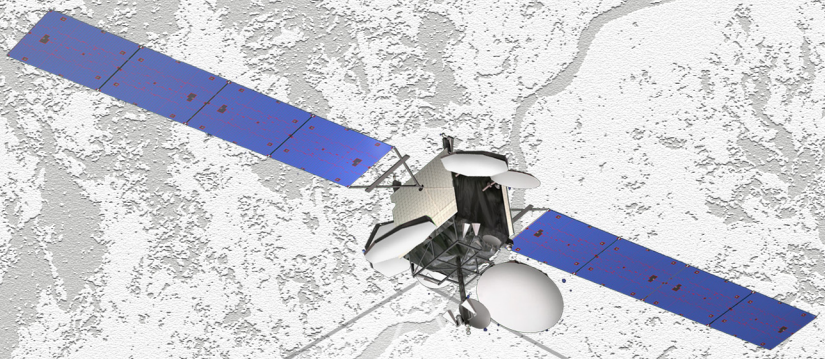
U.PORTO

Departamento de Geografia

Faculdade de Letras da Universidade do Porto

2009

Aplicação de técnicas de detecção remota para a identificação de lineamentos estruturais num sector do noroeste de Portugal e do sudoeste da Galiza



Ricardo Ferreira da Costa Pinho

Ricardo Ferreira da Costa Pinho

Aplicação de técnicas de detecção remota para a identificação de lineamentos estruturais num sector do noroeste de Portugal e do sudoeste da Galiza

Dissertação apresentada à
Faculdade de Letras do Porto
para a obtenção do grau de
Mestre em Sistemas de Informação
Geográfica e Ordenamento do Território

Departamento de Geografia
Faculdade de Letras da Universidade do Porto
2009

A viagem da descoberta consiste não em achar novas paisagens, mas em ver com novos olhos.

Marcel Proust

Agradecimentos

Ao longo destes últimos meses, durante os quais se idealizou, estruturou e elaborou o trabalho que agora se apresenta, muitos foram os contributos e sugestões que o vieram melhorar e valorizar.

É com grande satisfação e orgulho que passo a referir todos aqueles que me ajudaram e a quem devo, e quero, prestar o meu reconhecimento.

Ao Prof. Doutor António Alberto Gomes, pela orientação sábia, assídua e empenhada que sempre me prestou desde o momento inicial, pelo estímulo com que acompanhou o meu amadurecimento científico e pela amizade forjada já nos tempos da licenciatura.

Ao Prof. Doutor Augusto Pérez Alberti, co-orientador desta dissertação, pela ajuda, pelos ensinamentos sobre o relevo da Galiza, pelo incentivo à cooperação transfronteiriça, pela facilidade na obtenção dos dados da Galiza e pelo entusiasmo transmitido pela detecção remota.

À Prof.ª Doutora Laura Soares, pela leitura e pelas sugestões relativas às aplicações dos resultados obtidos.

À Prof.ª Doutora Carla Madureira, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por me ter sabido despertar o gosto pelo tema tratado e pela ajuda prestada, quer presencialmente, quer do outro lado do Atlântico.

À Prof.ª Doutora Teresa Sá Marques, que me criou as melhores condições de trabalho, no âmbito das suas funções de coordenadora do mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território.

Aos Mestres Ana Pires e José Teixeira e ao Prof. Doutor Hélder Chaminé, pelas conversas, pelos apoios e pela participação em congressos.

Ao Departamento de Geografia da FLUP, por encetar e proporcionar novas formações para os geógrafos.

À Agência Espacial Europeia (ESA), no âmbito dos projectos IMAGE2006 e HydroSOPT (ID 5750, LGF/FLUP-Labcarga/ISEP-GIXA/USC, 2008/10), por ter proporcionado dados vitais para a boa prossecução e desenvolvimento da presente dissertação.

Ao Tiago Pinho, pela ajuda na concepção gráfica da capa.

À minha tia, Prof.ª Conceição Bizarro, pela revisão do "Abstract".

A todos os meus familiares e amigos, pelo apoio incondicional que prestaram na elaboração deste trabalho.

Aos meus pais que, ansiosamente, aguardavam este momento. A eles dedico esta tese.

Resumo

O presente estudo incide na utilização combinada de dados espectrais de detecção remota espacial e de dados altimétricos para a identificação de lineamentos estruturais com potencial interesse geomorfológico numa área luso-galaica, a qual compreende um sector do noroeste de Portugal continental e um sector do sudoeste da Galiza, em Espanha.

As imagens dos satélites SPOT 4 e Landsat 7 assumiram um papel preponderante para a consecução do objectivo central deste trabalho. Para aperfeiçoar a interpretação visual dessas imagens, foi aplicado um conjunto de técnicas de processamento digital que ocuparam a maior parte do esforço desenvolvido ao longo deste trabalho. Desta forma, torna-se evidente que esta dissertação é o resultado da conjugação entre a metodologia e a aplicação prática, focando, no entanto, a sua maior atenção na investigação metodológica.

A dissertação divide-se em três partes fundamentais. Numa primeira parte, são apresentados os princípios e conceitos teóricos de detecção remota, em que se destacam, sobretudo, os processos de interacção entre a energia e a matéria que permitem aos sensores a bordo dos satélites "ler" a superfície terrestre, as características das bandas do espectro electromagnético mais utilizadas em detecção remota para fins diversos, bem como os diferentes tipos de resolução dos sensores, que condicionam fortemente o processo de interpretação das imagens espaciais.

Numa segunda parte, respeitante aos dados obtidos e à metodologia utilizada, são caracterizados dois sensores espaciais, a bordo dos satélites SPOT 4 e Landsat 7, cujos dados foram utilizados neste estudo. Esta caracterização pormenorizada, imprescindível à compreensão das técnicas utilizadas e dos resultados obtidos, engloba o modo de varrimento da superfície terrestre por parte dos sensores, as bandas espectrais em que operam, as características das suas órbitas e resoluções e os seus principais domínios de aplicação.

Seguidamente, são apresentadas as técnicas de processamento digital de imagens a que se recorreu para realçar o reconhecimento e a identificação de lineamentos estruturais e as composições coloridas elaboradas para a sua interpretação visual, bem como as suas potencialidades na consecução deste objectivo.

São expostos, posteriormente, os critérios definidos para a identificação de lineamentos estruturais a partir da interpretação visual das imagens seleccionadas, bem como a metodologia utilizada para a vectorização destes elementos lineares e sua incorporação em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e para a análise das principais orientações e da distribuição espacial.

Esta foi a etapa mais morosa, visto que, neste estudo, de carácter essencialmente metodológico, a não existência de técnicas *standard* para realçar visualmente as imagens implicou a necessidade de vários testes e experimentações com vista à obtenção dos melhores resultados. As considerações pormenorizadas sobre os critérios de identificação de lineamentos visaram atribuir maior objectividade a este processo.

Numa terceira parte, é apresentado o culminar deste trabalho – mapa de lineamentos estruturais – e é feita uma breve incursão por algumas aplicações possíveis que os resultados obtidos possibilitam, como a análise geomorfológica, que é possível obter com a interpretação de lineamentos a partir da análise de imagens de satélite e de dados altimétricos, e a relação entre a posição dos lineamentos e a localização das nascentes minerais e termais.

Abstract

The present study is about the combined utilization of remote sensing spectral data and altimetry data to identify structural lineaments of potential geomorphological interest in an area that comprises a sector of northwest inland Portugal and a sector of southwest of Galicia, Spain.

SPOT 4 and Landsat 7 remote sensed images assumed a preponderant role to achieve the central goal of this study. In order to improve the visual interpretation of these images, several image enhancement techniques were applied, that took most of the effort developed along this work. In this way, it is evident that this dissertation is the result of the combination between methodology and practical application, having, however, predominance on the methodological investigation.

This thesis is divided into three main parts. The first part deals with the concepts and foundations of remote sensing, in which are highlighted the interaction processes between energy and matter that allow the sensors aboard satellites “read” the land surface, the characteristics of the spectral bands which are mainly used in remote sensing for different aims, as well as the different types of sensors resolutions, which strongly affect spatial images interpretation process.

In the second part, concerning the obtained data and the used methodology, there is the characterization of two spatial sensors, aboard satellites SPOT 4 and Landsat 7, whose data were used in this study. This thorough characterization, which is of outmost importance to understand the used techniques and the obtained results, shows the way these sensors scan the earth surface, the spectral bands in which they operate, the characteristics of their orbits and resolutions and the main appliance domains.

Next are shown the digital image processing techniques which were applied to enhance the recognition and the identification of structural lineaments and the color combination images produced to its visual interpretation, as well as their potentialities to achieve this goal.

The defined criteria to identify structural lineaments from the visual interpretation of selected images, as well as the used methodology to sketch these linear elements and its incorporation in GIS (Geographic Information Systems) environment and also to analyse their main directions and spatial distribution are displayed next.

This stage took a lot of time because, in this study, essentially methodological, the non-existing standard techniques to improve the images implied the need of various experiments and tests to obtain the best results. The detailed considerations about the identification criteria of structural lineaments had aimed a major objectivity to this process.

In the third part, it is presented the nuclear goal of this essay – the map of structural lineaments – and it is shown a short incursion through some possible applications, such as the geomorphologic analysis, which is made possible by the interpretation of lineaments from satellite images and altimetry data, as well as the relation between the lineaments position and the localization of thermal and mineral springs.

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos iii

Resumo v

Abstract vii

ÍNDICE GERAL ix

ÍNDICE DE FIGURAS xi

ÍNDICE DE QUADROS xiv

I. INTRODUÇÃO GERAL 1

I. 1 Objectivos 3

I. 2 Estado da arte 5

I. 3 A área de estudo 7

II. A DETECÇÃO REMOTA: PRINCÍPIOS E CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS 9

II. 1 A radiação electromagnética e interacção energia- matéria 11

II. 2 Os tipos de resolução dos sensores 18

III. MATERIAIS E MÉTODOS 23

III. 1 Dados de detecção remota 25

III. 1. 1 A missão Landsat e o sensor ETM+: características gerais 25

III. 1. 2 A missão SPOT e o sensor HRVIR: características gerais 28

III. 1. 3 Dados espectrais utilizados 30

III. 2 Dados altimétricos e construção do Modelo Digital de Terreno 34

III. 3 Processamento digital das imagens de satélite 36

III. 3. 1 Melhoria da qualidade visual dos dados espectrais 37

III. 3. 2 Composições coloridas RGB e seu contributo para a identificação de lineamentos estruturais 43

III. 4 Detecção e identificação de lineamentos estruturais: critérios 51
III. 4. 1 O conceito de lineamento estrutural 51
III. 4. 2 Critérios de identificação 53
III. 5 Marcação e análise de lineamentos: metodologias 56
III. 5. 1 Vectorização e incorporação em ambiente SIG 56
III. 5. 2 Análise de orientações e distribuição espacial 57
IV. RESULTADOS E APLICAÇÕES 83
IV. 1 O mapa de lineamentos estruturais 85
IV. 1. 1 Análise de orientações e distribuição espacial 85
IV. 2 Análise geomorfológica 87
IV. 2. 1 Principais unidades de relevo 87
IV. 2. 2 Expressão geomorfológica dos lineamentos e das nascentes minerais 89
V. CONCLUSÕES 109
VI. BIBLIOGRAFIA 115
ANEXOS 121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1 – Localização da área de estudo..... 8

Figura II.1 – Formas de detecção remota: (1) Reflexão; (2) Emissão-Reflexão; (3) Emissão. Adaptado de Salinero (2007). 20

Figura II.2 – Esquema de uma onda electromagnética. E: campo eléctrico; M: campo magnético; C: velocidade da luz. Adaptado de Lillesand *et al.* (2003)..... 20

Figura II.3 – Espectro electromagnético da radiação solar (adaptado de Sabins, 1997 e Brum da Silveira, 2002). O domínio óptico (regiões do visível e do infravermelho) está representado de forma expandida na Figura II.4. 21

Figura II.4 – Diagrama expandido do domínio óptico do espectro electromagnético (regiões do visível e do infravermelho). Nesta figura, estão representadas as janelas atmosféricas, as bandas de absorção, os gases atmosféricos responsáveis pela absorção da energia electromagnética e os intervalos de comprimento de onda (bandas) usados pelos sistemas de detecção remota utilizados neste estudo (adaptado de Sabins, 1997 e Brum da Silveira, 2002). 21

Figura II.5 – Processos fundamentais de interacção entre a energia electromagnética e a superfície terrestre. Adaptado de Lillesand *et al.* (2003)..... 22

Figura II.6 – Tipos de reflexão da radiação electromagnética (Fonseca e Fernandes, 2004). 22

Figura III.1 – 1: Modo de varrimento da superfície terrestre do sensor ETM+ (varrimento mecânico) (adaptado de Sabins, 1997); 2: Área de varrimento do sensor ETM+; 3: Características da órbita do sensor ETM+ (adaptado de Lillesand *et al.*, 2003); 4: Aspecto do Landsat 7 (http://nasascience.nasa.gov/)..... 61

Figura III.2 – 1: Modo de varrimento da superfície terrestre do sensor HRVIR (matriz linear) (adaptado de Sabins, 1997); 2: Área de varrimento dos sensores gémeos HRVIR (visão nadiral) (adaptado de: www.physics.nus.edu.sg/); 3: Características da órbita do sensor HRVIR (adaptado de Lillesand *et al.*, 2003); 4: Aspecto do SPOT 4 (http://ceos.cnes.fr). 62

Figura III.3 - Intervalos espectrais das bandas dos sensores utilizados e curvas de reflectância espectral da água, da vegetação e do solo (adaptado de Fonseca e Fernandes, 2004). 63

Figura III.4 – Resoluções espacial e espectral dos sensores ETM+ e HRVIR (adaptado de Jensen, 2000). 63

Figura III.5 – Enquadramento e localização das cenas ETM+ e HRVIR utilizadas..... 64

Figura III.6 – 1: Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo (formato matricial); 2: Mapa de sombreado da área de estudo, obtido por aplicação de "efeito sombra" ao MDE (sobreelevação vertical de 5x). 65

Figura III.7 – 1: Imagem bruta da banda 4 (infravermelho próximo) do sensor ETM+; 2 – Imagem da banda 4 (sensor ETM+) com expansão linear do contraste tonal e com 1% de saturação; 3 - Histograma original da banda 4 do sensor ETM+ (a cinzento) e novo histograma obtido por expansão linear (a preto). 67

Figura III.8 – 1: Composição colorida 4-3-2 RGB (sensor HRVIR) de um extracto da área de estudo; 2 – Matriz móvel de coeficientes de filtragem de 3x3 utilizada no filtro de realce de contornos; 3 - Composição colorida 4-3-2 RGB (sensor HRVIR) de um extracto da área de estudo com aplicação de filtro de realce de contornos não direccional. 68

Figura III.9 – Exemplos de lineamentos (1, 2 e 3) identificados num excerto da área de estudo e comparação entre a informação espectral proporcionada pela fotografia aérea (A) (fonte: Ortofotos, escala 1/5000, IGP, 2005) e pela imagem de satélite (B) (composição colorida 4-3-2 RGB (sensor HRVIR))..... 69

Figura III.10 – Composições coloridas RGB de extractos da área de estudo, com aplicação de filtro de realce de contornos não direccional (sensor ETM+) – 1: 5-7-3 RGB; 2: 5-4-3 RGB; 3:7-4-1 RGB; 4: 7-5-4 RGB..... 71

Figura III.11 – Composição colorida 7-5-1 RGB de um extracto da área de estudo, com aplicação de um filtro de realce de contornos não direccional (sensor ETM+)..... 73

Figura III.12 – Composições coloridas RGB de extractos da área de estudo, com aplicação de filtro de realce de contornos não direccional (sensor HRVIR) – 1: 4-3-2 RGB; 2: 4-2-1 RGB; 3:3-2-1 RGB; 4: 4-3-1 RGB. 75

Figura III.13 – Exemplos de identificação de lineamentos em vários sectores da área de estudo, segundo os critérios definidos e respectiva simbologia utilizada no Quadro 3..... 79

Figura III.14 – Exemplos de vectorização de lineamentos (1: composição colorida 4-3-2 RGB, sensor HRVIR; 2: composição colorida 4-3-2 RGB, sensor ETM+; 3: mapa sombreado do MDE) e esquema metodológico seguido neste processo (4). 81

Figura IV.1 – Mapas de lineamentos estruturais obtidos através de dados espectrais e de dados altimétricos. 95

Figura IV.2 – 1: Mapa de lineamentos estruturais; 2: Orientação dos lineamentos. 97

Figura IV.3 – 1: Mapa de lineamentos estruturais; 2: Mapa de densidade dos lineamentos estruturais (tamanho de célula de 20 m e raio de 4000 m); 3: Mapa hipsométrico sobreposto ao modelo digital de elevação sombreado (5x de grau de sobreelevação)..... 99

Figura IV.4 – 1: Lineamentos filtrados pela direcção N0 a N45 (tamanho de célula de 20 m e raio de 2500 m); 2: Lineamentos filtrados pela direcção N45 a N90 (tamanho de célula de 20 m e raio de 2500 m); 3: Lineamentos filtrados pela direcção N90 a N135 (tamanho de célula de 20 m e raio de 2500 m); 4: Lineamentos filtrados pela direcção N135 a N180 (tamanho de célula de 20 m e raio de 2500 m); 5: Densidade dos lineamentos filtrados pela direcção N0 a N45 (tamanho de célula de 20 m e raio de 2500 m); 6: Densidade dos lineamentos filtrados pela direcção N45 a N90; 7: Densidade dos lineamentos filtrados pela direcção N90 a N135; 8: Densidade dos lineamentos filtrados pela direcção N135 a N180; 9: Mapa hipsométrico sobreposto ao modelo digital de elevação sombreado (5x de grau de sobreelevação). 101

Figura IV.5 – Perfis topográficos realizados (sobreelevação vertical de 5x) e localização na área em estudo. 103

Figura IV.6 – 1: Mapa hipsométrico sobreposto ao modelo digital de elevação sombreado (5x de grau de sobreelevação); 2: Mapa geológico da área em estudo (fonte: Carta Geológica de Portugal, 1:500 000, SGP, Lisboa, 1992). 105

Figura IV.7 – Localização topográfica das nascentes minerais. 106

Figura IV.8 – Relação entre nascentes minerais e o tipo de litologia. 106

Figura IV.9 – Relação entre a posição dos lineamentos estruturais e a localização das nascentes minerais. 107

Nota: As figuras e os quadros, em vez de se encontrarem ao longo do texto, foram agrupados no final de cada capítulo.

ÍNDICE DE QUADROS

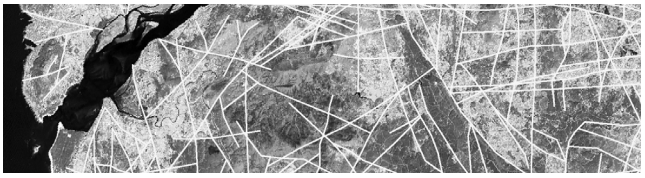
Quadro 1 – Características gerais dos sensores utilizados (fonte: http://landsat.usgs.gov/ e www.spotimage.com). 59

Quadro 2 – Características das bandas espectrais do sensor ETM+ (Landsat 7), aplicações genéricas (com base em Sabins, 1997; Sausen, 1997; e Salinero, 2007) e respectiva correspondência com as bandas espectrais do HRVIR (SPOT 4). 60

Quadro 3 – Síntese dos critérios utilizados na identificação dos lineamentos estruturais na área de estudo..... 77

Quadro 4 – Reconhecimento dos critérios utilizados na identificação dos lineamentos presentes na Figura III.13. 79

Quadro 5 – Número de segmentos de lineamentos estruturais obtidos a partir dos dados espectrais e altimétricos e respectivo peso no número total de segmentos. 112



I. INTRODUÇÃO GERAL

I. 1 Objectivos

A presente dissertação tem como objectivo principal a identificação de lineamentos com potencial interesse geomorfológico numa área luso-galaica, que compreende um sector do noroeste de Portugal continental e um sector do sudoeste da Galiza, em Espanha. A identificação dessas estruturas lineares, rectilíneas ou ligeiramente curvilíneas, realizou-se através da interpretação de dados digitais de detecção remota espacial, adquiridos pelo sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), do satélite Landsat, série 7, e pelo sensor HRVIR (*High Resolution InfraRed*), do satélite SPOT, série 4.

A consecução deste objectivo consubstanciou-se, igualmente, no recurso a dados altimétricos, que serviram de base à construção do modelo digital de terreno, representação espacial que realça os aspectos geomorfológicos da área e, portanto, extremamente útil para a detecção e reconhecimento dessas estruturas lineares.

Tradicionalmente, o levantamento deste tipo de estruturas geológicas no terreno era apenas feito através de longos períodos de trabalho de campo dispendioso e penoso, por vezes em terrenos de difícil acesso e com más condições de observação.

A utilização combinada de dados altimétricos e espectrais visa contribuir para um conhecimento mais profundo e pormenorizado dos aspectos estruturais das unidades geológicas e da dinâmica geomorfológica regional. Por essa razão, constitui a metodologia mais adequada no apoio à cartografia geológica e geomorfológica (Rabaça *et al.*, 2004).

No que respeita à informação espectral proporcionada, as imagens de satélite superam, largamente, as fotografias aéreas, uma vez que estas registam apenas informação numa parte muito restrita do espectro electromagnético (domínio do visível), concentrada numa única banda (banda monoespectral, denominada pancromática).

O recurso à informação digital adquirida pelos sensores multiespectrais (como é o caso do ETM+ e do HRVIR) afigura-se, na identificação de lineamentos estruturais, extremamente vantajoso, na medida em que é possível identificar, através da banda espectral ou de imagens compósitas adequadas, variações no comportamento espectral dos corpos geológicos em diversas faixas específicas do espectro electromagnético, que permitem realçar e identificar vários aspectos da sua estrutura (Brum da Silveira, 2002).

Numa fotografia aérea ou numa imagem de satélite, os lineamentos podem ser reconhecidos visualmente por identificação de elementos lineares, que se distinguem, por exemplo, através de diferenças na tonalidade, cor, contraste, variações de textura ou de padrões pictóricos de áreas, relacionados, entre outros, com a diversidade na vegetação, teor de humidade, tipo de substrato rochoso ou composição dos solos (Brum da Silveira, 2002). Estes foram alguns dos critérios definidos para a identificação de lineamentos na área de estudo.

Neste trabalho, essencialmente de carácter metodológico, a interpretação das imagens de satélite visa, portanto, obter informação geológica estrutural adicional, através da aplicação de técnicas de processamento digital de dados obtidos no domínio óptico do espectro electromagnético (visível e infra-vermelho).

Essas técnicas consistiram na melhoria do contraste tonal por expansão linear do histograma (Sabins, 1997; Mather, 2006; Salinero, 2007) e na aplicação de uma técnica digital automática de detecção de elementos lineares – filtro espacial de realce de contornos não direccional (Richards & Jia, 2006; Salinero, 2007) – para cada uma das bandas dos sensores ETM+ e HRVIR usadas nas composições coloridas RGB.

Foram elaboradas sete imagens compósitas (composições coloridas RGB) para a identificação de lineamentos (quatro, no caso do sensor ETM+, e três, no caso do sensor HRVIR) e foram avaliadas as suas potencialidades na prossecução deste objectivo essencial.

