m	60 m	30 m	15 m			
Sensor	ETM +										
Landsat 8											
Canal	Aerossóis costeiros	Visível Azul	Visível Verde	Visível vermelho	IV - prox	SWIR - 1	SWIR - 2	PAN	Cirrus	TIRS 1	TIRS 2
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0,43 - 0,45	0,450 - 0,51	0,53 - 0,59	0,64 - 0,67	0,85 - 0,88	1,57 - 1,65	2,11 - 2,29	0,5 - 0,68	1,36 - 1,38	10,6 - 11,19	11,5 - 12,51
Res. espacial	30 m	30 m	30 m	30 m	30 m	30 m	30 m	15 m	30 m	100 m	100 m
Sensor	OLI									TIRS	

Nota: IV prox – Infravermelhos próximos; IV med – Infravermelhos médios; PAN – Pancromática; SWIR – Infravermelhos de  $\lambda$  curto; TIRS – Infravermelho térmico

**Anexo 2 – Comparação de fotografias aéreas recolhidas pela Guarda Costeira Japonesa e imagens de cor real recolhidas pelo MODIS-Terra e MODIS-Aqua (EOSDIS Worlview), referentes ao Fukutoku-Oka-no-Ba**



*Nota: As fotografias aéreas recolhidas pela Guarda Costeira Japonesa e adquiridas no site não possuem escala.*

**Anexo 3 - Registo de deteção de plumas de descoloração no Fukutoku-Oka-no-Ba pelo EOSDIS WorldView e pela Guarda Costeira Japonesa**

Data	EOSDIS WorldView	Guarda Costeira Japonesa	Data	EOSDIS WorldView	Guarda Costeira Japonesa
05/nov/03	-	✓	18/dez/07	✓	✓
29/nov/03	✓	✓	19/dez/07	✓	✓
26/jan/04	-	✓	20/dez/07	✓	-
04/set/04	-	✓	24/dez/07	✓	-
21/set/04	-	✓	29/dez/07	✓	-
09/mar/05	✓	✓	02/jan/08	✓	-
03/jul/05	✓	✓	03/jan/08	✓	-
04/jul/05	✓	✓	08/jan/08	✓	-
05/jul/05	-	✓	15/jan/08	✓	-
06/jul/05	✓	-	19/jan/08	-	✓
07/jul/05	✓	-	20/jan/08	✓	-
11/set/05	-	✓	21/jan/08	✓	-
15/set/05	-	✓	23/jan/08	✓	-
03/out/05	-	✓	28/jan/08	✓	-
25/abr/06	-	✓	29/jan/08	✓	-
25/ago/06	-	✓	31/jan/08	-	✓
27/ago/06	✓	-	03/fev/08	✓	-
04/out/06	-	✓	12/jun/08	-	✓
23/jan/07	-	✓	25/jun/08	-	✓
25/jan/07	✓	-	27/jun/08	✓	-
27/jan/07	✓	-	03/fev/10	✓	✓
22/abr/07	✓	-	04/fev/10	✓	✓
24/abr/07	✓	✓	06/fev/10	✓	-
25/abr/07	-	✓	08/fev/10	✓	-
16/mai/07	-	✓	10/fev/10	✓	-
11/out/07	✓	✓	11/fev/10	✓	-
12/out/07	✓	-	12/fev/10	✓	-
13/out/07	✓	-	13/fev/10	✓	-
17/out/07	-	✓	12/abr/10	✓	-
26/out/07	-	✓	14/abr/10	-	✓
02/nov/07	✓	-	22/abr/10	✓	-
03/nov/07	✓	-	23/abr/10	✓	-
08/nov/07	✓	-	26/abr/10	✓	✓
04/dez/07	✓	✓	17/jun/10	-	✓
12/dez/07	✓	✓	11/jul/10	✓	-

**Continuação do anexo 3 - Registo de deteção de plumas de descoloração no Fukutoku-Oka-no-Ba pelo EOSDIS WorldView e pela Guarda Costeira Japonesa**

Data	EOSDIS WorldView	Guarda Costeira Japonesa	Data	EOSDIS WorldView	Guarda Costeira Japonesa
18/dez/10	-	✓	30/jan/12	-	✓
19/jan/11	-	✓	09/mar/12	-	✓
21/jan/11	✓	-	19/abr/12	-	✓
24/jan/11	✓	-	11/mai/12	-	✓
25/jan/11	✓	-	13/jun/12	✓	✓
27/jan/11	✓	-	15/jun/12	-	✓
03/fev/11	✓	-	11/nov/12	-	✓
04/fev/11	✓	-	22/jan/13	-	✓
08/fev/11	-	✓	27/jan/13	✓	-
12/abr/11	-	✓	30/jan/13	✓	-
27/jan/12	-	✓	08/mar/13	-	✓
28/jan/12	-	✓	26/mar/13	-	✓