A identificação deste tipo de estruturas geológicas culminou na elaboração de cartografia de lineamentos e na identificação das suas direcções principais, proveitosa para futuros estudos, nomeadamente os que se relacionam com a expressão geomorfológica destes elementos lineares e com os sistemas de fracturação regional da área.

O mapeamento das nascentes minerais e termais na área de estudo permitiu estabelecer relações entre a localização dos lineamentos estruturais e a localização destas emergências de águas subterrâneas.

I. 2 Estado da arte

A detecção remota espacial tem registado grandes avanços e tem apoiado fortemente a aquisição de dados em trabalho de campo. As suas aplicações são múltiplas e, nos últimos anos, as técnicas de detecção remota têm sido amplamente utilizadas no domínio das Geociências, incluindo várias áreas da Geomorfologia e da Geologia, como a Cartografia Litológica e Estrutural (Sabins, 1997; Brum da Silveira, 2002; Rabaça *et al.*, 2004; Silva *et al.*, 2006).

Contudo, a análise e interpretação de dados adquiridos por sensores a bordo de plataformas aéreas, como as fotografias aéreas, continua a ser a metodologia mais utilizada para esses fins. O recurso a dados de detecção remota espacial, como as imagens de satélite, tem tido um papel de menor relevo neste contexto.

Na verdade, como assinala BRUM DA SILVEIRA (2002), apesar do entusiasmo crescente pelas novas tecnologias, a análise e interpretação de fotografia aérea continua a ser um dos métodos mais seguidos, sendo utilizado, quer em estudos prévios (preparação das campanhas de campo), quer nos reconhecimentos de terreno.

Face às fotografias aéreas, as imagens de satélite possuem vantagens indiscutíveis, que serão apresentadas com pormenor ao longo desta dissertação. Podem já apontar-se, sucintamente, as mais relevantes no contexto do objectivo essencial que preside a este estudo: proporcionam uma visão global e total da área de estudo e permitem diferenciar melhor as estruturas geológicas e geomorfológicas à distância, uma vez que permitem trabalhar, simultaneamente, com várias bandas espectrais e não apenas com o domínio do visível, como sucede com as fotografias aéreas.

Por conseguinte, as metodologias e as técnicas consubstanciadas em dados de detecção remota espacial estão a começar a revolucionar as metodologias em que os geomorfólogos conduzem os seus trabalhos de campo, e provaram ser técnicas indispensáveis para melhorar o processo de cartografia geomorfológica (Lillesand *et al.*, 2003).

A cartografia de lineamentos estruturais tem sido, no âmbito da cartografia geológica, a mais frequente aplicação da análise visual a partir de imagens espaciais (Salinero, 2007). Em Portugal, estudos desta índole têm sido igualmente realizados, quer para enfatizar contactos

litológicos (Rabaça *et al.*, 2004; Silva *et al.*, 2006), quer com o objectivo essencial de identificar lineamentos tectónicos (Marques *et al.*, 2001; Brum da Silveira, 2002; Silva *et al.*, 2006).

A identificação de lineamentos estruturais por técnicas de detecção remota (fotografia aérea e imagem de satélite) tem sido um método de investigação bastante utilizado em estudos de Neotectónica e de Cartografia Estrutural, nomeadamente, no reconhecimento dos sistemas de fracturação regional, incluindo falhas, fendas de tracção e diáclases (Brum da Silveira & Ribeiro, 1999, *cit.* por Brum da Silveira, 2002).

As metodologias utilizadas nestes estudos de detecção remota de estruturas geológicas, bem como os resultados alcançados, têm sido, de uma forma geral, semelhantes (Marques *et al.*, 2001; Brum da Silveira, 2002; Rabaça *et al.*, 2004; Silva *et al.*, 2006).

No entanto, para estes estudos, os dados espaciais utilizados baseiam-se quase exclusivamente em imagens Landsat TM[1] ou ETM+. Apesar de o sistema Landsat ser considerado o projecto mais frutífero de detecção remota para fins civis (Salinero, 2007), e de alguns dados serem disponibilizados gratuitamente, a resolução espacial das suas imagens (30 m) impossibilita a sua utilização em escalas de análise mais pormenorizadas. Por esta razão, a identificação de lineamentos estruturais na área de estudo foi também realizada a partir de outros dados espaciais, do SPOT 4, que, tal como se discute posteriormente, para além de possuírem maior precisão geométrica (permitindo uma maior exactidão na detecção e marcação destas estruturas lineares), permitem trabalhar com escalas de análise maiores. A conjugação de dados do SPOT 4 e do Landsat 7 para este propósito é, assim, testada pela primeira vez nesta área.

Ao contrário do que sucede com as metodologias, as técnicas de processamento digital das imagens usadas em estudos desta índole diferem em função dos objectivos que se pretende alcançar, das características da área de trabalho e até das preferências pessoais dos intérpretes. Não é possível, pois, afirmar que estejam verdadeiramente consolidadas, ou que há um conjunto de técnicas *standard* a serem seguidas para uma determinada área.

[1] TM é a sigla utilizada para designar o sensor *Thematic Mapper*, colocado a bordo dos satélites Landsat 4 e 5.

I. 3 A área de estudo

A área de estudo seleccionada para esta dissertação corresponde a uma área luso-galaica, que compreende um sector do noroeste de Portugal continental e um sector do sudoeste da Galiza, em Espanha.

Constitui um polígono quadrangular, com uma área de aproximadamente 3600 km^2 (60 km x 60 km) e situa-se a uma latitude compreendida entre os 41^o 41' e os 42^o 20' N e a uma longitude entre os 8^o 17' e os 9^o11' O (cf. Figura I.1).

Corresponde à área abrangida pela cena SPOT (sensor HRVIR) utilizada neste trabalho (cf. Figura III.5), cedida pela Agência Espacial Europeia, por aprovação da candidatura ao projecto IMAGE2006 (caracterizado no subcapítulo III.1.3).

Este estudo possui, como se disse anteriormente, um carácter essencialmente metodológico, pois procuram-se avaliar as potencialidades da detecção remota espacial na identificação de lineamentos estruturais. Como os dados espectrais espaciais utilizados eram provenientes de sensores a bordo de satélites diferentes e como a área da cena Landsat 7 era mais de oito vezes maior que a da cena SPOT 4, decidiu-se escolher, como objecto de estudo, uma área em que fosse possível utilizar conjuntamente esses dados. Deste modo, seleccionou-se a área da cena SPOT 4, para a qual também era possível utilizar dados do Landsat 7.

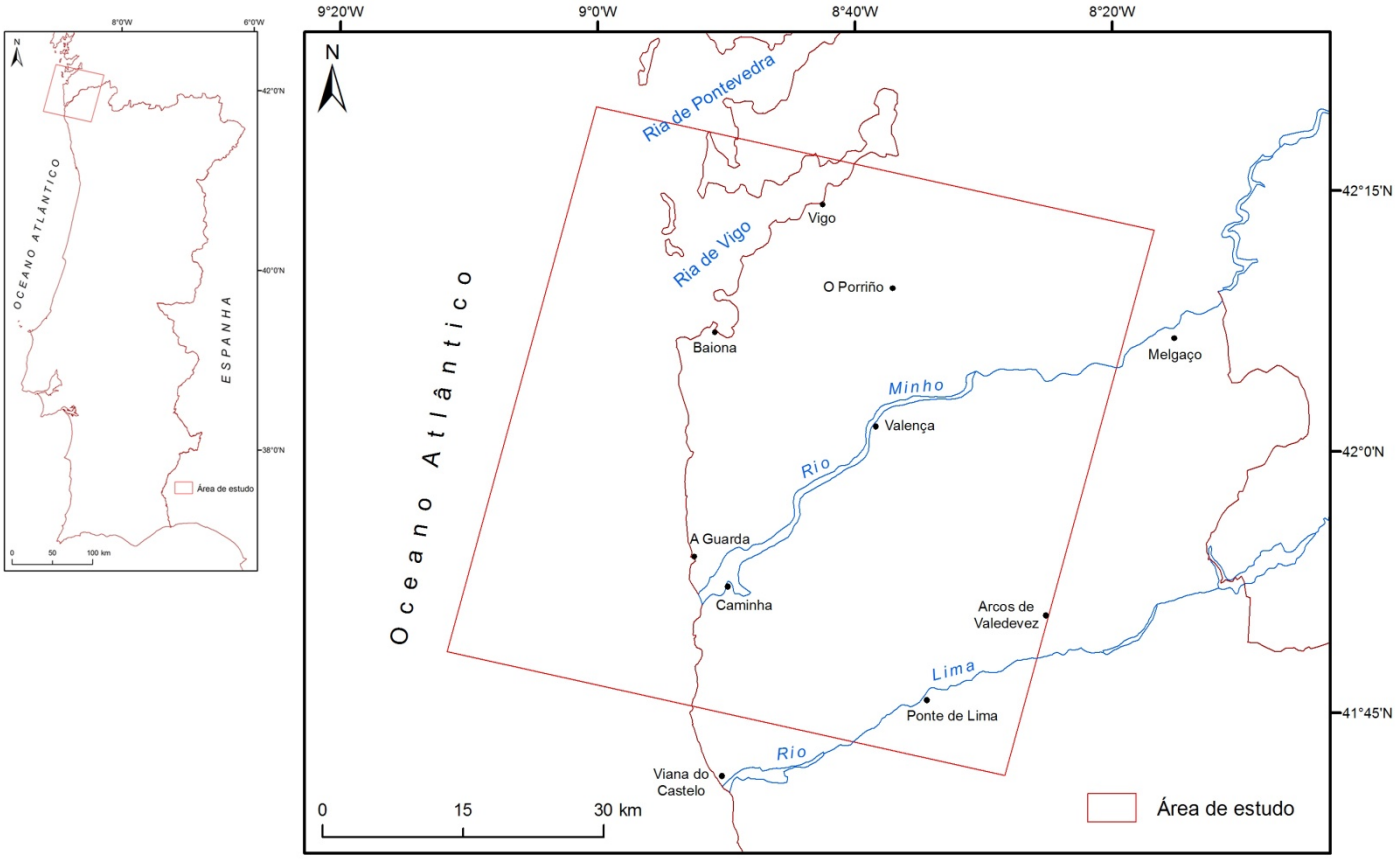
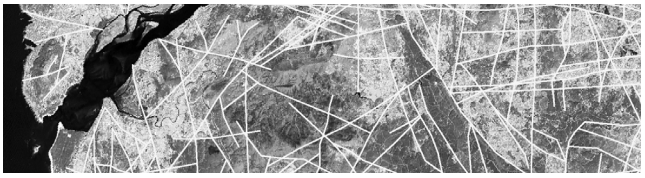


Figura I.1 – Localização da área de estudo.



II. A DETECÇÃO REMOTA: PRINCÍPIOS E CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS

II. 1 A radiação electromagnética e interacção energia-matéria

A detecção remota é a ciência e a arte que procura obter informação sobre um objecto, área ou fenómeno, através da análise de dados adquiridos por um sensor que não está em contacto com esse objecto, área ou fenómeno (Lillesand *et al.*, 2003). Esse sensor mede a interacção entre a matéria e a energia electromagnética – é precisamente essa interacção que permite identificar as características da matéria – e pode estar colocado em três grandes tipos de plataformas: espaciais, aéreas ou terrestres.

Numa perspectiva mais ampla, podemos afirmar que, para além da aquisição de dados, a detecção remota engloba também o seu processamento e interpretação (Sabins, 1997). A tarefa de processamento engloba o conjunto de técnicas que transformam os dados em bruto em imagens. A fase de interpretação, talvez a mais importante, consiste em converter uma imagem em informação significativa e útil para aplicações diversas.

No processo de aquisição de imagens em detecção remota, é imprescindível uma fonte de radiação. O Sol representa a fonte inicial de energia electromagnética medida pela maior parte dos sistemas de detecção remota. No caso dos sensores passivos, estes limitam-se a medir a radiação naturalmente disponível: a radiação do Sol reflectida pela superfície e pela atmosfera e/ou a radiação térmica emitida pela Terra (situações 1 e 3 da Figura II.1). Assim, estes sensores não emitem radiação. Por sua vez, os sensores activos possuem a sua própria fonte de energia ou iluminação, que emitem em direcção à superfície terrestre, medindo o eco ou retorno dessa energia resultante da interacção com a atmosfera e com a superfície da Terra (situações 2 e 3 da Figura II.1).

A radiação electromagnética proveniente do Sol é composta por ondas electromagnéticas que se propagam no vácuo a uma velocidade constante, de aproximadamente 300000 km/s. Estas ondas electromagnéticas diferenciam-se pelo seu comprimento de onda (λ), definido como a distância entre duas cristas consecutivas (cf. Figura II.2). Ao conjunto das radiações electromagnéticas emitidas pelo Sol, de diversos comprimentos de onda, chamamos espectro electromagnético (cf. Figura II.3).

A Figura II.3 permite identificar a existência de diferentes faixas no espectro electromagnético, designadas por bandas espectrais.

As radiações ultravioleta (UV) constituem os comprimentos de onda mais curtos passíveis de ser usados em detecção remota (3 nm – 0,4 μm)[2]. Os sensores actuais não possuem bandas nesta zona do espectro (Sabins, 1997).

A parte visível do espectro, a que vulgarmente chamamos luz, constitui uma parte muito restrita de todo o espectro electromagnético, que é detectável pelos nossos olhos (cf. Figura II.3 e Figura II.4). O espectro visível é formado por várias bandas de cores, que vão desde o violeta até ao vermelho, embora as principais sejam o azul (0,4 – 0,5 μm), o verde (0,5 – 0,6 μm) e o vermelho (0,6 – 0,7 μm).

A radiação infravermelha (IV) possui comprimentos de onda entre 0,7 e 100 μm e corresponde ao conjunto de radiações compreendidas entre as bandas do visível e a banda das microondas. Para a detecção remota, as principais regiões do infravermelho são o IV próximo (0,7 – 1,3 μm), o IV médio (1,3 – 3 μm), que constituem o IV reflectido, e o IV térmico (3 – 14 μm) – Figura II.4.

A radiação com comprimentos de onda compreendidos entre os 0,3 e os 14 μm constitui o domínio ou espectro óptico (inclui uma fracção do UV, o visível, o IV próximo, o IV médio e o IV térmico). É designado por espectro óptico porque as lentes e espelhos dos sistemas sensores podem ser usadas para refractar e reflectir a energia nesse intervalo de comprimento de onda (Lillesand *et al.*, 2003).

Em detecção remota, é mais difícil detectar radiação nos comprimentos de onda maiores, pois a energia é menor. As bandas do espectro electromagnético de maior interesse para esta ciência são a banda do visível (0,4 – 0,7 μm), a do infravermelho reflectido (0,7 – 3 μm), a do infravermelho térmico (3 – 14 μm) e a radiação electromagnética na banda das microondas (1mm – 1m) (Richards & Jia, 2006).

Independentemente da fonte de emissão (própria, no caso dos sensores activos do tipo laser ou radar, ou solar, no caso dos sensores passivos), toda a radiação detectada pelos sensores de detecção remota atravessa uma camada de atmosfera até atingir o alvo e retorna

[2] 1 nm (nanómetro) corresponde a 10^{-9} m. 1 μm (micrómetro) corresponde a 10^{-6} m (0,000001 m).

aos sensores interagindo novamente com a atmosfera. Este fenómeno é designado por interacção da radiação electromagnética com a atmosfera (Fonseca & Fernandes, 2004).

Nem toda a radiação solar emitida atinge a superfície terrestre, sofrendo um conjunto de acidentes de propagação: absorção, dispersão e refracção (Mather, 2006). A refracção ocorre quando a radiação atravessa camadas da atmosfera de diferentes densidades. A dispersão é originada pela interacção de partículas existentes na atmosfera (moléculas de gases, gotículas de água das nuvens, aerossóis, cristais de gelo das nuvens, etc.) com a radiação, tendo como efeito uma alteração da trajectória da radiação incidente, de forma difusa. A absorção corresponde ao processo em que a energia electromagnética é convertida noutra forma de energia mais pobre: o calor. Os principais elementos da atmosfera que contribuem para este processo de absorção são o vapor de água, o dióxido de carbono, o ozono e o oxigénio.

A dispersão resulta de múltiplas interacções entre a radiação e os gases e partículas da atmosfera. Há dois principais processos de dispersão, relacionados com o tamanho das partículas da atmosfera. Na dispersão selectiva, os pequenos comprimentos de onda da radiação ultravioleta e da luz azul são dispersos mais severamente que os longos comprimentos de onda da radiação infravermelha. Este tipo de dispersão é causado por fumos e por gases como o azoto, o oxigénio e o dióxido de carbono. Na dispersão não selectiva, causada por poeiras em suspensão, nuvens e nevoeiro, todos os comprimentos de onda da luz são dispersos de igual modo (Sabins, 1997; Salinero, 2007).

A dispersão atmosférica produz uma fonte de iluminação extra para o sensor, mas não contém informação adicional sobre a superfície terrestre. De facto, ao acrescentar radiação reflectida pelos gases e partículas da atmosfera («luz atmosférica»), implica uma redução da radiação directa e um aumento da radiação difusa (Salinero, 2007). Assim, é responsável por reduzir o contraste da imagem detectada (isto é, reduz a diferença entre as áreas mais escuras e mais claras da imagem, produzindo uma atenuação da imagem), pois, ao criar um “efeito neblina”, reduz a resolução espacial da imagem, degradando-a.

Quanto menor for o comprimento de onda da radiação electromagnética, maior é o efeito de dispersão atmosférica. A atmosfera dispersa comprimentos de onda do ultravioleta e da luz azul duas vezes mais forte que a luz vermelha (Sabins, 1997). É por essa razão que o domínio do ultravioleta raramente é utilizado em detecção remota, tal como foi referido anteriormente.

Assim, no caso do sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), do satélite Landsat 7, caracterizado no subcapítulo III.1.1 e utilizado neste estudo, a dispersão atmosférica é mais severa na banda 1 (cf. Figura II.4), que corresponde a comprimentos de onda menores, e menos significativa na banda 7, associada a comprimentos de onda maiores. Aliás, considera-se até que a banda 7 é, basicamente, livre de dispersão atmosférica (Sabins, 1997). No caso do sensor *High Resolution InfraRed* (HRVIR), do satélite SPOT 4, também utilizado neste estudo, e caracterizado no subcapítulo III.1.2, uma imagem captada na banda 1 terá uma dispersão atmosférica muito menor que uma imagem colhida na banda 4 (cf. Figura II.4).

O fenómeno de absorção atmosférica faz com que uma parte da energia reflectida ou emitida pelos diferentes alvos da superfície terrestre não atinja os sensores (Fonseca & Fernandes, 2004). Os gases presentes na atmosfera, especialmente o vapor de água (H_2O) e o dióxido de carbono (CO_2), absorvem energia electromagnética em intervalos de comprimento de onda específicos, denominados bandas de absorção (cf. Figura II.4).

As regiões do espectro electromagnético em que a absorção atmosférica é baixa, ou seja, em que a transmissividade da atmosfera é elevada, são designadas por janelas atmosféricas (Sabins, 1997) (cf. Figura II.4). Estas são as zonas do espectro que podem ser utilizadas em detecção remota, quando se pretende estudar a superfície terrestre, visto que é nestas áreas do espectro que a capacidade de as ondas electromagnéticas atravessarem a atmosfera sem perdas energéticas significativas é alta.

A localização das bandas dos sensores multiespectrais, que adquirem informação em vários intervalos, muito estreitos, do espectro (daí a denominação multiespectral), está, pois, condicionada a estas zonas do espectro em que a atmosfera é transmissiva à radiação solar electromagnética e àquelas zonas em que a superfície terrestre emite radiação electromagnética, de maior comprimento de onda. A Figura II.4 destaca o posicionamento das bandas espectrais dos sensores *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), do satélite Landsat 7, e *High Resolution InfraRed* (HRVIR), do satélite SPOT 4, caracterizados nos subcapítulos III.1.1 e III.1.2 e utilizados neste estudo. Verifica-se, nitidamente, que a disposição das bandas está fortemente dependente das regiões de elevada transmissividade atmosférica (janelas atmosféricas).

Pelo contrário, a detecção remota numa zona de absorção vai permitir obter informação sobre a atmosfera.

A radiação solar que não é absorvida ou dispersa pela atmosfera atinge a superfície da Terra (cerca de 48% do total de energia que atinge o limite superior da atmosfera).

Há três processos fundamentais de interacção da energia incidente (EI) com a superfície terrestre – absorção, transmissão e reflexão (Lillesand *et al.*, 2003) (cf. Figura II.5).

A energia absorvida pela matéria vai conduzir ao seu aquecimento. No processo de transmissão, a passagem da energia através de meios de densidades diferentes (como do ar para a água), provoca uma alteração da velocidade da radiação electromagnética (Sabins, 1997). Por sua vez, no processo de reflexão, a energia incidente é redireccionada pelo objecto.

As proporções destas interacções dependem do comprimento de onda e das propriedades físicas e químicas do alvo. No entanto, pela lei de conservação da energia, a soma do fluxo absorvido ($E_A(\lambda)$) com o fluxo reflectido ($E_R(\lambda)$) e com o fluxo transmitido ($E_T(\lambda)$) é igual ao fluxo incidente ($E_I(\lambda)$): $E_I(\lambda) = E_A(\lambda) + E_R(\lambda) + E_T(\lambda)$.

No contexto destes processos, o único tipo de energia que tem possibilidade de ser recebida pelo sensor é a energia reflectida. O total e a distribuição espectral da energia reflectida são usados em detecção remota para inferir a natureza de um objecto (Mather, 2006) e, portanto, convém dedicar a este processo de interacção maior atenção.

Consideram-se dois tipos de reflexão: a reflexão especular, em que a energia é reflectida sem ser dispersa, em que o ângulo de incidência da energia é igual ao ângulo de reflectância, e a reflexão difusa, em que a energia é dispersa em todas as direcções (Mather, 2006) (cf. Figura II.6). Superfícies de águas calmas podem actuar, por exemplo, como reflectores especulares, embora a maior parte dos alvos sejam reflectores difusos. Desta forma, nem toda a energia reflectida é registada pelo sensor, porquanto este recebe apenas energia reflectida segundo um determinado ângulo.

A reflectância dos diferentes objectos de estudo, entendida como a quantidade de radiação reflectida por cada um deles (dada pela razão entre a radiação reflectida e a radiação incidente), depende da rugosidade do terreno, do comprimento de onda da radiação incidente, do ângulo de incidência da radiação e da natureza dos materiais.

A detecção remota permite determinar a natureza dos diferentes alvos na medida em que eles possuem reflectâncias próprias em cada banda do espectro electromagnético.

De facto, todos os alvos apresentam uma curva de reflectância de acordo com o comprimento de onda da energia reflectida. Isso designa-se por assinatura espectral, que pode ser entendida como o conjunto das respostas espectrais esperadas por parte de um determinado alvo em diferentes faixas do espectro. As diferentes assinaturas espectrais permitem distinguir, portanto, diversos tipos de materiais, pois, uma vez conhecidas e catalogadas, permitem a sua identificação e diferenciação.

As curvas de reflectância traçadas para os diferentes alvos representam, então, uma resposta espectral média desses objectos em diferentes bandas do espectro electromagnético (Fonseca & Fernandes, 2004). Diversos factores intervêm, pelo que estas curvas são uma representação aproximada, com uma pequena margem de erro.

Na Figura III.3 estão representadas as assinaturas espectrais médias da água, da vegetação e do solo, que constituem os três elementos dominantes da paisagem. Usando a informação das assinaturas espectrais, é possível distinguir estes elementos em imagens colhidas em diferentes bandas do espectro. Com efeito, a escolha de determinadas bandas espectrais poderá fazer sobressair certos elementos de interesse em detrimento de outros.

Quanto maior for a reflectância de um objecto, maior será a intensidade do sinal que chega ao sensor e, portanto, mais fácil será a sua identificação. Tal como se refere posteriormente, essa intensidade do sinal que o sensor recebe é depois convertida em níveis de cinza, tanto mais claros quanto maior for essa intensidade.

Constata-se, através da Figura III.3, que o máximo poder reflexivo da água se situa no domínio do visível e, portanto, quaisquer estudos relacionados com a presença de poluentes na água, por exemplo, implicam o recurso à informação deste intervalo espectral ou de parte dele. Para estudos deste tipo, seria desaconselhável recorrer a informação no domínio do infravermelho médio, em que a água absorve fortemente a radiação, reduzindo drasticamente a intensidade do sinal e aparecendo, consequentemente, a negro.

A reflectância da vegetação é máxima no infravermelho próximo, sendo este o intervalo espectral mais indicado para a identificação deste elemento. No que respeita ao solo, o seu máximo poder reflexivo é no infravermelho médio, excepto nas bandas de absorção da água.

A análise da Figura III.3 permite extrair ainda outra conclusão importante: caso uma imagem fosse captada na banda do verde (0,5 – 0,6 μm), por exemplo, os elementos mais

claros seriam, com grande probabilidade, solo, enquanto que os mais escuros seriam, muito provavelmente, corpos de água.

Conclui-se, então, que determinadas bandas do espectro electromagnético são mais adequadas para realçar certos elementos da paisagem que outras e a sua utilização depende, como é evidente, das características e das finalidades do estudo.

A reflectância dos diferentes alvos vai de novo interagir com a atmosfera até chegar ao sensor, sendo novamente alvo dos mesmos acidentes de propagação descritos anteriormente.

II. 2 Os tipos de resolução dos sensores

A resolução de um sensor pode ser definida como a capacidade que este tem para apresentar uma imagem nítida e bem definida.

Podem distinguir-se diferentes tipos de resolução de um sensor: a resolução espacial, a resolução radiométrica, a resolução espectral e a resolução temporal.

Tal como referido anteriormente, os sensores de detecção remota podem estar colocados em três grandes tipos de plataformas: espaciais, aéreas ou terrestres.

A distância entre o objecto de estudo (alvo) e a plataforma em que o sensor se encontra é decisiva na definição do detalhe da informação obtida e na área total visualizada por esse sensor (área de varrimento ou cobertura espacial).

Os sensores a bordo de plataformas espaciais (satélites), que se encontram a uma distância maior em relação à superfície terrestre, possuem uma área de varrimento maior que os sensores colocados em plataformas aéreas ou terrestres, mas não permitem, geralmente, obter tanto pormenor ou detalhe. Com efeito, o detalhe detectável numa imagem depende da resolução espacial do sensor, isto é, da dimensão do objecto mais pequeno que ele consegue detectar.

A resolução espacial dos sensores passivos depende fundamentalmente do campo de visão instantânea (CVI) (*Instantaneous Field of View* – IFOV) do sensor, ou seja, do seu cone angular de visibilidade (Salinero, 2007) (cf. Figura III.1: 1). A resolução espacial de um sensor é tanto maior quanto menor for o CVI.

A célula de resolução associada a um determinado sensor é determinada pelo produto do CVI pela altura a que se encontra o sensor. A resolução máxima da imagem corresponde ao tamanho da célula de resolução. O *pixel* (*picture element*) é o elemento da imagem correspondente à célula de resolução.

Assim, a resolução espacial pode ser entendida como a distância mínima entre dois objectos que o sensor consegue distinguir no terreno e é definida pelo tamanho do *pixel*.

Imagens onde é possível detectar pequenos objectos são ditas de alta resolução (espacial), enquanto que imagens onde tal não é possível são ditas de baixa resolução.

A resolução radiométrica é definida pelo número de valores digitais que representam níveis de cinza, ou seja, o número de níveis de intensidade de radiação electromagnética que o sensor tem capacidade para registar (Mather, 2006). Assim, a resolução radiométrica de um sensor descreve a sensibilidade do sensor em detectar pequenas diferenças na energia reflectida ou emitida.

A resolução espectral corresponde ao número de bandas espectrais de um sensor e à amplitude dos intervalos de comprimento de onda de cada banda nos quais a radiação electromagnética é registada. Quanto mais estreitos forem esses intervalos, ou seja, quanto mais alta for a resolução espectral, mais rigorosas são as assinaturas espectrais obtidas (Fonseca & Fernandes, 2004).

A resolução temporal, ou periodicidade com que o sensor adquire imagens da mesma área da superfície terrestre (Salinero, 2007), é dada pelo período de repetição da órbita do sensor. Depende de um conjunto de factores, como o ciclo de repetição, as capacidades de visualização do sensor, a sua área de varrimento e a latitude.

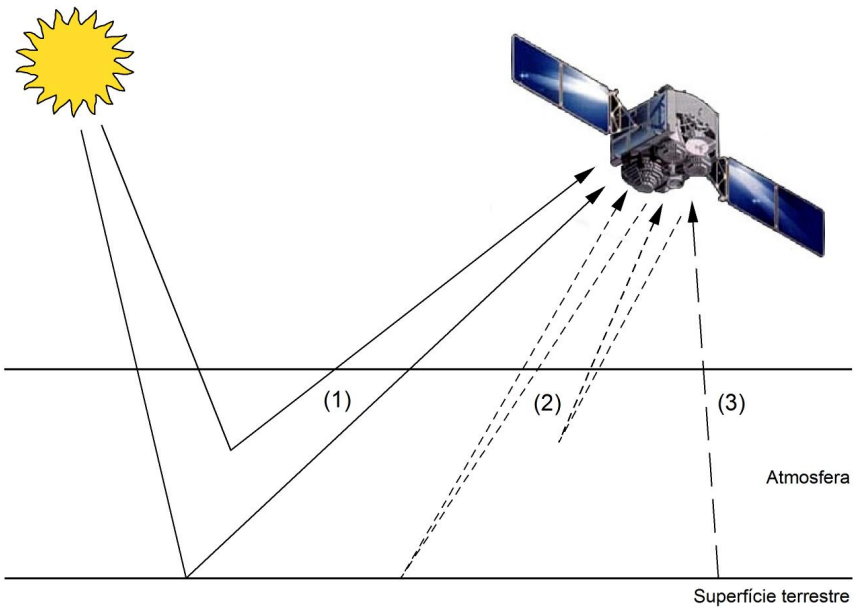


Figura II.1 – Formas de detecção remota: (1) Reflexão; (2) Emissão-Reflexão; (3) Emissão. Adaptado de Salinero (2007).

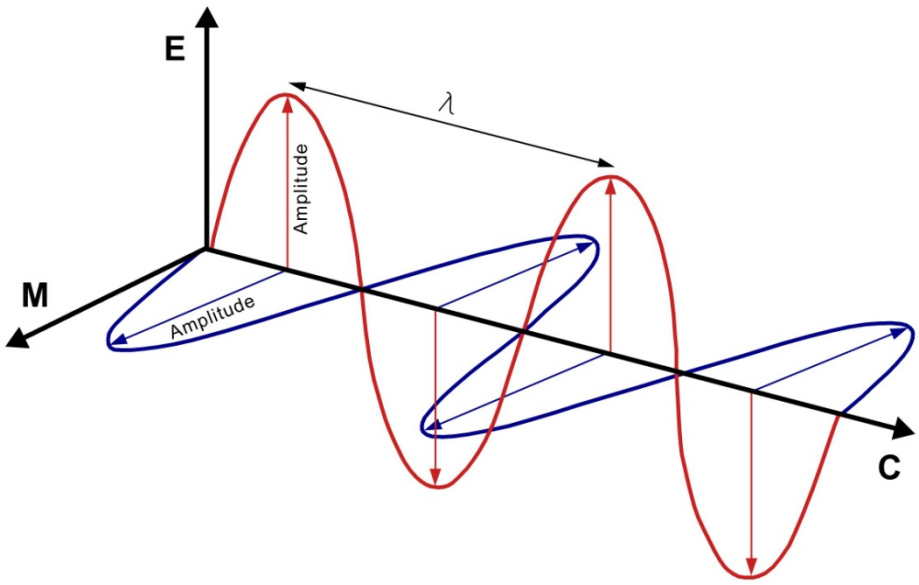


Figura II.2 – Esquema de uma onda electromagnética. E: campo eléctrico; M: campo magnético; C: velocidade da luz. Adaptado de Lillesand *et al.* (2003).

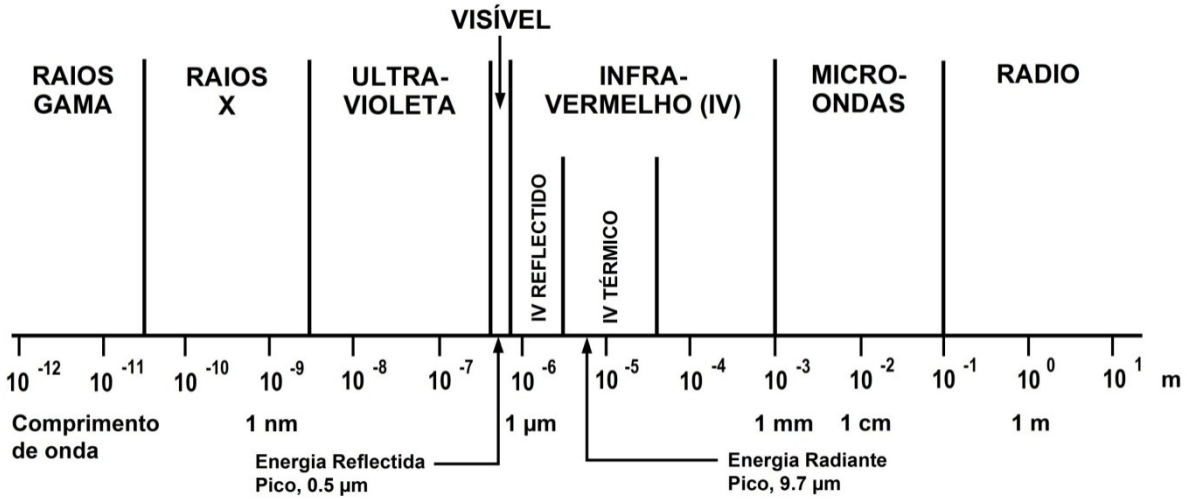


Figura II.3 – Espectro electromagnético da radiação solar (adaptado de Sabins, 1997 e Brum da Silveira, 2002). O domínio óptico (regiões do visível e do infravermelho) está representado de forma expandida na Figura II.4.

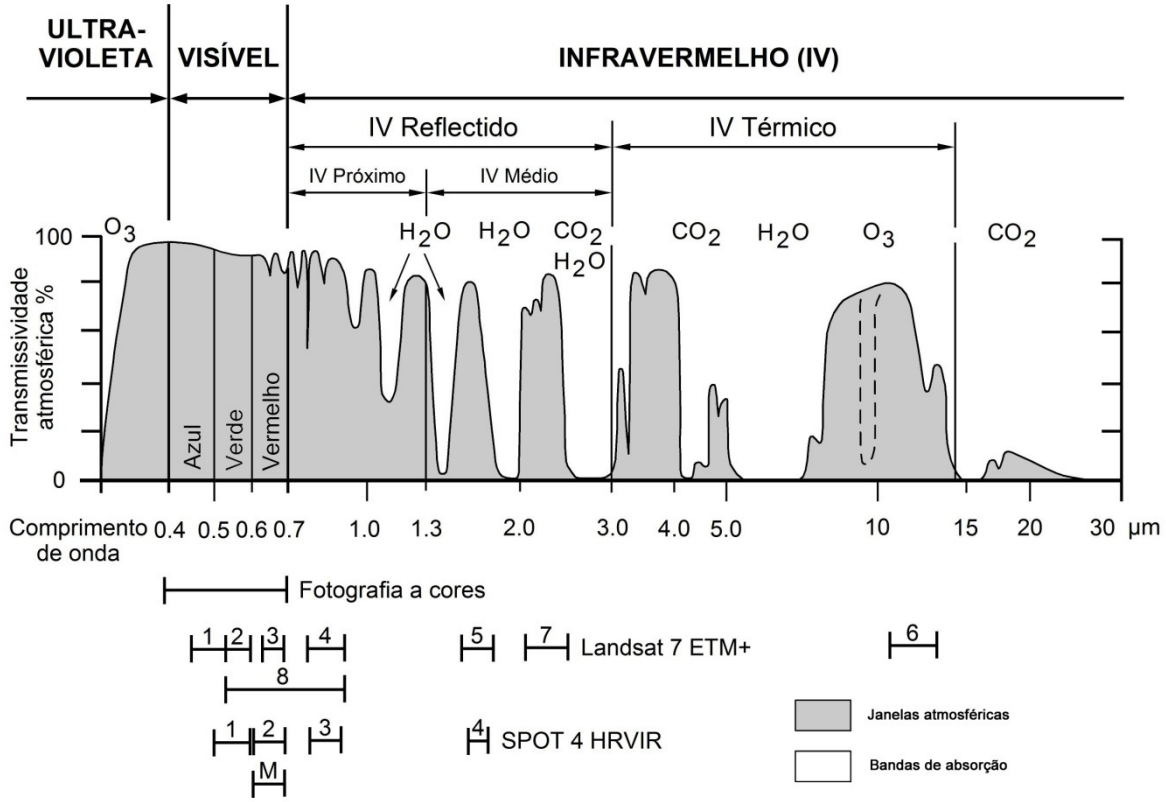


Figura II.4 – Diagrama expandido do domínio óptico do espectro electromagnético (regiões do visível e do infravermelho). Nesta figura, estão representadas as janelas atmosféricas, as bandas de absorção, os gases atmosféricos responsáveis pela absorção da energia electromagnética e os intervalos de comprimento de onda (bandas) usados pelos sistemas de detecção remota utilizados neste estudo (adaptado de Sabins, 1997 e Brum da Silveira, 2002).

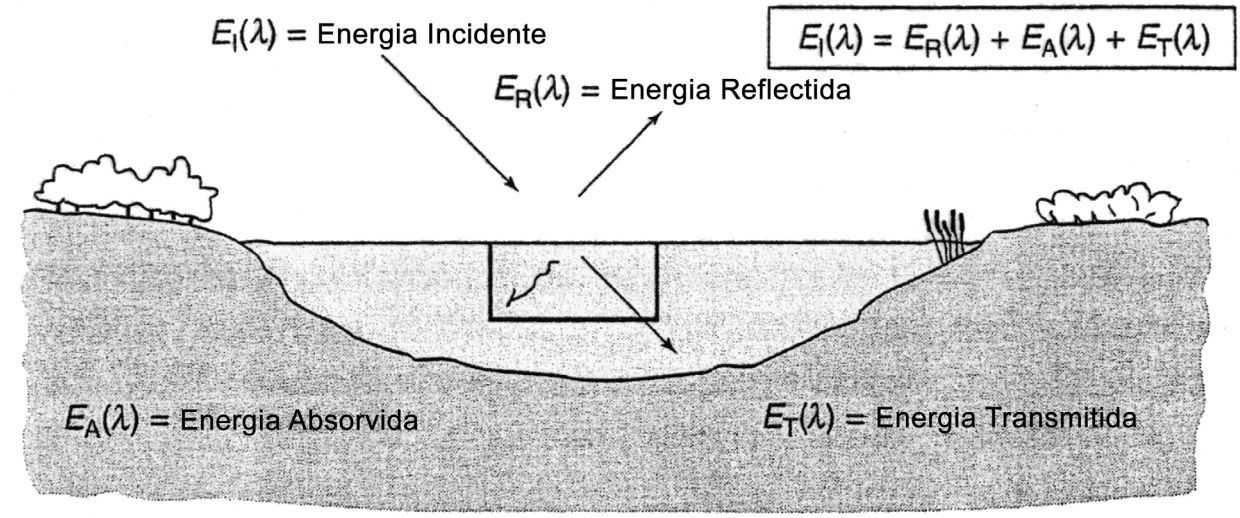


Figura II.5 – Processos fundamentais de interacção entre a energia electromagnética e a superfície terrestre. Adaptado de Lillesand *et al.* (2003).

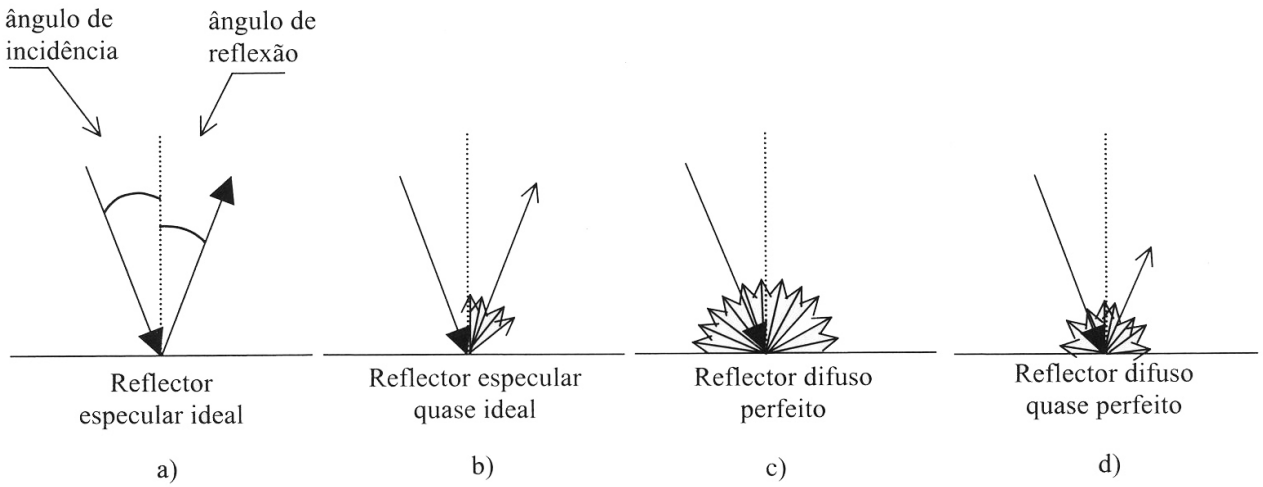
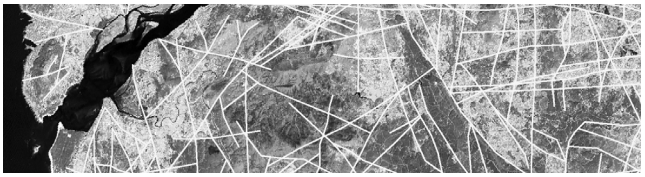


Figura II.6 – Tipos de reflexão da radiação electromagnética (Fonseca e Fernandes, 2004).



III. MATERIAIS E MÉTODOS

III. 1 Dados de detecção remota

Neste trabalho, utilizaram-se imagens dos sensores ETM+ (satélite Landsat 7) e HRVIR (satélite SPOT 4), que se caracterizam seguidamente. Uma análise comparativa das características destes dois sensores é apresentada, de forma sucinta, no Quadro 1.

III. 1. 1 A missão Landsat e o sensor ETM+: características gerais

O satélite ERST-1 (*Earth Resources Technology Satellite*), rebaptizado em 1975 de Landsat 1, foi lançado em 1972, sendo o primeiro de uma série de satélites de tecnologia totalmente electrónica, especialmente desenhado para a observação e monitorização dos recursos terrestres do planeta.

Este programa da NASA (*U. S. National Aeronautics and Space Administration*) foi mantido sob forma experimental até 1983. Desde então, o programa tornou-se comercial, passando as imagens a estarem disponíveis para aplicações civis (Fonseca & Fernandes, 2004).

O segundo satélite da série, Landsat 2, foi lançado em 1975 e o terceiro, Landsat 3, em 1978. Seguiram-se os Landsat 4, 5 e 7, lançados, respectivamente, em 1982, 1984 e 1999.

Actualmente, o projecto Landsat é da responsabilidade conjunta da NASA e do USGS (*U. S. Geological Survey*).

Esta família de satélites terrestres constituiu o projecto mais frutífero de detecção remota para fins civis. A boa resolução dos seus sensores, o carácter global e periódico da observação que realizam e a boa comercialização das imagens explicam a sua elevada utilização por especialistas de muitas áreas do conhecimento um pouco por todo o mundo (Salinero, 2007).

O último satélite da missão Landsat – série 7 – (cf. Figura III.1: 4) foi lançado a 15 de Abril de 1999. Nele se incorporou o sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), considerado como “o mais estável e melhor instrumento de observação da Terra alguma vez colocado em órbita” (http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/landsat7.html).

O sensor ETM+ é um sensor óptico, pois regista informação radiométrica nas regiões do visível e do infravermelho.

No que concerne ao modo de operação, o sensor ETM+ classifica-se como um sensor passivo, pois limita-se a medir a radiação naturalmente disponível: a radiação solar reflectida pela superfície terrestre e pela atmosfera e a radiação térmica emitida pela Terra.

Localizado a uma altitude de 705 km, com uma órbita heliossíncrona quase polar (inclinação de 98,2^{o}) (cf. Figura III.1: 3), possui uma área de varrimento de 185 km (cf. Figura III.1: 2) e um ciclo de repetição de 16 dias (resolução temporal).

Quanto ao tipo de arranjo dos sensores e ao modo de varrimento da superfície terrestre, é um sensor de varrimento mecânico (*"cross-track scanner"*), tal como se evidencia na Figura III.1: 1.

O sensor possui um espelho oscilante de varrimento, que é accionado por um motor eléctrico. O espelho varre o terreno num conjunto de linhas paralelas entre si e perpendiculares à direcção da órbita (*"cross-track"*). A energia procedente dos objectos é transmitida, através de um outro conjunto de espelhos oscilantes secundários, designados "correctores da linha de varrimento" (não representados na figura Figura II.1: 1), aos detectores, que convertem o sinal analógico – a radiância recebida – num valor digital. O sinal recebido é decomposto a bordo em vários comprimentos de onda, em que cada um deles é enviado a um tipo especial de detectores, sensíveis a esse tipo de energia (Salinero, 2007; Sabins, 1997).

O ETM+ é um sensor de varrimento multiespectral, pois detecta a mesma superfície de terreno em diferentes bandas do espectro electromagnético. Quanto à resolução espectral, possui oito bandas, localizadas no intervalo espectral 0,45 – 12,5 µm, sendo três no domínio do visível, uma no infravermelho próximo, duas no infravermelho médio, uma no infravermelho térmico e uma pancromática, *i. e.*, banda única que significa literalmente "todas as cores" e que, por isso, mede a radiação electromagnética reflectida em todos os comprimentos de onda do espectro visível (cf. Figura III.3 e Figura III.4).

As principais características das bandas espectrais (e aplicações genéricas) deste sensor são apresentadas no Quadro 2.

O sensor ETM+ apresenta uma elevada resolução espacial, de 30 m, à excepção das bandas 6 (infravermelho térmico – 60 m) e 8 (pancromática – 15 m)[3] (cf. Figura III.4).

A resolução radiométrica é de 8 bits, o que possibilita, em cada banda, a discriminação de 256 tons de cinza.

Cada oscilação do espelho rotativo principal permite o varrimento de 16 linhas em simultâneo e, por isso, são necessários 16 detectores por banda, à excepção da banda 6 (infravermelho térmico), que, por registar menor resolução espacial (60m), requer menos detectores. O espelho rotativo capta informação nos dois sentidos do varrimento da superfície, tanto durante o movimento oeste-este, como no movimento este-oeste, o que permite aumentar o tempo de pausa de cada célula de resolução, aumentando, assim, a integridade geométrica e radiométrica da imagem.

As imagens da família de satélites Landsat têm sido utilizadas por entidades governamentais, comerciais, industriais, civis e educacionais em todo o mundo. Ao longo dos anos, têm servido várias aplicações, nomeadamente, agricultura, exploração florestal, geologia, gestão de recursos, geografia, cartografia, recursos hídricos, catástrofes naturais e dinâmica de urbanização (http://landsat.gsfc.nasa.gov/).

[3] Atendendo à grande diversidade de sensores utilizados, tanto na observação da superfície da Terra propriamente dita como na monitorização de fenómenos atmosféricos, com resoluções espaciais muito diferenciadas, adoptou-se a classificação genérica do sensor ETM+ como alta resolução espacial (100m – 10m): http://telsat.belspo.be/beo/noflash/menu_en.htm

III. 1. 2 A missão SPOT e o sensor HRVIR: características gerais

O programa SPOT (*"Système Pour l'Observation de la Terre"*) foi iniciado pela França, em 1977. É, actualmente, operado pelo CNES (*Centre Nationale d'Études Spatiales*), a Agência Espacial Francesa, com apoio da Suécia e da Bélgica. Até ao momento, foram lançados os seguintes satélites: SPOT 1, SPOT 2, SPOT 3, SPOT 4 e SPOT 5, respectivamente, em 1986, em 1990, em 1993, em 1998 e em 2002.

O SPOT 4 (cf. Figura III.2: 4), lançado a 24 de Março de 1998, possui dois sensores gémeos de alta resolução, designados HRVIR (*"Haute Résolution Visible et InfraRouge"; "High Resolution Visible InfraRed*) (cf. Figura III.2: 2), que, tal como o ETM+, do satélite terrestre Landsat 7, operam no domínio óptico do espectro electromagnético.

Ao contrário do sensor ETM+, que é um sensor de varrimento mecânico, o HRVIR é um sensor de matriz linear (*"along-track scanner"*), como se evidencia na Figura III.2: 1. O SPOT foi o primeiro satélite a usar a tecnologia de varrimento ao longo da linha de voo (*"along-track"*) – ou sistema *"pushbroom"* –, desenvolvida na década de 1980.

A cadeia de detectores que compõem o sensor HRVIR, designados CCD (*"Charge Couple Devices"*), é deslocada pelo movimento do satélite na sua órbita e cobre todo o campo de visão do sensor. A designação "matriz linear" deriva do facto de cada detector explorar uma linha completa, à medida que a plataforma se move (Fonseca & Fernandes, 2004). Essa linha corresponde, neste caso, a uma coluna da imagem.

A tecnologia *"pushbroom"*, ao descartar o espelho móvel, permite aumentar a resolução espacial deste tipo de sensores em relação aos de varrimento mecânico. Por outro lado, proporciona a redução de alguns problemas geométricos típicos destes sensores, originados, por exemplo, quando se perde a sincronia entre o movimento do espelho e o da plataforma (Salinero, 2007). Contudo, um dos principais problemas dos equipamentos de matriz linear reside na difícil calibração da cadeia de detectores que o compõem.

Cada um dos sensores gémeos (HRVIR-1 e HRVIR-2), localizados a uma altitude de 823 km e com uma órbita heliossíncrona quase polar (inclinação de 98^{o}) (cf. Figura III.2: 3), pode operar no modo pancromático ou multiespectral. Os sensores podem, ainda, operar conjuntamente

(*"twin mode"*) ou independentemente um do outro. No primeiro caso, os dois instrumentos visualizam em conjunto uma área de varrimento de 117 km (60 km em cada, com 3 km de sobreposição), centrada em relação ao nadir (cf. Figura III.2: 2). Para tal, utilizam 3000 detectores no modo multiespectral e 6000 no modo pancromático. Este maior número de detectores, em que cada um dos quais "lê" uma linha completa, possibilita, face ao ETM+, uma maior precisão geométrica na representação da superfície terrestre.

O HRVIR, tal como o ETM+, adquire informação multiespectral, captando radiação em diferentes bandas do espectro electromagnético. Possui cinco bandas, localizadas no intervalo espectral 0,50 – 1,75 μm (resolução espectral), sendo duas no domínio do visível (bandas 1 e 2), uma no infravermelho próximo (banda 3), uma no infravermelho médio (banda 4) e uma monoespectral ou pancromática (banda M). A sua resolução espectral, é portanto, francamente menor que a do ETM+, *i. e.*, possui um menor número de bandas espectrais (cf. Figura III.3 e Figura III.4). O sensor HRVIR não possui, por exemplo, nenhuma banda no infravermelho térmico, em virtude de os seus detectores serem muito sensíveis ao calor e, tal como referido anteriormente, serem de difícil calibração (Salinero, 2007).

As características das bandas espectrais deste sensor, bem como as respectivas aplicações genéricas, são apresentadas no Quadro 2.

Este sensor possui uma elevada resolução espacial, de 20 m, à excepção da banda M (monoespectral ou pancromática) – 10 m. A sua resolução espacial é, portanto, superior à do sensor ETM+, como se comprova através da análise da Figura III.4.

Tal como no sensor ETM+, a resolução radiométrica é de 8 bits, o que facilita, em cada banda, a discriminação de 256 tons de cinza.

A resolução temporal é de 26 dias. Esta pode, no entanto, ser reduzida para 2 ou 3 dias (conforme as latitudes), pois o HRVIR, ao contrário do ETM+, tem a capacidade de observar a mesma área da superfície terrestre em órbitas sucessivas, reduzindo a frequência temporal das imagens. Este facto é possível porque o sensor possui vista não nadiral (*"off-nadir viewing"*), com ângulo máximo de 27^{o} em relação ao nadir.

As imagens SPOT têm sido utilizadas em inúmeras aplicações, entre as quais se destacam: avaliação do impacto das actividades humanas sobre o meio ambiente (desflorestação, actividades energéticas e mineiras, etc.), gestão de riscos e catástrofes (secas, incêndios,

inundações, etc.), ordenamento do território, defesa e segurança, monitorização de fenómenos naturais, dinâmica de urbanização, estimativas de fitomassa, monitorização da cobertura vegetal, agricultura, identificação de sedimentos em suspensão nos rios e estuários, pesquisa marítima e cartografia e actualização de mapas (www.spotimage.com; www.embrapa.br).

III. 1. 3 Dados espectrais utilizados

Neste trabalho, foram utilizadas imagens digitais de detecção remota espacial obtidas pelos dois sensores multiespectrais caracterizados anteriormente.

No que respeita ao sensor ETM+, obteve-se a cena que englobava a área de estudo aqui apresentada na aplicação *Earth Science Data Interface* (ESDI), do arquivo *Global Land Cover Facility* (http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml), com distribuição gratuita. Esta cena tem centro nominal órbita/ponto (*path*/*row*) 204/31 (segundo o sistema de referenciamento WRS-2)[4] e abrange uma vasta área da região Norte de Portugal continental, de aproximadamente 31450 km^2 (170 km Norte-Sul x 185 km Oeste-Este), tal como se pode observar na Figura III.5.

A cena *p*204, *r*31 foi adquirida no dia 24 de Junho de 2000, com ausência de nuvens e com as seguintes condições de iluminação: ângulo de elevação do Sol de aproximadamente 63,9^o e azimute do Sol de aproximadamente 127,7^o.

A informação espectral, relativa a esta cena, que foi descarregada do arquivo *Global Land Cover Facility*, não correspondia a um ficheiro único, mas sim a um conjunto de ficheiros que incluíam, separadamente, cada banda espectral do sensor ETM+. Cada banda espectral estava no formato .tif (*Tagged Image File Format*) e a análise do ficheiro de metadados indicou que

[4] O *World Reference System* (WRS) é um sistema usado para a catalogação dos dados do satélite Landsat e consiste numa grelha global constituída por linhas (*rows*) e colunas (*paths*). Cada *path* corresponde ao varrimento do terreno resultante da órbita do satélite. Cada *row* corresponde ao centro nominal da cena. Os dados do Landsat 7 e do Landsat 5 são catalogados pelo *World Reference System-2* (WRS-2), enquanto que os do Landsat 1, 2 3 e 4 eram catalogados pelo *World Reference System-1* (WRS-1) (http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/wrs.html).

estavam georreferenciadas segundo o sistema de projecção Universal Transverse Mercator (U.T.M.), datum WGS-84. O ficheiro de metadados revelou igualmente que a cena tinha sido ortorrectificada.

A cena SPOT foi obtida através da aprovação, por parte da Agência Espacial Europeia (ESA – *European Space Agency*), de uma proposta de candidatura ao projecto IMAGE2006[5]. Este projecto baseia-se em imagens de alta resolução dos satélites SPOT 4 e 5 e do satélite IRS-P6 (*Indian Remote Sensing Satellite*) e visa, através destas, produzir coberturas nacionais ortorrectificadas para 38 países (25 países que constituíam, em 2006, a União Europeia, bem como países vizinhos). As coberturas nacionais serão usadas para produzir um mapa actualizado para a caracterização da ocupação e/ou uso do solo da Europa[6]. Por outro lado, as imagens de satélite permitirão elaborar um mosaico europeu que fornecerá representação espacial actualizada da Europa a ser usada na produção de cartografia temática variada. A ESA é responsável por disponibilizar imagens de satélite ortorrectificadas para o ano de referência 2006 (+/- 1 ano), enquanto que o Centro Comum de Investigação (JRC – *Joint Research Centre*) tem a cargo a elaboração do mosaico europeu baseado nessas imagens de satélite ortorrectificadas. A obtenção destes dados espaciais era feita de forma gratuita, até Maio de 2008, para todos os utilizadores, mediante a apresentação de candidatura ao projecto, no sítio da ESA, http://eopi.esa.int/esa/esa?aoid=760&ts=1202903343469&cmd=aodetail.

O download da cena disponibilizada gratuitamente pela Agência Espacial Europeia foi feito através da aplicação EOLi 6.1.6 (*Earth Observation Link*), que permite aceder ao catálogo da ESA e requisitar outros serviços, como a ortorrectificação de imagens.

A cena obtida tem centro nominal órbita/ponto (*path*/*row* ou, segundo outras designações, *track*/*frame*) 22/265 (segundo o sistema de referenciamento do satélite SPOT)[7]. Abarca uma

[5] A proposta de candidatura, projecto "HydroSPOT", foi apresentada por uma equipa de investigadores, cujo investigador principal é o Prof. António Alberto Gomes e de que faz parte, entre outros, o autor desta dissertação. O resumo desta candidatura pode ser acedido em http://eopi.esa.int/esa/esa?aoid=760&ts=1202903343469&cmd=aodetail (Project ID 5750).

[6] Este objectivo integra-se noutro projecto que decorre em paralelo ao projecto IMAGE2006 – o projecto CORINE Land Cover 2006 (CLC2006).

[7] O SPOT tem também o seu próprio sistema de referenciamento, embora mais complexo que o do Landsat, pelo facto de haver dois sensores gémeos em operação no mesmo satélite (HRVIR-1 e

área francamente menor que a cena Landsat, de aproximadamente 3600 km^2, *i. e.*, 60 km Norte-Sul x 60 km Oeste-Este (cf. Figura III.5), correspondendo, tal como se disse atrás, à área de estudo apresentada.

A cena *p*22, *r*265 (ou *t*22, *f*265) foi adquirida pelo sensor HRVIR no dia 23 de Agosto de 2006, com ausência de nuvens e com as seguintes condições de iluminação: ângulo de elevação do Sol de aproximadamente 57,6^o e azimute do Sol de aproximadamente 154,1^o.

Os dados espectrais referentes à cena SPOT, à excepção da banda pancromática (não fornecida pela ESA), estavam aglutinados num ficheiro multibanda, ao contrário do que sucedia com os correspondentes à cena Landsat, em que cada banda correspondia a um ficheiro distinto com formato .tif. No caso da cena SPOT, o formato de gravação dos dados possuía a extensão .bil. Este formato caracteriza-se por combinar a informação das bandas, armazenando de forma contígua os *pixels* de cada linha de cada uma das bandas (Torrecilla, 2007). Por outras palavras, depois dos *pixels* da linha 1, banda 1, situam-se os correspondentes à linha 1, banda 2, etc., até completar o número total de bandas. Depois da primeira linha da última banda, situa-se a segunda linha da banda 1, depois a segunda linha da banda 2, e assim sucessivamente (Salinero, 2007). É por esta razão que este formato se designa "linha intercalada por banda" (*Band Interleaved by Line, BIL*).

A análise do ficheiro de metadados da cena SPOT indicou que os dados de imagem estavam georreferenciados segundo o sistema de projecção Lambert Azimuthal Equal Area (LAEA), datum ETRS 1989. O ficheiro de metadados revelou igualmente que a cena tinha sido ortorrectificada, de acordo com os princípios do projecto IMAGE2006.

Visto que as duas cenas (Landsat e SPOT) possuíam sistemas de projecção cartográfica diferentes, foi necessário atribuir-lhes um sistema de projecção comum. Assim, através do software *ArcGis 9.2*, transformou-se o sistema de projecção original da cena SPOT no sistema Universal Transverse Mercator (U.T.M.), datum WGS-84 (Fuso 29, hemisfério norte), que foi o

---

HRVIR-2), e pelo facto de estes poderem ser apontados. O sistema de referenciamento do SPOT atribui uma coordenada *row* e duas coordenadas *path* (uma para cada um dos sensores gémeos), em que estas últimas correspondem às localizações do centro nominal das cenas no modo de operação conjunta e com visualização centrada em relação ao nadir. As cenas que os sensores gémeos obtêm por visão não nadiral correspondem sempre a uma dada coordenada *row*, mas podem não corresponder a uma determinada coordenada *path* em particular (Belward & Valenzuela, 1991).

utilizado para o conjunto da informação incorporada no SIG, de modo a permitir a sobreposição de toda a informação disponível.

Atendendo a que os dados espectrais das duas cenas tinham formatos de gravação diferentes (ficheiro multibanda com extensão .bil, no caso da cena SPOT, e conjunto de ficheiros com extensão .tif correspondendo ao número de bandas espectrais, no caso da cena Landsat), criaram-se, no software *PCI Geomatics 9.1*, dois ficheiros multibanda com extensão .pix (formato PCIDSK). Para um desses ficheiros, importaram-se seis das oito bandas da cena Landsat (excluíram-se a banda 6 e a banda 8, como se explica posteriormente) e, para o outro, as quatro bandas da cena SPOT.

No mesmo software, a cena Landsat, com uma área muito superior à cena SPOT, foi recortada por esta, de forma a manter unicamente os dados Landsat relativos à área de trabalho.

III. 2 Dados altimétricos e construção do Modelo Digital de Terreno

O Modelo Digital de Terreno (MDT) é, como assinala LÓPEZ (2003), uma representação espacial, em formato digital, de uma variável quantitativa contínua numa determinada área da superfície terrestre.

Um modelo espacial é uma representação simplificada da realidade geográfica, dado que esta comporta uma grande quantidade de aspectos que não podem ser representados simultaneamente (Torrecilla, 2007).

Por essa razão, e pelo facto de a variável espacial utilizada na construção deste modelo ter sido unicamente a elevação do terreno, esta representação digital designa-se, doravante, por Modelo Digital de Elevação (MDE).

A elaboração do MDE para uma área luso-galaica, como a que aqui constitui área de trabalho, implica, necessariamente, o recurso a dados altimétricos de entidades diferentes. Para o sector português da área de estudo, utilizaram-se as curvas de nível 1/25000 do IGEOE (Instituto Geográfico do Exército), com equidistância de 10 m, correspondentes às folhas 2, 3, 4, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 27, 28, 29, 40, 41 e 42. Para o sector espanhol, utilizaram-se as curvas de nível 1/25000 do Instituto Geográfico Nacional, com a mesma equidistância, correspondentes às folhas 222, 223, 224, 260, 261, 262, 298 e 299.

Os dados digitais de altimetria do IGEOE possuíam um sistema de projecção cartográfica diferente do dos dados espanhóis (sistema de projecção Lisboa Hayford Gauss Igeoe e sistema de projecção Universal Transverse Mercator (U.T.M.), European Datum 1950 (Fuso 29, hemisfério norte), respectivamente), pelo que foi necessário atribuir-lhes um sistema de projecção cartográfica comum. Dado que se pretendia integrar posteriormente estes dados em ambiente SIG, mais concretamente relacioná-los com os dados espectrais de detecção remota (imagens Landsat e SPOT), projectaram-se com o sistema de projecção Universal Transverse Mercator (U.T.M.), datum WGS-84 (Fuso 29, hemisfério norte), que, como atrás se disse, foi o sistema utilizado para o conjunto da informação primeiramente incorporada no SIG.

O MDE, em formato vectorial, foi elaborado no software *ArcGis 9.2*, através da extensão *3D analyst*. Posteriormente, foi convertido para o formato matricial, com uma resolução espacial de 10 m (cf. Figura III.6: 1) e foi ainda realçado pela aplicação do "efeito sombra", que gerou um mapa de sombreado da área de estudo (cf. Figura III.6: 2), através da função *hillshade*, da extensão *spatial analyst*.

O mapa de sombreado representa as áreas iluminadas e escurecidas resultantes da incidência da radiação solar (Torrecilla, 2007). O factor de iluminação depende do azimute e do ângulo de elevação do Sol sobre o horizonte. O azimute indica a procedência da luz solar sobre a superfície terrestre e expressa-se em graus em relação ao norte. O seu valor varia ao longo do dia, em função da hora. O ângulo de elevação do Sol sobre o horizonte varia ao longo do dia, com um máximo ao meio-dia e um mínimo ao nascer e ao pôr-do-sol, mas também ao longo do ano, alcançando o máximo no solstício de Junho e o mínimo no solstício de Dezembro. A inclinação e a orientação do terreno modificam sensivelmente a incidência dos raios solares sobre uma determinada área concreta (Torrecilla, 2007).

Dado que, no presente estudo, se pretendeu, com a elaboração deste mapa, representar apenas o efeito de luz e sombra sobre o relevo, para salientar elementos lineares no terreno, e não, por exemplo, realizar cálculos de iluminação e insolação, assumiu-se o valor que, por defeito, o software indicava – azimute 315^{o} (Noroeste) e altura do Sol 45^{o} –, embora se tenham utilizado outros azimutes para descobrir lineamentos estruturais que fossem revelados por outras direcções de iluminação.

Foi-lhe ainda aplicada um grau de sobreelevação vertical de 5 vezes, para enfatizar os aspectos morfológicos.

III. 3 Processamento digital das imagens de satélite

Feita a referência e caracterização dos materiais obtidos, passa-se, a partir deste ponto, à análise e explanação dos diferentes métodos utilizados para a prossecução do objectivo essencial desta dissertação.

A essência do processamento digital de imagens é bastante simples: o *software* aplica aos dados originais uma equação ou séries de equações e depois grava os resultados da computação para cada *pixel*. Estes resultados formam uma nova imagem, que pode ser apenas visualizada ou gravada para posterior manipulação (Lillesand *et al.*, 2003).

As operações de processamento de imagem enquadram-se em três categorias: restauração de imagem, melhoria da qualidade visual e extracção de informação (Sabins, 1997).

As operações de restauração de imagem visam corrigir dados distorcidos ou degradados, de modo a criar uma representação mais fiel da realidade. Envolvem a correcção geométrica (no caso de distorções provocadas por variações da altitude, atitude e velocidade da plataforma que carrega o sensor), radiométrica (necessária quando se pretende, por exemplo, construir um mosaico de cenas adquiridas em alturas diferentes) e a remoção de ruído (causado, por exemplo, pelo mau funcionamento de um detector ou por anomalias na gravação dos dados). Dado que estas operações antecedem a análise dos dados e a extracção de informação, são comummente designadas por tarefas de pré-processamento (Lillesand *et al.*, 2003; Salinero, 2007).

No que concerne à cena obtida do satélite SPOT 4, a análise do ficheiro de metadados revelou que os dados tinham o nível 3 de pré-processamento («level 3 – ortho»). Segundo as informações técnicas da família de satélites SPOT (disponíveis em www.spotimage.com), isto significa que as distorções radiométricas e geométricas foram corrigidas previamente. A imagem foi também georreferenciada (European Spatial Reference Grid: sistema de projecção Lambert Azimuthal Equal Area – LAEA –, datum ETRS 1989).

Neste nível, as correcções geométricas consistem em ortorrectificar as imagens através de um modelo de reamostragem que compensa efeitos de distorção sistemática (como a distorção panorâmica, a rotação e a curvatura da Terra e as variações de altitude da plataforma) e produzem as transformações necessárias para projectar a imagem numa projecção cartográfica específica (www.spotimage.com). Estas correcções baseiam-se num

modelo de dinâmica de voo do satélite, em pontos de controlo e num modelo digital de elevação (MDE), que possibilita a correcção planimétrica. Este é o nível mais sofisticado de pré-processamento, que oferece máxima precisão para a cartografia. É o nível que permite que as imagens sejam integradas com outros tipos de dados geográficos.

Deste modo, pelo facto de as correcções radiométricas e geométricas terem sido previamente efectuadas no processo de restauração da imagem, não foi necessário executar esta tarefa de pré-processamento para as imagens SPOT.

A análise do ficheiro de metadados da cena obtida do satélite Landsat 7 revelou que a imagem tinha um nível de processamento L1G («Level 1 Geometrically Corrected»). De acordo com as informações técnicas da série Landsat (http://landsat.usgs.gov), esse nível comporta tanto as correcções das distorções radiométricas como das distorções geométricas. Para além disso, o ficheiro de metadados indicava que a imagem tinha sido georreferenciada (sistema de projecção Universal Transverse Mercator (U.T.M.), datum WGS-84) e ortorrectificada, o que significa que contempla, para além da correcção geométrica, a correcção planimétrica (Fonseca & Fernandes, 2004).

Assim, à semelhança da cena do SPOT 4, não foi necessário proceder a esta tarefa de pré-processamento, porquanto as correcções radiométricas e geométricas foram previamente efectuadas.

III. 3. 1 Melhoria da qualidade visual dos dados espectrais

Uma imagem digital pode ser considerada como uma matriz numérica (Mather, 2006), cujos valores derivam da quantificação da radiância dos diferentes objectos captada pelo sensor. Essa matriz é tridimensional – as duas primeiras dimensões correspondem às coordenadas geográficas da imagem (x e y) e a terceira à sua dimensão espectral (número de bandas).

Espacialmente, os dados de uma imagem digital são compostos por "elementos de imagem" (*pixels*, do inglês *"picture elements"*), tal como caracterizado anteriormente. Radiometricamente, esses dados são quantificados em níveis digitais (Richards & Jia, 2006). Esses níveis digitais são valores numéricos, não visuais, que derivam da codificação da radiância feita pelo sensor (tradução numérica). O valor associado a cada *pixel* é um número

inteiro e positivo (número natural). Cada um desses níveis digitais pode, para efeitos de análise visual, associar-se a uma intensidade visual, ou, se se preferir, a um nível de cinza (Salinero, 2007).

As técnicas de melhoramento de imagem, que integram a segunda categoria do processamento digital, consistem na alteração do aspecto ou aparência de uma imagem de modo a que a informação nela contida facilite a sua análise visual, de acordo com um determinado objectivo ou necessidade. Normalmente, estas técnicas visam aumentar a discriminação visual entre elementos na imagem (Sabins, 1997; Lillesand *et al.*, 2003; Fonseca & Fernandes, 2004; Mather, 2006), dado que o olho humano tem uma capacidade limitada para discriminar diferenças espectrais ou radiométricas subtis que podem distinguir os alvos.

Tendo em conta o carácter matricial de uma imagem digital, é possível realizar múltiplas operações matemáticas sobre essa matriz inicial, com vista a fazer sobressair, na imagem, determinados elementos de interesse para a aplicação em causa. Pretende-se, com estas operações, melhorar a interpretabilidade de uma imagem, complementando as habilidades da mente humana com as do computador.

A este propósito, convém salientar que não é possível afirmar que há uma determinada técnica standard que seja melhor que outras, porquanto a escolha de uma técnica de melhoramento de imagem depende do problema e dos objectivos que se procuram alcançar (Lillesand *et al.*, 2003). Não há, igualmente, regras simples para se produzir a "melhor" imagem para uma dada aplicação. Muitas das vezes, várias técnicas de melhoramento são necessárias. Como assinalam LILLESAND *et al.* (2003), a escolha das técnicas mais adequadas a uma certa aplicação é uma arte e depende substancialmente das preferências pessoais dos intérpretes.

As técnicas aplicadas neste estudo foram a manipulação do contraste e a aplicação de filtros não direccionais de realce de contornos ou fronteiras *("edge enhancement"*) e foram executadas no software *PCI Geomatics 9.1*, caracterizando-se seguidamente.

III.3.1.1 Melhoria do contraste tonal

Como já foi referido anteriormente, os sensores ETM+ e HRVIR têm uma capacidade máxima para distinguir 256 níveis de cinza. Isto porque os níveis digitais da imagem são gravados em código binário (um bit indica uma posição binária: 0 ou 1) e, uma vez que estes sensores empregam grupos de 8 bits para armazenar o nível digital correspondente a cada *pixel* (possuem, como se disse anteriormente, uma resolução radiométrica de 8 bits), então, cada *pixel* terá um valor compreendido entre 0 e 255, ou seja, 2^8=256, de 0 a 255 (Salinero, 2007).

Tal não significa, porém, que estes ou outros sensores com resolução de 8 bits, ao medirem a radiância dos objectos numa determinada área da superfície terrestre, utilizem efectivamente a sua capacidade plena, isto é, toda a amplitude de 0 a 255 níveis de cinza. Aliás, como refere SABINS (1997), nenhuma cena individual dos sensores do satélite Landsat possui uma amplitude de níveis de cinza que corresponda à amplitude total proporcionada pelos detectores dos sensores.

É muito frequente constatar-se, através da análise do histograma de uma determinada banda da imagem, uma concentração excessiva dos *pixels* que a compõem numa faixa restrita do intervalo 0-255. Veja-se, a propósito, o exemplo do histograma original da banda 4 do sensor ETM+ (Figura III.7: 3). A concentração do histograma numa pequena faixa do intervalo de níveis de cinza proporcionado pelo sensor, torna, consequentemente, difícil discriminar os tons de cinzento na imagem (tornando-a "monótona"), porque estes possuem valores digitais muito próximos, o que, por sua vez, impede a optimização da percepção visual dos objectos. Com efeito, a imagem bruta correspondente à banda 4 apresenta-se muito escura (cf. Figura III.7: 1), evidenciando um baixo contraste, isto é, um baixo coeficiente entre o nível de cinza máximo e o nível de cinza mínimo (Salinero, 2007), ou, por outras palavras, uma fraca diferenciação entre elementos da imagem com maior e menor reflectância (mais claros e mais escuros, respectivamente).

Com vista à optimização da percepção visual dos elementos da imagem, tornou-se, pois, necessário melhorar o contraste tonal, expandindo-o. De entre as várias técnicas de expansão do contraste existentes, optou-se pela expansão linear (*"linear contrast stretch"*), dado que foi a que evidenciou melhores resultados visuais.

Segundo esta técnica, ao valor mais baixo dos níveis de cinzento originais é atribuído um novo valor – 0, enquanto que ao valor mais elevado é atribuído outro novo valor – 255. Esta técnica consiste, portanto, na expansão do histograma original para a máxima amplitude dos níveis de cinzento proporcionada pelo sensor (256).

Um inconveniente relacionado com a expansão linear do histograma é o facto dos *pixels* originais dos extremos do histograma da imagem bruta, com um valor percentual baixo, ocuparem uma porção excessiva do novo intervalo da imagem contrastada. Este problema pode ser minorado se a técnica descrita for acompanhada de saturação do contraste (Sabins, 1997).

A saturação aplicada foi de 1%, o que significa que a 1% dos *pixels* mais escuros foi atribuído o valor 0 (1% dos *pixels* mais escuros foram saturados para preto) e a 1% dos *pixels* mais claros foi atribuído o valor de 255 (1% dos *pixels* mais claros foram saturados para branco). Os restantes 98% dos *pixels* originais foram expandidos para um novo intervalo de 1 a 254, por interpolação linear (Bakker *et al.*, 2004). O limiar de 1% escolhido, na saturação do contraste, visou evitar uma perda excessiva de informação.

Esta operação de realce linear de contraste com saturação de 1% foi executada para todas as bandas do sensor ETM+ (à excepção das bandas 6 – infravermelho térmico – e 8 – pancromática, que não foram usadas na elaboração das imagens compósitas, comentadas no subcapítulo III.3.2) e do sensor HRVIR. Os resultados obtidos melhoraram claramente o processo de interpretação visual, permitindo uma melhor discriminação dos elementos da imagem, tal como se comprova através da análise da Figura III.7: 2.

III.3.1.2 Melhoria do contraste espacial

No que concerne à segunda técnica de melhoramento de imagem utilizada, aplicou-se um filtro não direccional de realce de contornos (*"edge enhancement"*), que consiste numa técnica digital automática de detecção de elementos lineares. Esta técnica enfatiza diferenças locais nos níveis de cinza em estruturas lineares, como são os lineamentos estruturais (Bakker *et al.*, 2004).

As operações de filtragem têm como objectivo o realce visual de uma imagem e consistem em modificações do contraste espacial (daí serem também designados por filtros espaciais),

entendido como a diferença entre o nível digital de um determinado *pixel* e o dos seus vizinhos (Salinero, 2007).

Nestas operações, o valor numérico de cada *pixel* é modificado em função dos valores dos *pixels* vizinhos, ao contrário da técnica descrita anteriormente (expansão do contraste), que é feita em cada *pixel* isoladamente e não considera a sua vizinhança (Richards & Jia, 2006).

Essa modificação está dependente da matriz móvel de coeficientes de filtragem (*"kernel"*) utilizada. Um *"kernel"* é uma janela móvel composta por coeficientes que é movida pela imagem original, linha por linha e coluna por coluna. Na imagem resultante desta operação, o nível digital do centro do *"kernel"* obtém-se multiplicando cada coeficiente presente no *"kernel"* pelo nível digital correspondente na imagem original e somando os resultados dos produtos. Esta operação é feita para cada *pixel* na imagem original (Lillesand *et al.*, 2003).

Este filtro de realce de contornos aplicou-se a cada uma das bandas espectrais dos sensores ETM+ e HRVIR usadas nas composições coloridas (abordadas no subcapítulo III.2) e foi obtido por adição da imagem original com a imagem obtida por aplicação de filtro passa-alto de detecção de contornos (Richards & Jia, 2006).

Esta operação de filtragem foi feita banda a banda e o filtro aplicado foi não direccional, que realçou, portanto, os elementos lineares presentes em todas as direcções. Na aplicação deste filtro, utilizou-se uma matriz móvel de coeficientes de filtragem de 3x3 (cf. Figura III.8: 2).

A escolha de uma matriz com esta dimensão, ao considerar um total de oito *pixels* vizinhos, visou não exagerar o realce espacial da imagem, que, consequentemente, confundiria o processo de identificação de lineamentos, tornando-os imperceptíveis. Com vista a enfatizar os elementos lineares em todas as direcções, usou-se o mesmo valor (-1) para os coeficientes não centrais da matriz (Bakker *et al.*, 2004).

Para a escolha do valor do *pixel* central da matriz, efectuaram-se vários testes prévios em determinadas áreas-chave seleccionadas da imagem, aumentando e diminuindo o coeficiente central da matriz, que se traduzia, respectivamente, na diminuição e no incremento do realce dos elementos lineares. O valor 8 foi escolhido pelo facto de ter produzido os melhores resultados no realce visual desses elementos lineares.

A aplicação deste filtro foi bastante útil no processo de reconhecimento e marcação de lineamentos. Os resultados obtidos melhoraram claramente o processo de análise visual,

permitindo uma melhor discriminação dos elementos da imagem, tal como se comprova através da análise comparativa da Figura III.8: 1 e da Figura III.8: 3. Ao aumentar o detalhe geométrico na imagem, a aplicação deste filtro permitiu realçar zonas de fronteira entre áreas com níveis de cinza diferentes e, deste modo, enfatizou, tal como pretendido, elementos lineares no terreno.

III. 3. 2 Composições coloridas RGB e seu contributo para a identificação de lineamentos estruturais

Apesar de o olho humano ser considerado um sensor de detecção remota (passivo, pois depende exclusivamente da radiação naturalmente disponível), a sensibilidade espectral das suas células sensoriais apresenta limitações, pois estas apenas permitem registar uma parte da energia, designada «espectro visível» (intervalo espectral 0,4 – 0,7 μm).

Como refere SALINERO (2007), estas limitações têm sido contornadas através do desenvolvimento de sensores artificiais, a bordo de plataformas situadas a altitude variável, que permitem também medir energia não visível, como a ultravioleta, a infravermelha e a das microondas, para além de proporcionarem uma perspectiva diferente, vertical e panorâmica. Essa informação, que não é detectável pelo olho humano, é depois convertida em níveis de cinzento.

Uma composição colorida é obtida atribuindo uma das três cores primárias aditivas (vermelho, verde e azul; *red* (R), *green* (G) e *blue* (B)) a três bandas espectrais distintas da imagem, que não lhes correspondem necessariamente (Sabins, 1997; Mather, 2006).

É considerada composição colorida verdadeira aquela em que são atribuídas às bandas do sensor as cores primárias aditivas correspondentes. No caso do sensor ETM+ do Landsat 7, a composição colorida verdadeira é a 3-2-1 RGB. O sensor HRVIR, do satélite SPOT 4, não possibilita a elaboração de uma composição colorida verdadeira, porquanto não dispõe da banda correspondente ao azul (cf. Quadro 2). Esta composição colorida não foi trabalhada no presente estudo, em virtude de apresentar forte dispersão atmosférica (efeito caracterizado anteriormente), que se traduz na diminuição da resolução espacial e num baixo contraste entre os elementos da imagem. Por outro lado, o facto de incorporar exclusivamente bandas do domínio do visível, reduz a diversidade espectral da imagem, contendo apenas a mesma informação espectral que uma fotografia aérea, por exemplo, pois não contempla informação relativa ao domínio do infravermelho. Com efeito, a possibilidade de se observar um fenómeno em diversas bandas do espectro, não apenas no domínio do visível, amplia notavelmente a nossa capacidade em identificá-lo e reconhecê-lo.

No caso em que não se verifica total correspondência entre as bandas espectrais e os canais RGB atribuídos, as imagens compósitas criadas são denominadas imagens em “falsa cor” (as cores aparecem de forma artificial, não correspondendo à forma como os nossos olhos

percebem a realidade), frequentemente utilizadas em diversos estudos de análise visual (Sabins, 1997; Salinero, 2007).

A selecção das bandas para realizar uma composição colorida, bem como a ordem dos canais RGB atribuídos a cada uma, dependem do(s) sensor(es) utilizado(s), dos objectivos que se pretendem alcançar e das características da área de estudo.

III.3.2.1 Imagens compósitas do sensor ETM+

Para as imagens do sensor ETM+, a composição colorida mais comum consiste em seleccionar uma banda do visível, outra do infravermelho próximo e outra do infravermelho médio, identificando assim os três principais eixos de variação na imagem, excluindo o infravermelho térmico (Salinero, 2007). Porém, uma vez que o sensor ETM+ possui três bandas no domínio do visível e duas no infravermelho médio, a escolha das bandas mais adequadas para uma composição colorida afigura-se mais difícil e subjectiva.

De modo a se estabelecer um critério mais objectivo para esta selecção, têm sido propostos alguns índices estatísticos, tal como o «índice óptimo» (*Optimum Index Factor,* designado, doravante, pela sigla OIF), com o objectivo de contemplar melhor a variação original dos dados numa determinada área (Salinero, 2007). Em anexo, são apresentados os cálculos e os resultados deste índice para a área de estudo, tanto para o sensor ETM+ (Anexo 1), como para o sensor HRVIR (Anexo 2).

Várias composições coloridas têm sido apresentadas para o reconhecimento de estruturas geológicas e para a identificação de lineamentos (Sabins, 1997; Brum da Silveira, 2002; Pérez, 2002; Rabaça *et al.*, 2004; Silva *et al.*, 2006). A selecção das composições coloridas utilizadas no presente trabalho baseou-se, para além dos valores do OIF, nestes estudos prévios, embora se tenham verificado algumas diferenças nas suas aplicações, em virtude de as áreas de estudo possuírem contextos geológicos distintos, especificamente no que concerne ao tipo de litologia.

No que concerne aos dados do sensor ETM+, para a elaboração das imagens compósitas, excluíram-se as bandas 6 (infravermelho térmico) e 8 (pancromática), pelo facto de possuírem resolução espacial diferente das restantes.

As composições coloridas foram seleccionadas, portanto, de um universo de seis bandas (1, 2, 3, 4, 5 e 7). É possível escolher 3 bandas, de um grupo de 6, de 20 formas distintas (máximo de combinações possíveis), tendo em consideração que a ordem das bandas na composição não importa (por exemplo, 7-4-5 RGB e 5-7-4 RGB possuem a mesma informação espectral, o que varia é a atribuição das cores primárias aditivas), dado que,

$$C_s^n = \frac{n!}{s!.(n-s)!} \Leftrightarrow C_3^6 = \frac{6!}{3!.(6-3)!} \Leftrightarrow C_3^6 = \frac{6\times5\times4\times3\times2\times1}{3\times2\times1.(3\times2\times1)} \Leftrightarrow C_3^6 = 20$$

em que *s* é o número de subconjuntos de elementos diferentes que podem ser formados num conjunto de *n* elementos diferentes.

Destas 20 combinações possíveis, os três valores mais elevados do OIF obtiveram-se, respectivamente, para as composições 5-4-1, 7-4-1 e 7-5-1 (cf. Anexo 1), consideradas as que possuem informação espectral mais contrastante para a área em apreço. Saliente-se, a este propósito, que todas estas composições incorporam uma banda do visível, outra do infravermelho próximo e outra do infravermelho médio, o que constitui a situação mais comum para as imagens do sensor ETM+, quando se pretende obter o máximo de informação contrastante para uma dada área, tal como descrito anteriormente.

Procurou-se, com vista à identificação de lineamentos na área de estudo, elaborar composições coloridas que englobassem a banda 4, adequada para a cartografia geomorfológica e geológica, uma vez que, segundo Chuvieco (2007), os lineamentos podem estar associados à concentração de humidade, nitidamente visíveis nesta região do espectro, as bandas 4 e 5 (pelo facto de enfatizarem a topografia e o padrão de drenagem, de acordo com Sabins (1997) e Brum da Silveira (2002)), e a banda 7 (por se tratar, como assinala Sabins (1997), da mais indicada para a identificação de minerais) (cf. Quadro 2).

Seguidamente, apresentam-se as composições coloridas que foram produzidas para a identificação de lineamentos na área de estudo, tendo em consideração os dados do sensor ETM+. São igualmente listadas as respectivas características, bem como as vantagens e desvantagens (resultados) na prossecução desse objectivo, que a tarefa da análise visual permitiu identificar.

- **5-4-3 RGB –** Apesar de a composição colorida 5-4-1 ter obtido o valor mais alto do OIF para a área de estudo, optou-se, contudo, por seleccionar, em vez desta, a composição 5-4-3 RGB (cf. Figura III.10: 1). A banda azul (1) foi preterida pela vermelha (3), por esta

ser a banda do visível menos sensível à dispersão atmosférica, devido aos maiores comprimentos de onda.

Das composições coloridas RGB utilizadas, esta foi a que maiores potencialidades ofereceu na identificação de lineamentos em áreas com cobertura vegetal de densidade variável. Esta composição colorida denomina-se "pseudo-verdadeira", dado que a vegetação continua a ser representada em tons de verde, facilitando o processo de interpretação visual (Salinero, 2007).

As diferenças no comportamento espectral da vegetação são realçadas, pois é utilizada a banda do infravermelho próximo (banda 4: 0,75 – 0,90 μm), que coincide com o máximo poder reflexivo deste elemento da paisagem (cf. Figura III.3). A utilização desta banda do espectro permite, não só a diferenciação entre tipos de vegetação, mas também a destrinça entre áreas com cobertura vegetal e áreas com outro tipo de ocupação, tal como se evidencia no Quadro 2. A vegetação apresenta-se em tons esverdeados, pois à banda 4 foi atribuído o canal verde, o que permite, como se disse atrás, uma grande familiarização no processo de interpretação. Nas áreas com cobertura vegetal, os lineamentos destacam-se por apresentar tonalidades de verde mais claras (áreas associadas a concentração de humidade), distinguindo-se nitidamente dos elementos envolventes. Esta composição colorida evidenciou grandes contrastes de cor entre os objectos e, por essa razão, foi considerada bastante vantajosa na identificação de lineamentos em áreas com cobertura vegetal.

Nas áreas de rocha nua, a diversidade espectral é mais limitada e, por essa razão, outras composições coloridas afiguraram-se mais vantajosas na identificação de lineamentos.

- **5-7-3 RGB** – Das composições utilizadas, foi a que melhor se ajustou à identificação de lineamentos em áreas de rocha exposta. Nestas áreas, os lineamentos destacavam-se dos elementos envolventes por apresentarem tons acastanhados, que contrastavam claramente com as tonalidades bege e cinza (maioritariamente) dos afloramentos rochosos (cf. Figura III.10: 2). Revelou-se também útil para fazer a destrinça na interpretação visual entre lineamentos e caminhos (alvos que apresentam uma forma e uma textura muito similares), nas situações em que a cor era muito parecida noutras composições coloridas. Os caminhos e as estradas são realçados, nesta composição colorida, por cores esbranquiçadas.

Por outro lado, esta composição colorida ressalta as diferenças litológicas (Pérez, 2002) e, portanto, revelou-se útil na identificação de lineamentos correspondentes a limites geológicos.

Nas áreas com densa cobertura vegetal, revelou-se, contudo, pouco útil, ao contrário de outras composições coloridas. Das bandas utilizadas nesta composição, aquela em que a vegetação possui maior poder reflexivo é a 5 (cf. Figura III.3), mas, tal como referido anteriormente, a reflectância deste elemento é manifestamente maior no infravermelho próximo (banda 4) e, portanto, os contrastes relativamente aos elementos envolventes são francamente menores. Desta forma, a identificação de lineamentos através das características espectrais da vegetação foi dificultada. Ao contrário do que sucedeu, por exemplo, com a composição 5-4-3, em que elementos lineares com tonalidades mais claras poderiam significar a existência de lineamentos, a menor reflectância da vegetação nesta composição colorida contribuiu para uma maior homogeneização dos elementos na imagem, dificultando a sua diferenciação. Em jeito de síntese, esta composição colorida evidenciou poucas potencialidades na identificação de lineamentos nas áreas com cobertura vegetal, em virtude do facto de os objectos apresentarem respostas espectrais menos contrastantes.

- **7-4-1 RGB –** Esta composição, que obteve o segundo valor mais alto do OIF, revelou grande utilidade na identificação de lineamentos em áreas com cobertura vegetal (cf. Figura III.10: 3), à semelhança da composição 5-4-3, pelas razões expostas anteriormente. De salientar, contudo, que ofereceu mais vantagens na detecção de lineamentos correspondentes a limites geológicos, uma vez que é utilizada a banda 7, indicada para estudos geológicos e geomorfológicos, tal como se demonstra no Quadro 2. Apesar da composição 7-5-4 RGB também incorporar a banda 7, o reconhecimento de lineamentos correspondentes a limites geológicos foi mais facilitado através do recurso à composição 7-4-1, pois esta apresenta maior diversidade espectral que aquela, permitindo, por conseguinte, obter maiores contrastes espectrais entre os elementos.

- **7-5-4 RGB –** Esta composição apresenta uma diversidade espectral limitada, por não serem utilizadas bandas do domínio do visível (Sabins, 1997; Brum da Silveira, 2002),

pelo que o seu contributo para a identificação de lineamentos foi limitado (cf. Figura III.10: 4). No entanto, do conjunto de composições coloridas RGB seleccionadas, esta possui máxima resolução espacial (Sabins, 1997; Brum da Silveira, 2002), exactamente por não serem utilizadas bandas do visível, onde o efeito da dispersão atmosférica é mais acentuado. Por estas razões, foi seleccionada para permitir análises de maior escala.

É de sublinhar que a composição colorida 7-5-1 RGB não revelou grande utilidade na identificação de lineamentos, tanto nas áreas de rocha exposta, como nas áreas com cobertura vegetal (cf. Figura III.11), não obstante ter obtido o terceiro valor mais alto do OIF, pelo facto de apresentar baixos contrastes entre os elementos, dificultando a sua diferenciação, em virtude das cores presentes na imagem.

Conclui-se, assim, que as composições coloridas que obtiveram maiores valores do OIF não são necessariamente as mais adequadas para o reconhecimento visual de lineamentos, uma vez que não realçam estruturas lineares no terreno, mas sim a máxima variação da informação espectral.

III.3.2.2 Imagens compósitas do sensor HRVIR

No que diz respeito ao sensor HRVIR, do satélite SPOT 4, calculou-se igualmente o OIF para determinar as composições mais adequadas à visualização da informação espectral mais contrastante da área de estudo.

As composições coloridas foram elaboradas a partir de um total de quatro bandas espectrais – 1, 2, 3 e 4 (a banda pancromática não foi utilizada, pelo mesmo motivo que foi referido anteriormente). O número máximo de combinações permitido, tendo em conta o número de bandas, é, agora, de 4, ou seja, é possível escolher 3 bandas, de um grupo de 4, de 4 formas distintas, visto que:

$$C_s^n = \frac{n!}{s!.(n-s)!} \Leftrightarrow C_3^4 = \frac{4!}{3!.(4-3)!} \Leftrightarrow C_3^4 = \frac{4\times 3\times 2\times 1}{3\times 2\times 1\times 1} \Leftrightarrow C_3^4 = 4$$

Os valores mais elevados do OIF obtiveram-se, respectivamente, para as composições 4-3-2, 4-3-1, 3-2-1 e 4-2-1 (cf. Anexo 2). As duas primeiras englobam uma banda do infravermelho médio (4), outra do infravermelho próximo (3) e outra do visível (1 / 2), detendo, desta forma, o máximo de informação espectral contrastante sobre a área de estudo. As duas últimas já possuem menor diferenciação ao nível da informação espectral (daí obterem OIF menores), na medida em que incorporam duas bandas do visível, muito próximas, em que os objectos apresentam assinaturas espectrais mais parecidas.

A seguir, destacam-se as composições coloridas que foram elaboradas para a identificação de lineamentos na área de estudo, tendo em consideração os dados do sensor HRVIR. Listam-se, igualmente, as respectivas características, bem como as vantagens e desvantagens (resultados) na prossecução desse objectivo, com base no processo da análise visual.

- **4-3-2 RGB –** Esta foi a composição colorida que se afigurou mais vantajosa para a identificação de lineamentos da área de estudo, especialmente nas áreas com cobertura vegetal (cf. Figura III.12: 1). A análise do Quadro 2 e da Figura III.3 permite constatar que esta composição colorida é a correspondente à composição 5-4-3 RGB do sensor ETM+, apesar de as bandas espectrais terem intervalos ligeiramente diferentes nos dois sensores.

  Assim, tal como referido na caracterização da composição 5-4-3 (ETM+), a vegetação apresenta-se em tons esverdeados (à banda 3 foi atribuído o canal verde) e são realçadas as diferenças no seu comportamento espectral. A detecção de lineamentos foi possível através da diferença dos tons de verde da vegetação, pois estas estruturas lineares sobressaem por apresentarem tonalidades de verde mais claras, distinguindo-se nitidamente dos elementos envolventes, inclusive nas próprias áreas com vegetação.

- **4-2-1 RGB –** Esta composição colorida (cf. Figura III.12: 2) permitiu uma melhor diferenciação entre lineamentos e caminhos e estradas, pois estes são realçados por cores esbranquiçadas, enquanto aqueles são destacados por tons acastanhados. Esta diferenciação, na interpretação visual da composição 4-3-2, foi mais difícil, pois estes dois tipos de elementos apresentavam, frequentemente, cor semelhante, não

obstante ser esta a composição que se afigurou mais vantajosa na identificação de lineamentos.

- **3-2-1 RGB –** Esta composição (cf. Figura III.12: 3) revelou-se vantajosa para a identificação de lineamentos nas áreas de rocha exposta. As estruturas lineares destacavam-se por apresentar uma tonalidade avermelhada, que contrastava com as tonalidades acinzentadas dos maciços rochosos expostos.

É de salientar que a composição colorida 4-3-1 RGB (cf. Figura III.12: 4), que registou o segundo valor mais alto do OIF para os dados do sensor HRVIR, não acrescentou informação à que foi possível extrair a partir da composição 4-3-2. Com efeito, a informação espectral que a composição 4-3-1 proporciona é muito semelhante à 4-3-2, na medida em que a única diferença reside na utilização da banda 1 (verde), em vez da banda 2 (vermelho). Como se tratam de bandas muito próximas no espectro, a informação espectral que facultam é semelhante. Aliás, preferiu-se utilizar a composição RGB 4-3-2, pelo facto de a banda 2, associada a comprimentos de onda maiores que a banda 1, ser menos sensível ao efeito da dispersão atmosférica, caracterizado no subcapítulo II.1.

III. 4 Detecção e identificação de lineamentos estruturais: critérios

III. 4. 1 O conceito de lineamento estrutural

O termo lineamento estrutural, em assuntos geológicos, foi utilizado primeiramente por Hobbs (1904), como sendo "linhas marcantes da paisagem que revelam a arquitectura escondida do substrato rochoso."

Numa definição mais actual, também podemos considerar que os lineamentos estruturais são características lineares naturais que podem ser traçadas a partir das imagens da fotografia aérea ou de outros dados de detecção remota, como as imagens de satélite (Gomes, 2008).

Nesse sentido, podem ser entendidos como elementos lineares mapeáveis, que diferem dos padrões patentes para áreas adjacentes e reflectem, presumivelmente, estruturas subsuperficiais (O' Leary *et al.*, 1976).

Estes elementos lineares podem ser detectados pelo alinhamento linear de estruturas morfológicas como vales e escarpas, bem como por características tonais que, em muitas áreas, são expressões superficiais de fracturas ou falhas (Lillesand *et al.*, 2003).

De um modo mais abrangente, podemos descrever um lineamento como "um elemento linear cartografável, simples ou composto, de características rectilíneas ou ligeiramente curvilíneas, observado à distância e na superfície da Terra, relacionado com um fenómeno geológico/geomorfológico natural, não antrópico" (Brum da Silveira, 2002), revelador de uma falha ou de outra linha de fraqueza da crusta terrestre (Sabins, 1997).

Estas estruturas lineares podem estar associadas a acidentes tectónicos cartografados (falhas certas ou prováveis), podem ser de natureza estratigráfica (correspondendo, no geral, a limites geológicos ou contactos litológicos) e, ainda, podem corresponder a alinhamentos de filões, sem estarem associados a acidentes tectónicos cartografados (Silva *et al.*, 2006). No presente estudo não se seguiu esta categorização dos lineamentos, atendendo ao objectivo que a ele preside, pelo que tais estruturas lineares, independentemente da categoria, serão aqui agrupadas sob a designação genérica de «lineamentos estruturais».

A interpretação de imagens de satélite é uma etapa prévia crucial para a maioria dos trabalhos de cartografia geológica e geomorfológica que se baseiam em apurado trabalho de campo, especialmente quando se estudam áreas remotas (Lillesand *et al.*, 2003). Com efeito, a percepção visual do ser humano apresenta limitações, dado que, por um lado, a sensibilidade espectral das nossas células sensoriais, isto é, dos nossos olhos, é restrita (só nos permitem ver, tal como referido no subcapítulo II.1, um determinado tipo de energia, que corresponde ao denominado espectro visível) e, por outro, a nossa própria estatura restringe, tanto a área que conseguimos visualizar, como a perspectiva de visualização (Salinero, 2007).

Para além disso, o levantamento de estruturas geomorfológicas e geológicas no terreno era, tradicionalmente, apenas feito através de longos períodos de trabalho de campo dispendioso e penoso, por vezes em terrenos de difícil acesso e com más condições de observação.

O recurso a sensores artificiais, a bordo de plataformas a altitudes diversas, permite atenuar estas limitações, ao proporcionar o acesso a tipos de energia não visíveis (ultravioleta, infravermelho e microondas) e ao facultar uma nova perspectiva, vertical e panorâmica, o que amplia notavelmente os nossos conhecimentos sobre o meio que nos rodeia.

Face às fotografias aéreas, as imagens de satélite permitem uma visão sinóptica, de áreas maiores (devido à maior altitude a que se encontra a plataforma), o que possibilita, em cenas únicas, a análise do retrato geológico da superfície terrestre numa escala regional (Lillesand *et al.*, 2003). Por essa razão, tornam desnecessária a junção de várias fotografias aéreas, que muitas vezes são captadas em datas diferentes, alterando a resposta espectral dos objectos. Por outro lado, permitem trabalhar, simultaneamente, com várias bandas espectrais (as fotografias aéreas só colhem informação numa banda do espectro, que corresponde ao domínio do visível – cf. Figura II.4), o que facilita a detecção e a identificação de estruturas geológicas e geomorfológicas, pois possibilita a sua melhor diferenciação. Determinadas bandas importantes para a cartografia geológica e geomorfológica, no domínio do infravermelho, não podem ser fotografadas, mas podem ser detectadas por sensores multiespectrais ou hiperespectrais.

Na Figura III.9 compara-se, a título de exemplo, a informação espectral proporcionada pela fotografia aérea com a informação espectral proporcionada pela imagem de satélite (sensor HRVIR, neste caso) num excerto da área de estudo. Constata-se que a identificação de

lineamentos estruturais é muito mais facilitada na imagem de satélite, por se utilizarem bandas mais afastadas do espectro, em que os alvos possuem respostas espectrais mais distintas. Na fotografia aérea, essa tarefa é mais dificultada, por dois motivos. Por um lado, utiliza-se uma única banda, restrita, do espectro (0,4 – 0,7 μm), em que os alvos apresentam um comportamento mais semelhante. Por outro, a forte dispersão atmosférica nesta região do espectro diminui a resolução espacial da imagem, dificultando o reconhecimento e a identificação destas estruturas lineares.

Outras vantagens poderiam ser ainda apontadas, como a maior periodicidade de aquisição das imagens (não é necessário programar o voo, como sucede com as fotografias aéreas).

III. 4. 2 Critérios de identificação

Tal como referido anteriormente, as imagens de satélite são adquiridas em formato numérico, sendo compostas por *pixels* associados a níveis digitais (intensidade radiométrica). Estes podem ser convertidos em níveis de cinza ou em níveis de cor (no caso de composições coloridas), proporcionando a interpretação visual. Consequentemente, as imagens podem ser interpretadas digital ou visualmente.

Ao contrário do tratamento digital, que se baseia, quase exclusivamente, na intensidade radiométrica de cada *pixel* em cada banda utilizada, a análise visual permite incorporar, na interpretação da imagem, outros critérios, como a textura, a estrutura e a disposição, critérios esses muito difíceis de definir em termos digitais.

No processo de interpretação visual de imagens de satélite, empregam-se os seguintes critérios de identificação, similares aos da foto-interpretação clássica (Salinero, 2007):

- **Brilho:** este elemento faz referência à intensidade de energia recebida pelo sensor para uma determinada banda do espectro. Obviamente, o brilho de um determinado alvo varia em função da banda utilizada: a vegetação, por exemplo, aparece em tons mais claros na banda do infravermelho próximo do que na banda do vermelho;
- **Cor:** a cor que os nossos olhos percebem é fruto da reflectividade selectiva dos objectos em diferentes comprimentos de onda. Um elemento que apresente a cor verde, significa que apresenta alta reflectividade na banda verde, e baixa nas

restantes. A cor que os alvos apresentam depende, logicamente, das composições coloridas RGB utilizadas;

- **Textura:** a textura faz referência à heterogeneidade espacial de um alvo, no que concerne ao contraste espacial entre os elementos que o compõem. Se essa heterogeneidade for elevada, o objecto apresentar-se-á, visualmente, com grande rugosidade; se for baixa, apresentar-se-á com grande suavidade;
- **Contexto espacial:** por contexto espacial entende-se a localização de determinados alvos em relação a elementos vizinhos da imagem. A classificação digital não considera o contexto geográfico: por exemplo, determinados jardins no interior de uma área urbana podem ter um tom, cor e textura muito similares a uma floresta natural de caducifólias. A separação destes elementos implica a análise do contexto espacial: os que surgem em áreas edificadas são parques urbanos;
- **Sombras:** um mesmo alvo pode apresentar reflectividades diferentes dependendo da exposição geográfica das vertentes (soalheira ou úmbria) e, portanto, há que ter em conta este elemento, de modo a evitar demarcar fronteiras quando as diferenças residem apenas nas condições de iluminação.
- **Padrão espacial:** este critério diz respeito à organização peculiar dos objectos que formam uma determinada cobertura (ex: plantações artificiais de eucaliptos, campos de golfe, etc.);
- **Forma e tamanho:** a forma de um alvo é importante para a sua identificação, já que o seu contorno permite associá-lo a um padrão familiar. A forma permite a distinção, por exemplo, entre estradas e linhas de caminho-de-ferro (de traçado menos sinuoso), entre rios e canais artificiais (estes últimos com um aspecto mais geométrico). A forma permite igualmente reconhecer estruturas geológicas bem definidas, como por exemplo lineamentos. O tamanho complementa a identificação de uma cobertura: por exemplo, a forma de um campo de ténis e de um campo de futebol é similar, mas não o seu tamanho.

No caso específico de estruturas geomorfológicas como os lineamentos, estas podem ser reconhecidas visualmente, em fotografias aéreas ou em imagens de satélite, como assinala BRUM DA SILVEIRA (2002), através da identificação de elementos lineares (traços ou linhas) que se distinguem, por exemplo, através de diferenças na tonalidade, cor, contraste, variações

de textura ou de padrões pictóricos de áreas, relacionados, entre outros, com a diversidade na vegetação, teor de humidade, tipo de substrato rochoso ou composição dos solos.

Face ao exposto, definiram-se duas categorias de critérios para a identificação de lineamentos estruturais na área de estudo: a informação radiométrica e a geometria do lineamento. Relativamente à primeira, os lineamentos foram reconhecidos pelo seu brilho, cor e textura. No que concerne à segunda, foram identificados pela sua forma, tamanho, continuidade e contexto espacial.

É de salientar que, no caso particular da cena do sensor HRVIR, do satélite SPOT 4, adquirida no dia 23/08/2006, são visíveis muitas áreas ardidas, pelo facto de ter sido um ano em que o território de Portugal Continental foi bastante fustigado por incêndios (cf. Figura III.13: E e F – manchas *bordeaux*). Apesar de a assinatura espectral da vegetação ter mudado nestas áreas (quando comparada com a da vegetação saudável), fruto dos incêndios, e de ter produzido, consequentemente, alterações no brilho e na cor, os lineamentos continuam a ser facilmente distinguidos por outros critérios de interpretação visual, como a forma, a textura e a continuidade.

Estabeleceu-se, ainda, uma terceira categoria para a identificação destas estruturas lineares, denominada estrutura geológica, em que os lineamentos foram reconhecidos pela sua direcção, paralelismo e continuidade (Feio & Brito, 1949; Keller & Pinter, 1996; Keller, 2002; Gomes, 2008). O Quadro 3 sintetiza os critérios utilizados na identificação dos lineamentos estruturais da área de estudo integrados nas respectivas categorias. A Figura III.13 ilustra o processo de identificação de lineamentos em vários sectores da área de estudo, segundo os critérios definidos e respectiva simbologia. O Quadro 4 destaca o reconhecimento de alguns dos critérios utilizados na identificação dos lineamentos detectados na Figura III.13.

III. 5 Marcação e análise de lineamentos: metodologias

III. 5. 1 Vectorização e incorporação em ambiente SIG

A marcação de lineamentos consubstanciou-se nos critérios de detecção e identificação caracterizados anteriormente. Para tal, criou-se um ficheiro vectorial de linhas, no software *ArcGis 9.2*, e o processo de vectorização de lineamentos foi realizado por análise visual sobre imagens expostas no monitor, segundo o esquema da Figura III.14: 4.

Assim, numa primeira fase, marcaram-se todos os lineamentos detectados e reconhecidos nas imagens compósitas do sensor HRVIR, às quais foram aplicadas as técnicas de melhoramento da qualidade visual descritas anteriormente (melhoria do contraste tonal e do contraste espacial) (cf. Figura III.14: 1).

A vectorização foi realizada sobre as imagens ampliadas até à escala 1/50000, estipulada como limite máximo de análise visual, atendendo à resolução espacial proporcionada pelo sensor e à consequente perda de inteligibilidade dos dados (Salinero, 2007).

As imagens utilizadas nesta primeira fase foram as do sensor HRVIR, pelo facto de este possuir, como se referiu anteriormente, excelente precisão geométrica, superior à do ETM+.

Os lineamentos marcados nestas imagens foram, depois, complementados com os lineamentos vectorizados sobre as imagens compósitas do sensor ETM+, também realçadas visualmente (cf. Figura III.14: 2).

A escala de análise máxima utilizada para a marcação de lineamentos sobre estas imagens foi a escala 1/100000, por ser considerada, pela Associação Cartográfica Internacional, a escala limite mais idónea para a análise dos dados do sensor ETM+ (Salinero, 2007), em virtude da sua resolução espacial.

A inclusão da análise de imagens do sensor ETM+ na marcação de lineamentos, apesar de estas abarcarem a mesma área que as imagens do sensor HRVIR, prendeu-se com o facto de as imagens dos dois sensores terem sido captadas em datas diferentes, com ângulos de elevação e azimutes do Sol distintos, o que possibilitava a identificação e vectorização de lineamentos que nas imagens do sensor HRVIR não eram realçados. Por outro lado, como se disse

anteriormente, o sensor ETM+ possui um maior número de bandas que o HRVIR, permitindo, assim, a elaboração de imagens compósitas com informação espectral adicional.

Na terceira fase de marcação de lineamentos, complementaram-se os resultados obtidos pelos processos anteriores com os aspectos geomorfológicos realçados pelo mapa de sombreado, *i. e.*, obtido a partir do MDE (cf. Figura III.14: 3), ampliado até à escala limite de 1/25000, uma vez que as curvas de nível que serviram de base à construção deste modelo possuíam esta escala. Porque nesta fase se utilizaram escalas de análise mais pormenorizadas, o mapa de sombreado permitiu melhorar a precisão da localização dos lineamentos marcados nas fases anteriores, sobretudo os vectorizados sobre as imagens do sensor ETM+, cujas escalas de análise proporcionavam menor pormenor e, consequentemente, menor rigor no seu traçado. Para além da melhoria do traçado cartográfico, o mapa de sombreado possibilitou a vectorização de mais lineamentos, principalmente nas áreas fortemente urbanizadas, em que a interpretação visual sobre as imagens de satélite apresentava, evidentemente, limitações.

III. 5. 2 Análise de orientações e distribuição espacial

Com vista à identificação das direcções principais dos lineamentos, cada um destes elementos lineares foi dividido em segmentos, de modo a que o cálculo das direcções fosse aplicado a cada segmento e não ao lineamento todo, pois, sendo este, em muitos casos, longo e curvilíneo, as suas várias direcções poderiam ser disfarçadas pela média do lineamento total. Por outras palavras, e seguindo a metodologia usada por López (2003) e Gomes (2008), no caso de lineamentos de maior comprimento, procedeu-se à sua segmentação em troços mais curtos que apresentam a mesma direcção. Cada linha representa, assim, o segmento de um lineamento que possui a mesma direcção média.

Para o cálculo automático da direcção de cada segmento, utilizou-se, no sotware *ArcGis 9.2*, o *Arcscript Find Polyline Angle* (aplicação do tipo *shareware*, disponível em http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=14234). Este aplicativo toma em consideração as coordenadas x e y do ponto inicial e final de cada segmento, calculando a direcção que se estabelece entre elas, o que permite calcular a orientação angular dos segmentos em relação

ao norte geográfico considerado no mapa. O cálculo é adicionado à tabela de atributos, mediante a criação de um novo campo, chamado *GeoAngle*[8] (Gomes, 2008).

Obtida a orientação angular de cada segmento, procedeu-se, depois, à sua análise estatística, tendo-se elaborado, para o efeito, um gráfico de frequência – diagrama de roseta, que indicou as direcções dominantes. A roseta de orientações dos segmentos cartografados foi realizada através do software *Grapher 6.1*.

Na representação gráfica azimutal dos segmentos, as direcções foram filtradas segundo quatro orientações preferenciais (N0 a N45; N45 a N90; N90 a N135 e N135 a N180), de modo a obter-se mapas parciais que evidenciassem o significado de algumas direcções.

Com o intuito de se proceder à análise da distribuição espacial dos lineamentos, elaboraram-se mapas de densidades dos lineamentos totais e dos lineamentos filtrados pelas quatro orientações supramencionadas. Estes mapas foram elaborados no software *ArcGis 9.2*, através da função *line density*. Esta função calcula o número de linhas que atravessam uma determinada célula, de tamanho previamente definido. Por outras palavras, calcula a densidade de elementos lineares numa dada célula. Desta forma, quanto maior for o número de linhas (neste caso, lineamentos), a atravessar uma determinada célula, maior será a sua densidade.

[8] Para além do campo *GeoAngle*, este aplicativo fornece também o ângulo aritmético *(AriAngle)*, que não foi utilizado neste trabalho.

	ETM+ (Landsat 7)	HRVIR (SPOT 4)
Lançamento	15/04/1999	24/03/1998
Situação actual	Inactivo (2003)	Activo
Tipo de plataforma	Espacial (satélite a 705 km de altitude)	Espacial (satélite a 823 km de altitude)
Tipo de órbita	Heliossíncrona, circular e quase polar	Heliossíncrona, circular e quase polar
Cobertura espacial (área de varrimento) – tamanho da cena	185 x 170 km	60 x 60 km até 80 km
Inclinação	98,2º	98º
Tempo de duração da órbita	98,9 minutos	101, 4 minutos
Horário de passagem	10:00 A.M.	10:30 A.M.
Resolução espacial	B1 – 30 m B2 – 30 m B3 – 30 m B4 – 30 m B5 – 30 m B6 – 60 m B7 – 30 m B8 (PAN) – 15 m	B1 – 20 m B2 – 20 m B3 – 20 m B4 – 20 m M (PAN) – 10 m
Resolução espectral	8 bandas: B1 – 0.45-0.515 µm B2 – 0.525-0.605 µm B3 – 0.63-0.69 µm B4 – 0.75-0.90 µm B5 – 1.55-1.75 µm B6 – 10.4-12.5 µm B7 – 2.09-2.35 µm B8 (PAN) – 0.52-0.90 µm	5 bandas: B1 – 0.50-0.59 µm B2 – 0.61-0.68 µm B3 – 0.78-0.89 µm B4 – 1.58-1.75 µm M (PAN) – 0.61-0.68 µm
Resolução radiométrica	8 bits	8 bits
Resolução temporal	16 dias	26 dias no nadir; 2-3 dias com vista não nadiral

Quadro 1 – Características gerais dos sensores utilizados (fonte: http://landsat.usgs.gov/ e www.spotimage.com).

Bandas ETM+ (Land. 7)	Intervalos espectrais (µm)	Domínio do espectro	Aplicações genéricas	Bandas HRVIR (SPOT 4)
1	0,45–0,515	Azul	– Cartografia de águas pouco profundas; – Estudos batimétricos; – Detecção de turvação e poluentes na água; – Detecção de traçados de correntes em corpos de água; – Identificação de fumos, provenientes de incêndios ou da actividade industrial; – Diferenciação entre solo e vegetação; – Diferenciação entre vegetação conífera e decídua.	_____
2	0,52 –0,605	Verde	– Detecção de sedimentos em suspensão na água; – Estudos de qualidade da água; – Cartografia de vegetação; – Avaliação do vigor das plantas.	**1** (0.50–0.59 µm)
3	0,63–0,69	Vermelho	– Discriminação entre áreas cobertas com vegetação e áreas com solo exposto; – Diferenciação de espécies vegetais, por ser uma banda de absorção da clorofila; – Delimitação de áreas urbanas e do traçado das vias; – Cartografia do uso do solo; – Cartografia da ocupação agrícola; – Estudos de qualidade da água.	**2** (0.61–0.68 µm)
4	0,75–0,90	Infravermelho próximo	– Delimitação entre solo e corpos de água; – Cartografia geomorfológica; – Cartografia geológica; – Cartografia de vegetação; – Identificação de tipos de vegetação; – Cartografia de áreas de vegetação queimada; – Determinação da quantidade de biomassa da vegetação.	**3** (0.78–0.89 µm)
5	1,55–1,75	Infravermelho médio *(shortwave)*	– Identificação do teor de humidade do solo e das plantas; – Identificação de stress na vegetação causado pela falta de água; – Discriminação entre tipos de vegetação; – Diferenciação entre nuvens, neve e gelo.	**4** (1.58–1.75 µm)
6	10,4–12,5	Infravermelho térmico	– Cartografia de stress térmico em plantas; – Cartografia de correntes marítimas; – Cartografia da temperatura de águas oceânicas superficiais; – Detecção de focos de calor; – Propriedades térmicas do solo; – Estudos de fenómenos de “ilhas de calor urbano”.	_____
7	2,09–2,35	Infravermelho médio *(shortwave)*	– Identificação de minerais; – Cartografia hidrotermal; – Estudos de geomorfologia e geologia; – Detecção de humidade no solo e na vegetação.	_____
8	0,5 –0,9	Pancromático	– Obtenção de produtos cartográficos de maior qualidade, através da aplicação de técnicas de fusão de dados.	**M** (0.61–0.68 µm)

Quadro 2 – Características das bandas espectrais do sensor ETM+ (Landsat 7), aplicações genéricas (com base em Sabins, 1997; Sausen, 1997; e Salinero, 2007) e respectiva correspondência com as bandas espectrais do HRVIR (SPOT 4).

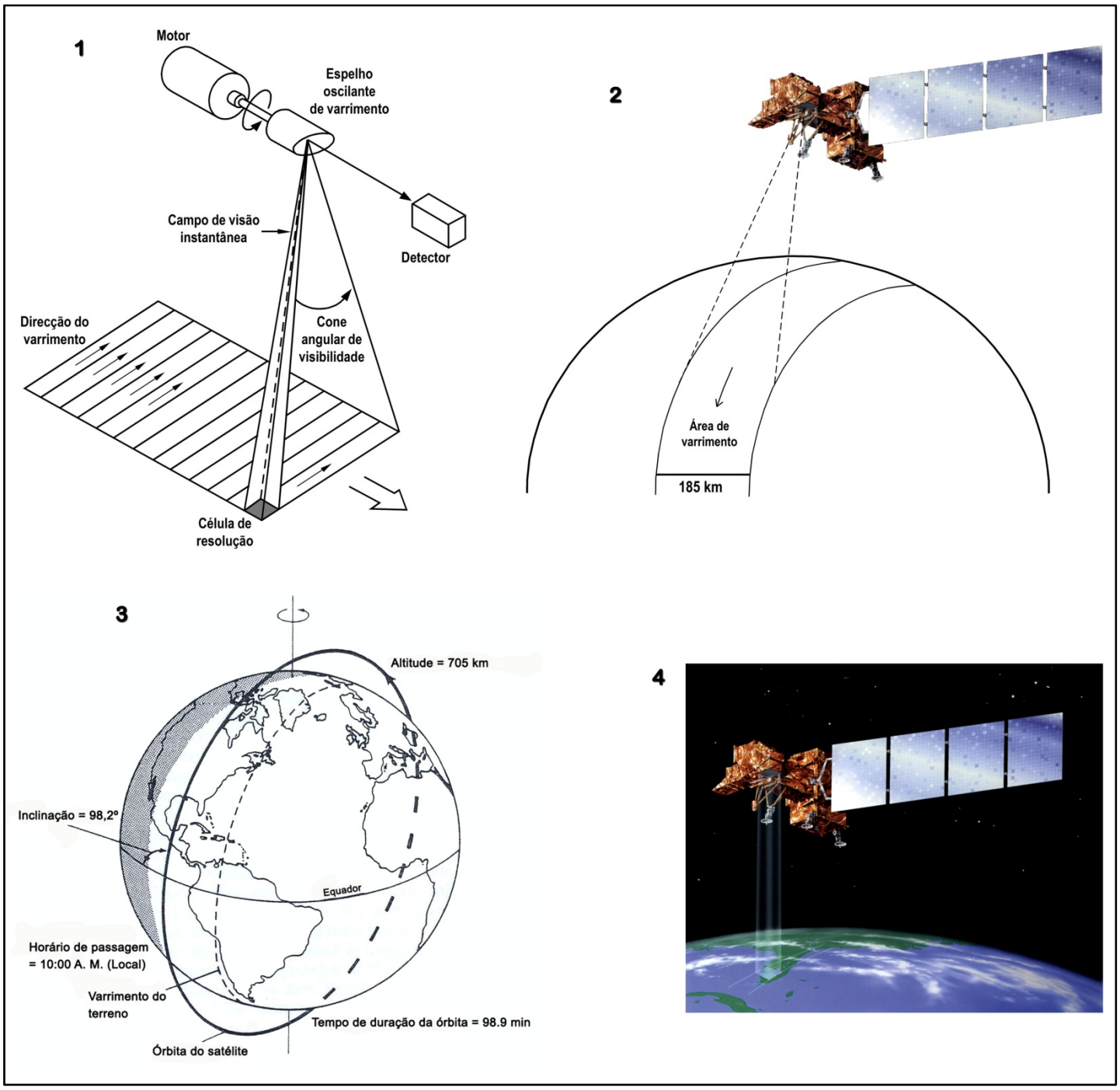


Figura III.1 – 1: Modo de varrimento da superfície terrestre do sensor ETM+ (varrimento mecânico) (adaptado de Sabins, 1997); 2: Área de varrimento do sensor ETM+; 3: Características da órbita do sensor ETM+ (adaptado de Lillesand *et al.*, 2003); 4: Aspecto do Landsat 7 (http://nasascience.nasa.gov/).

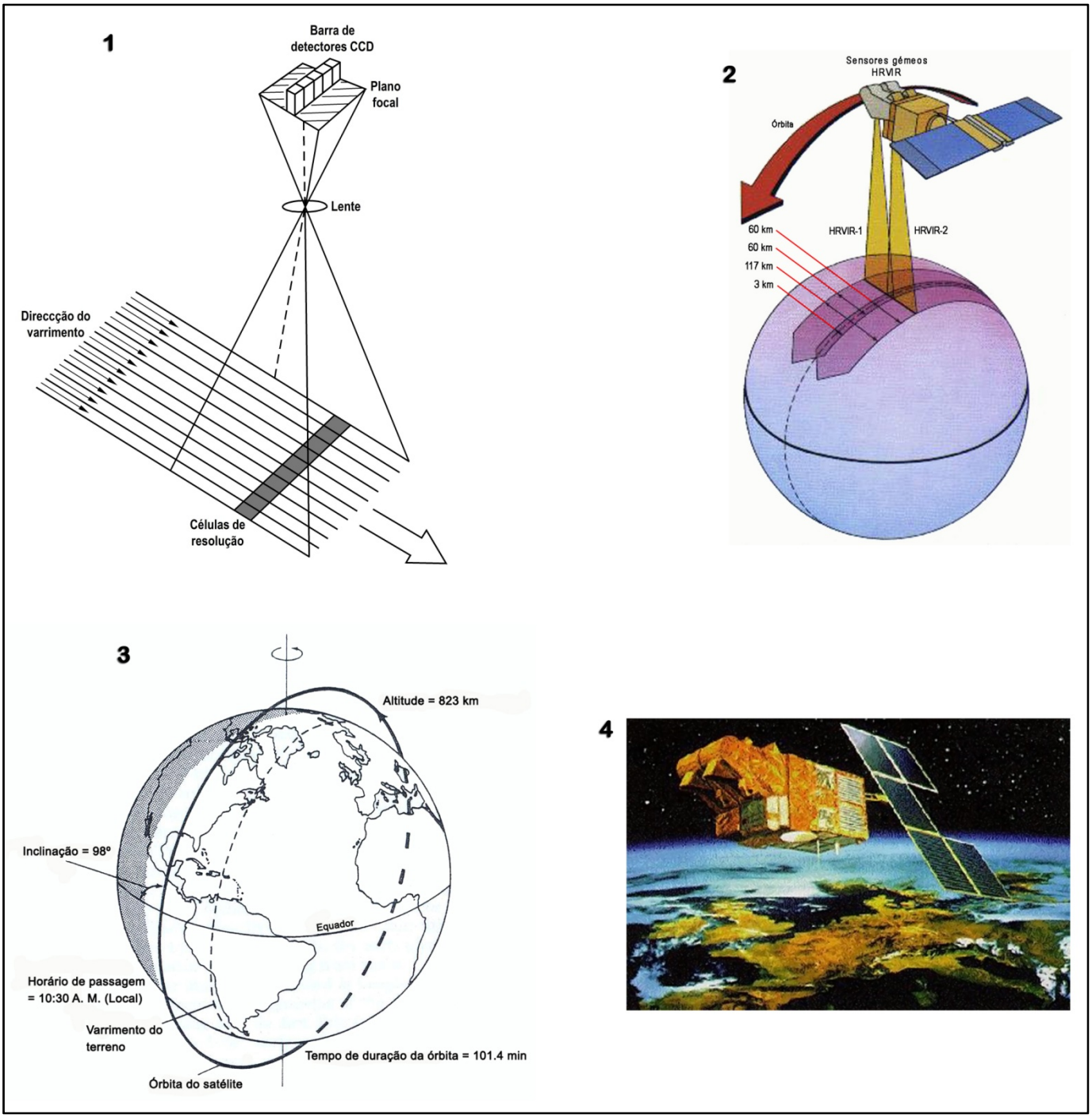


Figura III.2 – 1: Modo de varrimento da superfície terrestre do sensor HRVIR (matriz linear) (adaptado de Sabins, 1997); 2: Área de varrimento dos sensores gémeos HRVIR (visão nadiral) (adaptado de: www.physics.nus.edu.sg/); 3: Características da órbita do sensor HRVIR (adaptado de Lillesand *et al.*, 2003); 4: Aspecto do SPOT 4 (http://ceos.cnes.fr).

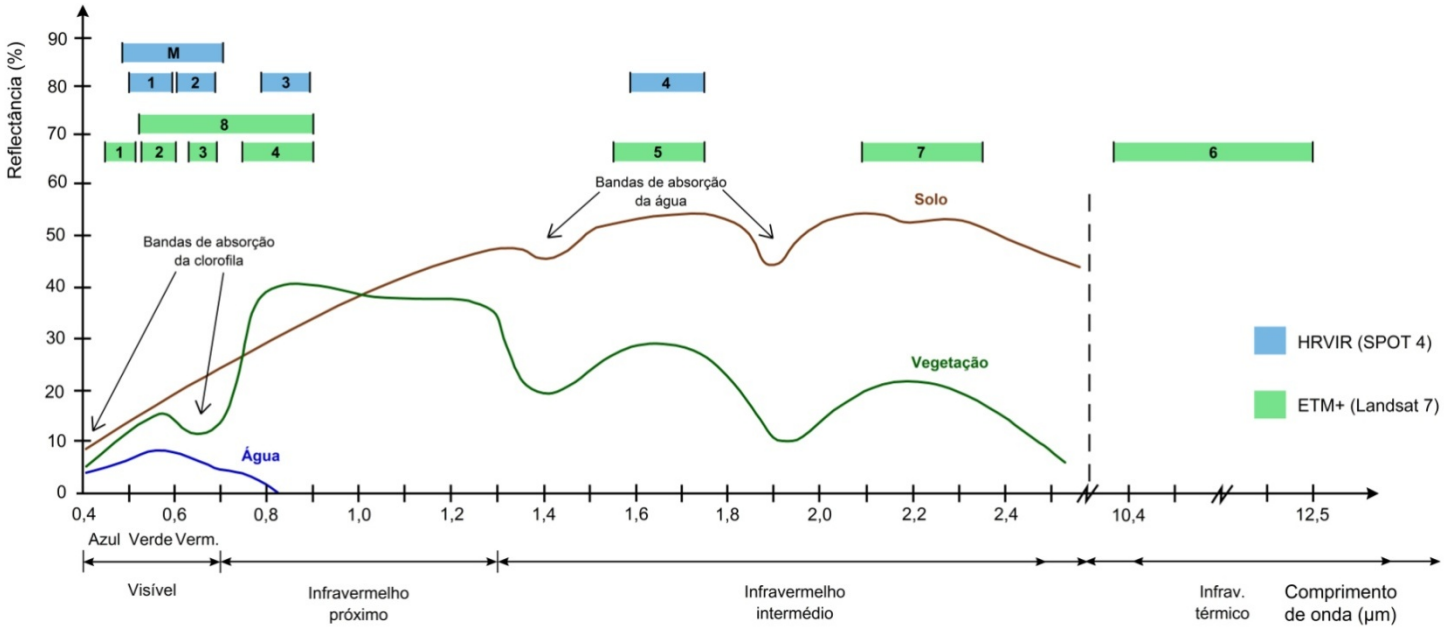


Figura III.3 - Intervalos espectrais das bandas dos sensores utilizados e curvas de reflectância espectral da água, da vegetação e do solo (adaptado de Fonseca e Fernandes, 2004).

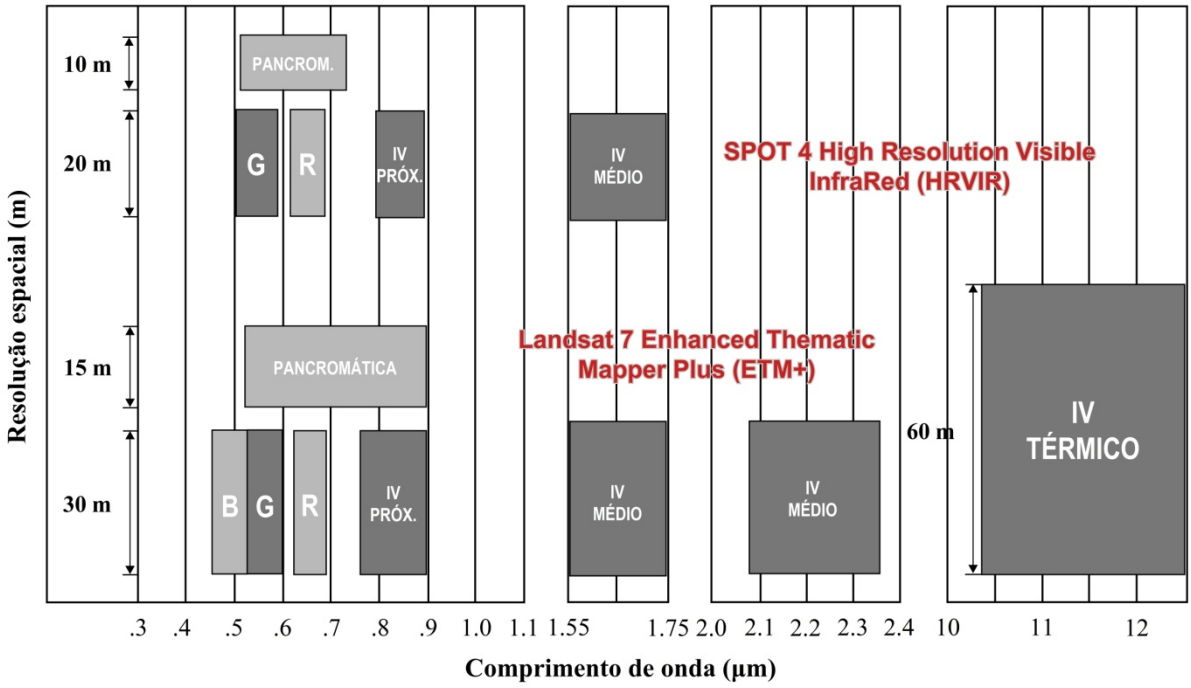


Figura III.4 – Resoluções espacial e espectral dos sensores ETM+ e HRVIR (adaptado de Jensen, 2000).

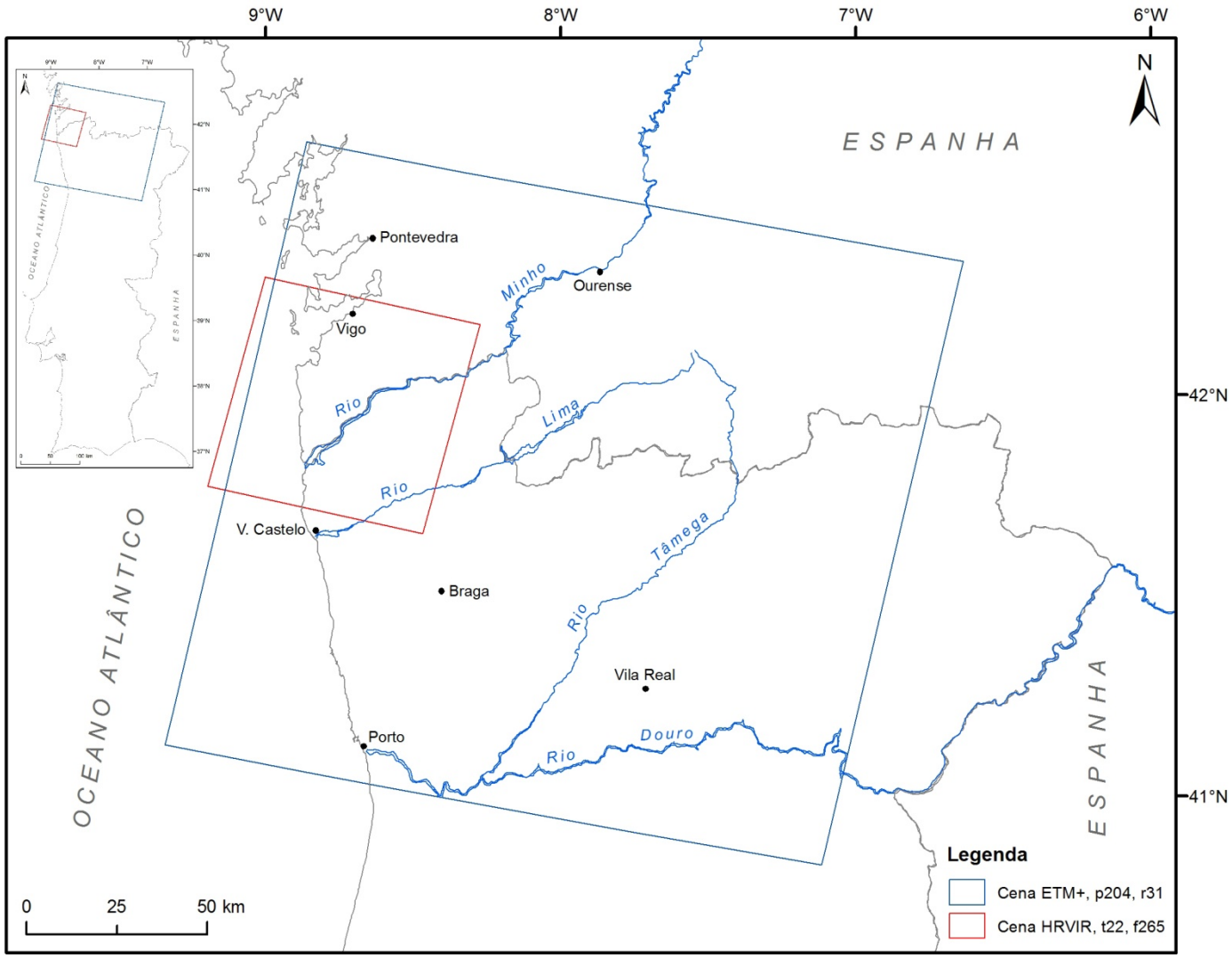


Figura III.5 – Enquadramento e localização das cenas ETM+ e HRVIR utilizadas.

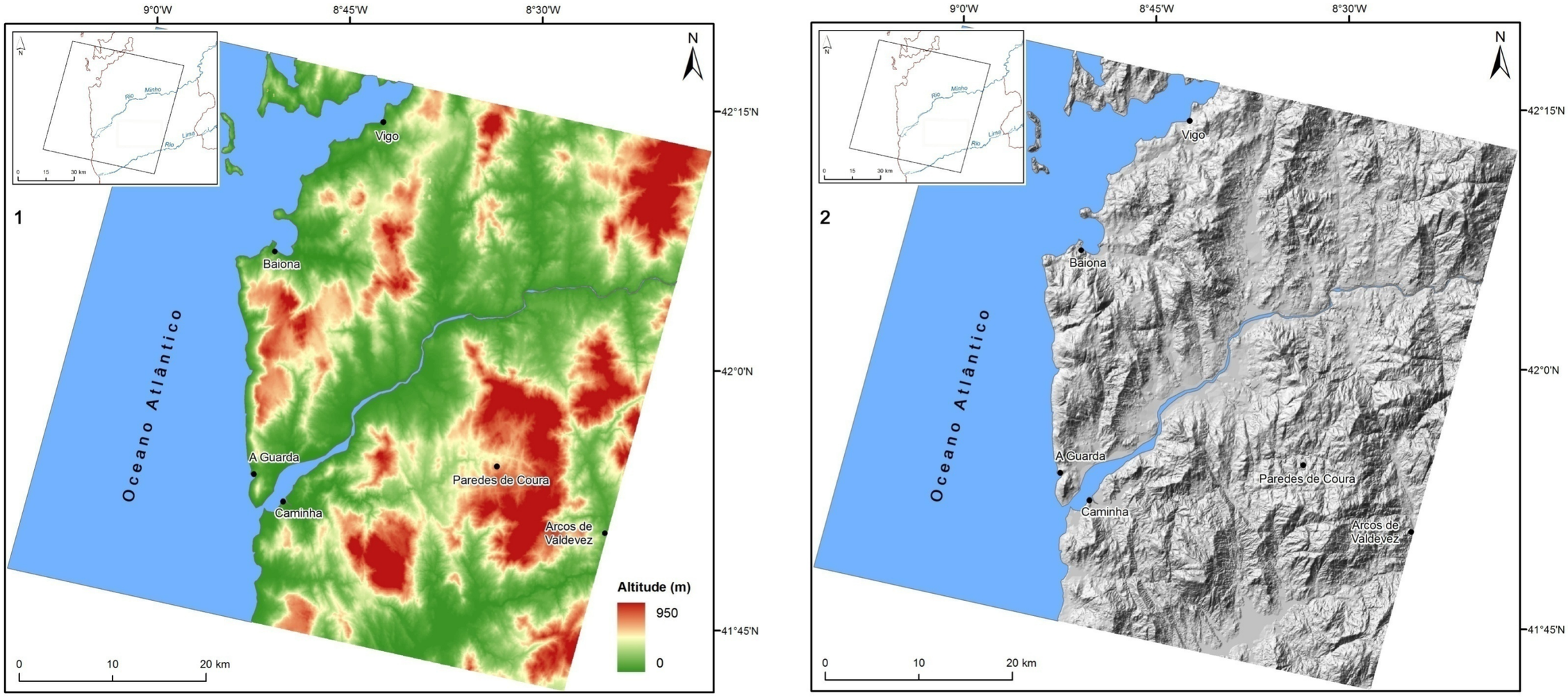
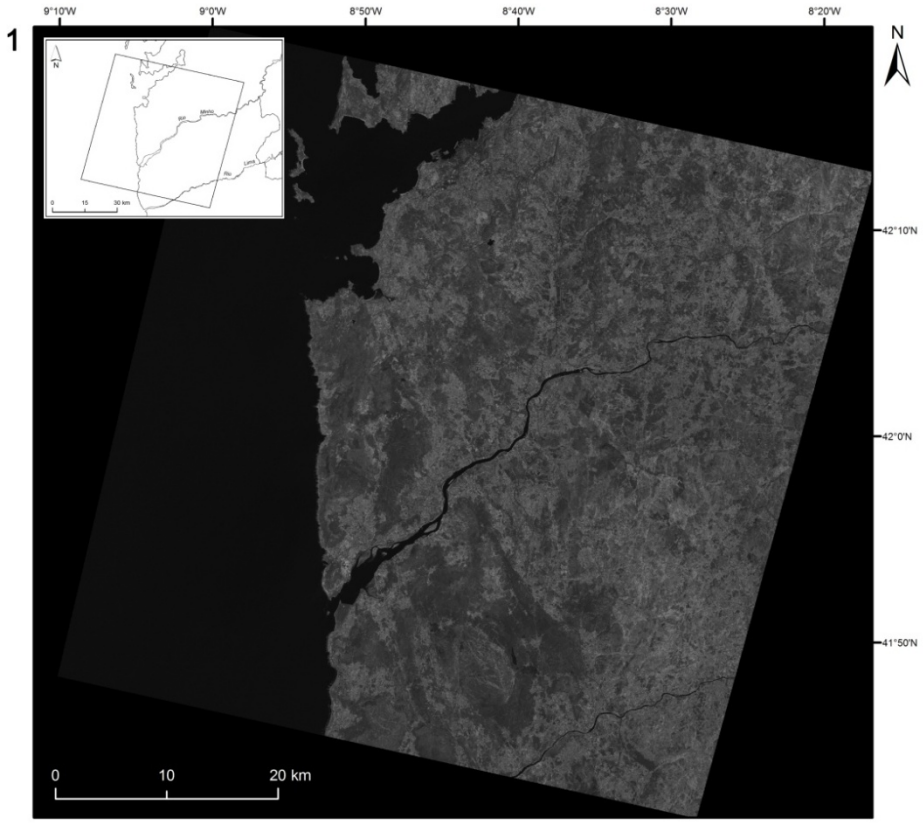
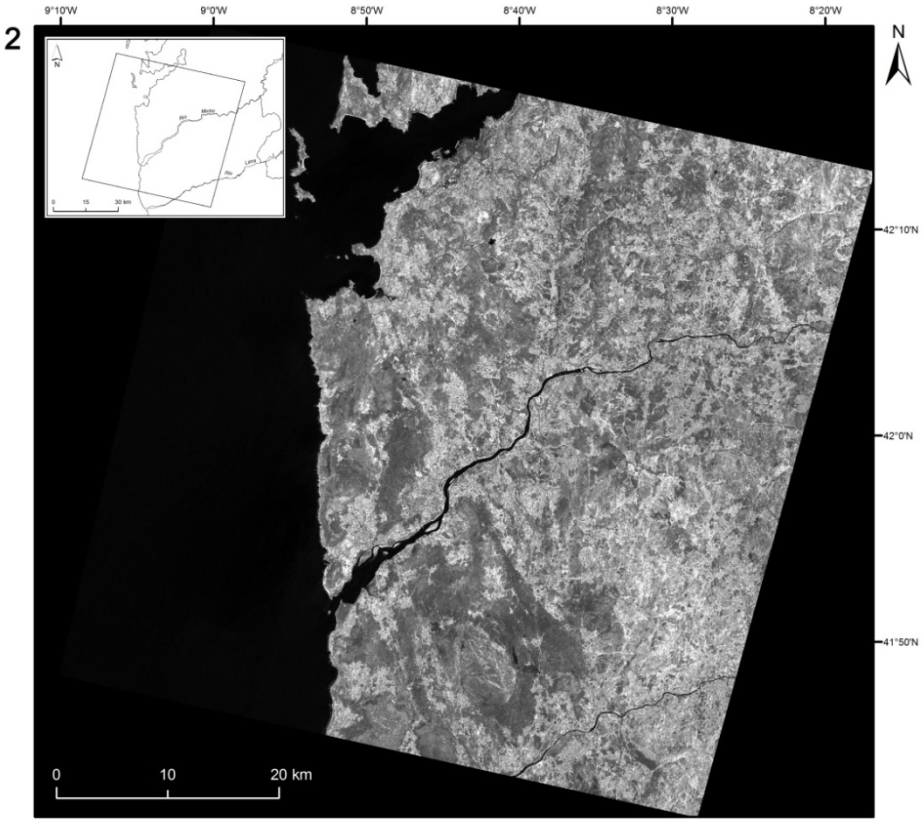


Figura III.6 – 1: Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo (formato matricial); 2: Mapa de sombreado da área de estudo, obtido por aplicação de "efeito sombra" ao MDE (sobreelevação vertical de 5x).





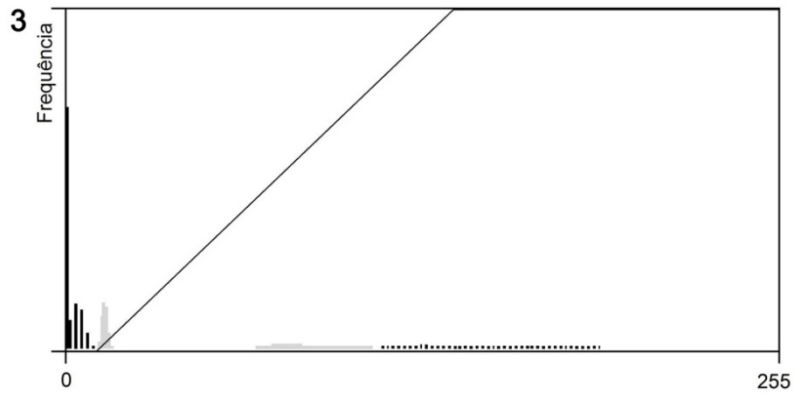
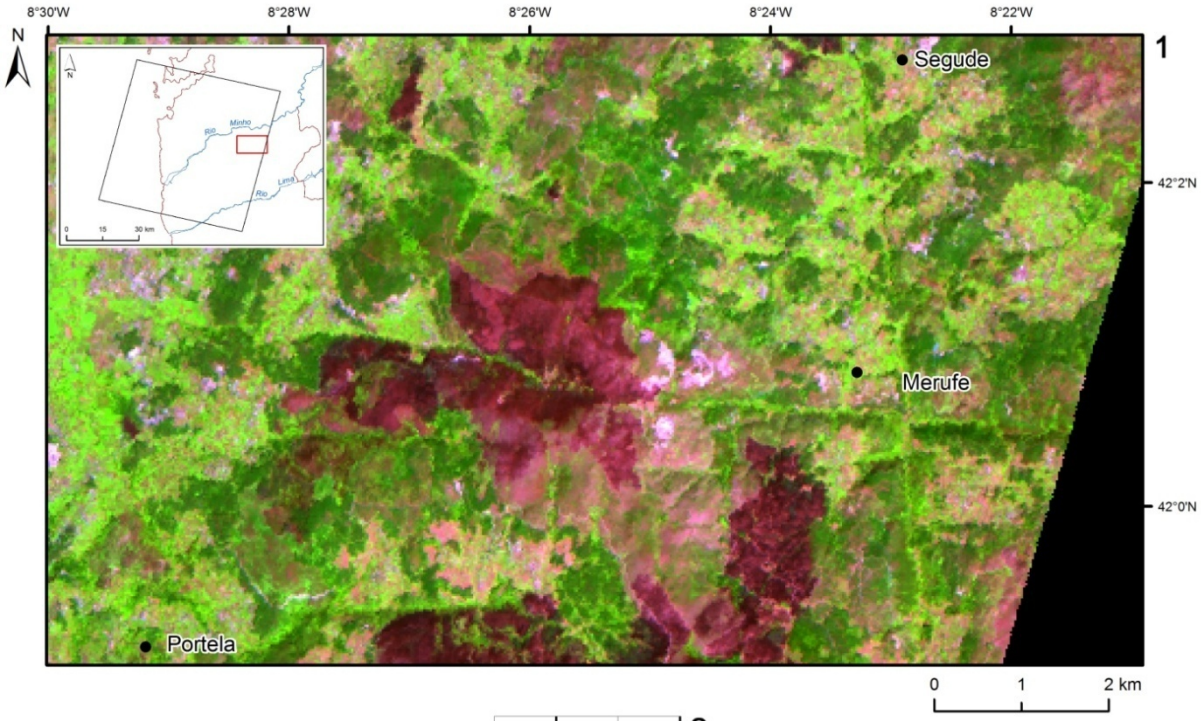


Figura III.7 – 1: Imagem bruta da banda 4 (infravermelho próximo) do sensor ETM+; 2 – Imagem da banda 4 (sensor ETM+) com expansão linear do contraste tonal e com 1% de saturação; 3 - Histograma original da banda 4 do sensor ETM+ (a cinzento) e novo histograma obtido por expansão linear (a preto).



-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

2

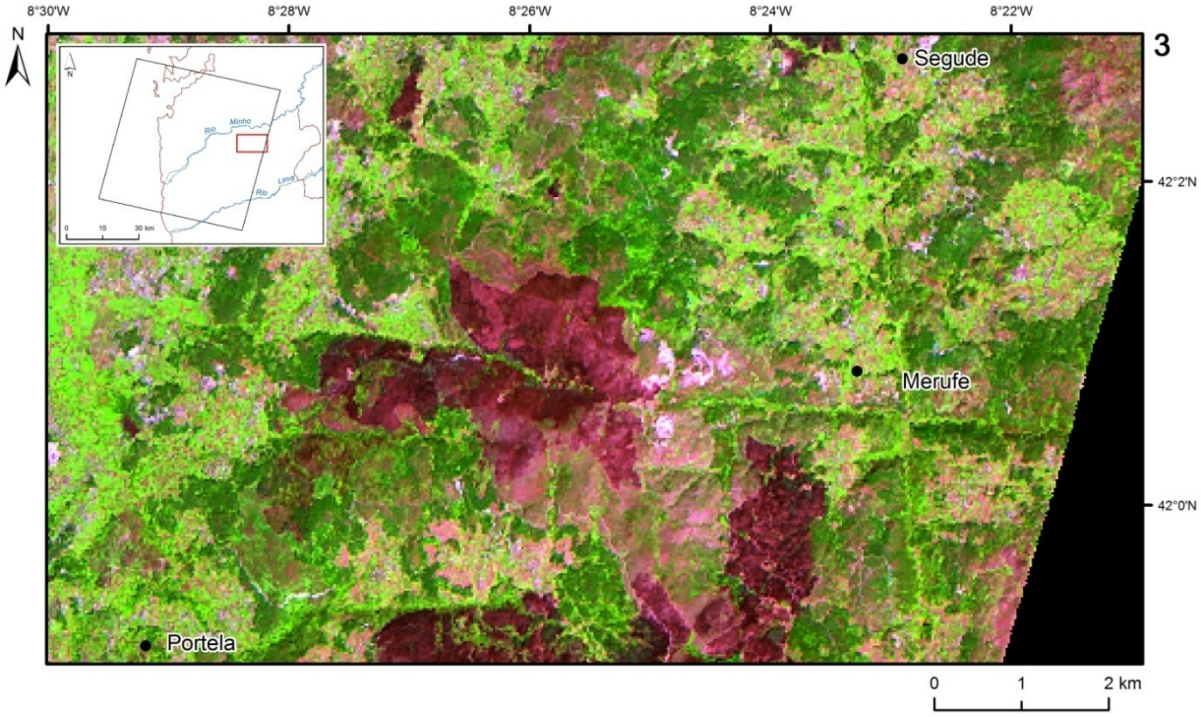


Figura III.8 – 1: Composição colorida 4-3-2 RGB (sensor HRVIR) de um extracto da área de estudo; 2 – Matriz móvel de coeficientes de filtragem de 3x3 utilizada no filtro de realce de contornos; 3 - Composição colorida 4-3-2 RGB (sensor HRVIR) de um extracto da área de estudo com aplicação de filtro de realce de contornos não direccional.

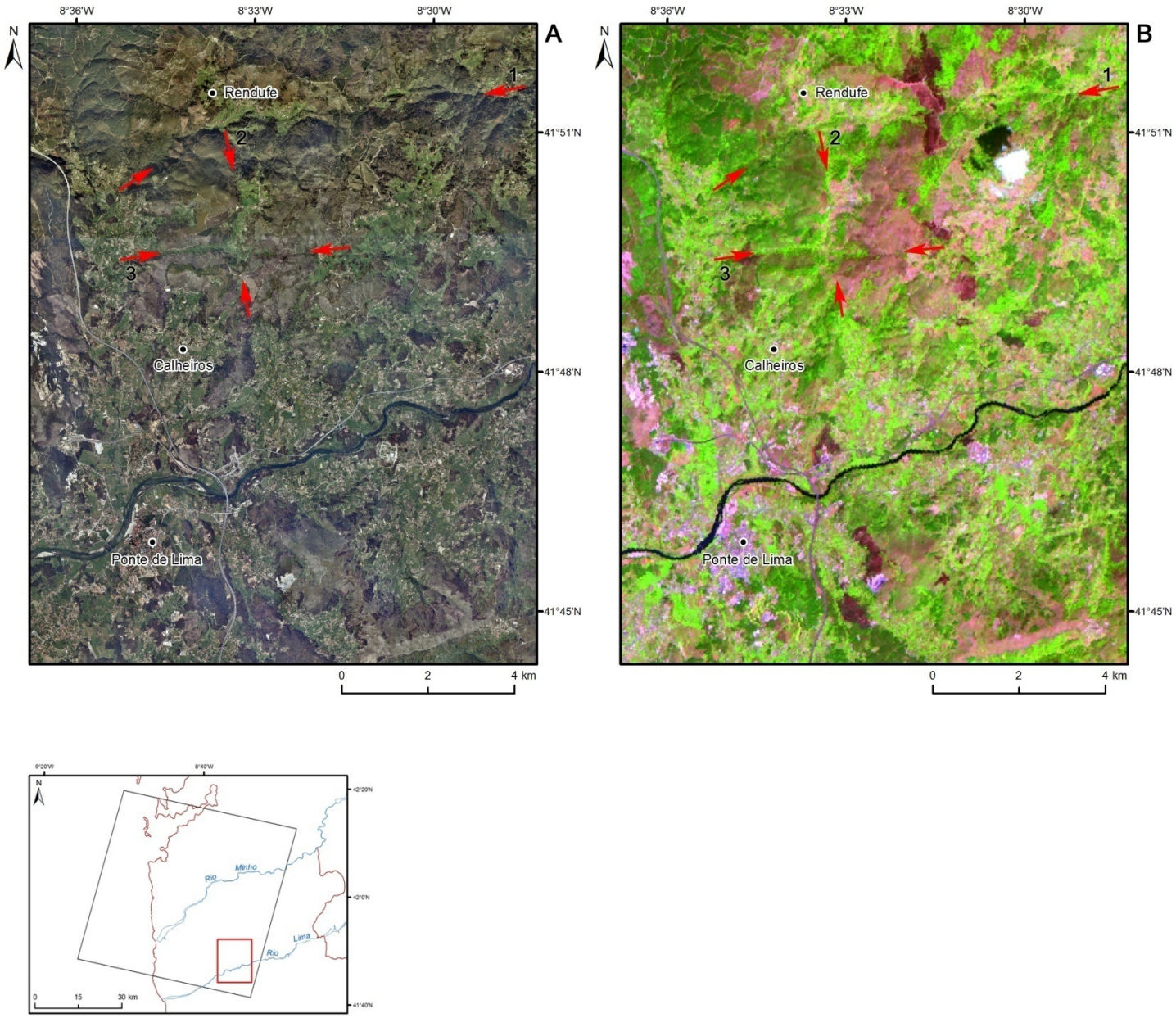


Figura III.9 – Exemplos de lineamentos (1, 2 e 3) identificados num excerto da área de estudo e comparação entre a informação espectral proporcionada pela fotografia aérea (A) (fonte: Ortofotos, escala 1/5000, IGP, 2005) e pela imagem de satélite (B) (composição colorida 4-3-2 RGB (sensor HRVIR)).

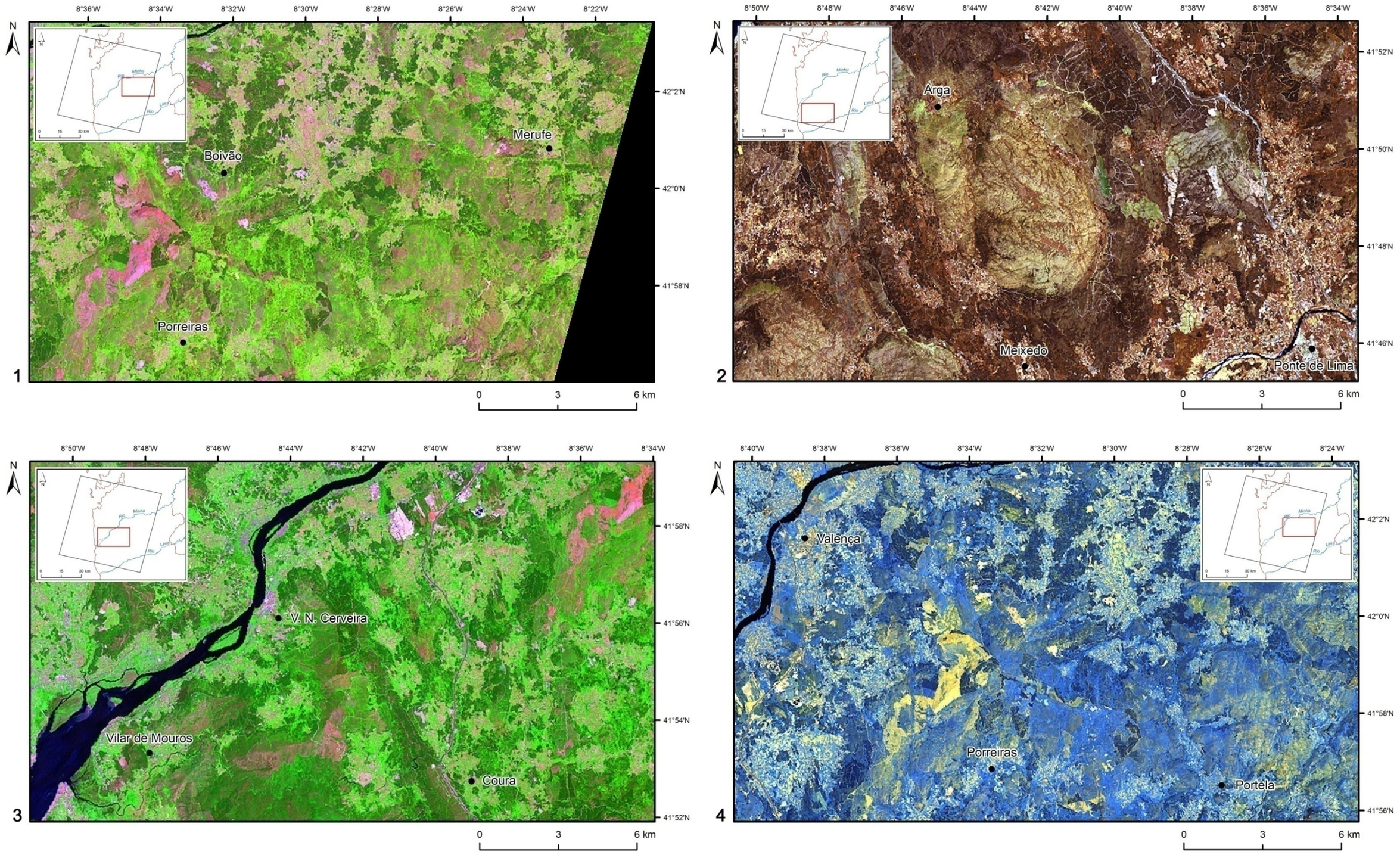


Figura III.10 – Composições coloridas RGB de extractos da área de estudo, com aplicação de filtro de realce de contornos não direccional (sensor ETM+) – 1: 5-7-3 RGB; 2: 5-4-3 RGB; 3:7-4-1 RGB; 4: 7-5-4 RGB.

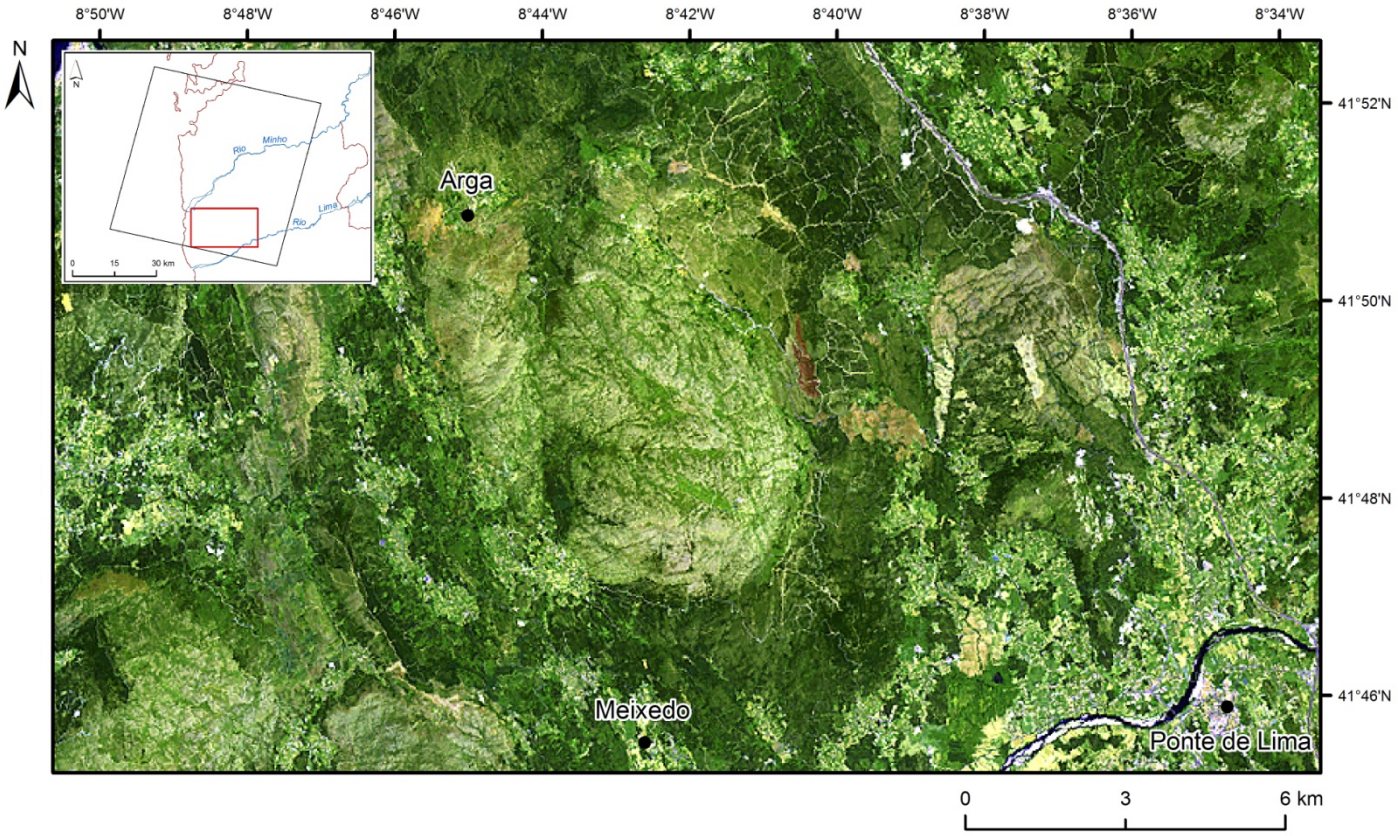


Figura III.11 – Composição colorida 7-5-1 RGB de um extracto da área de estudo, com aplicação de um filtro de realce de contornos não direccional (sensor ETM+).

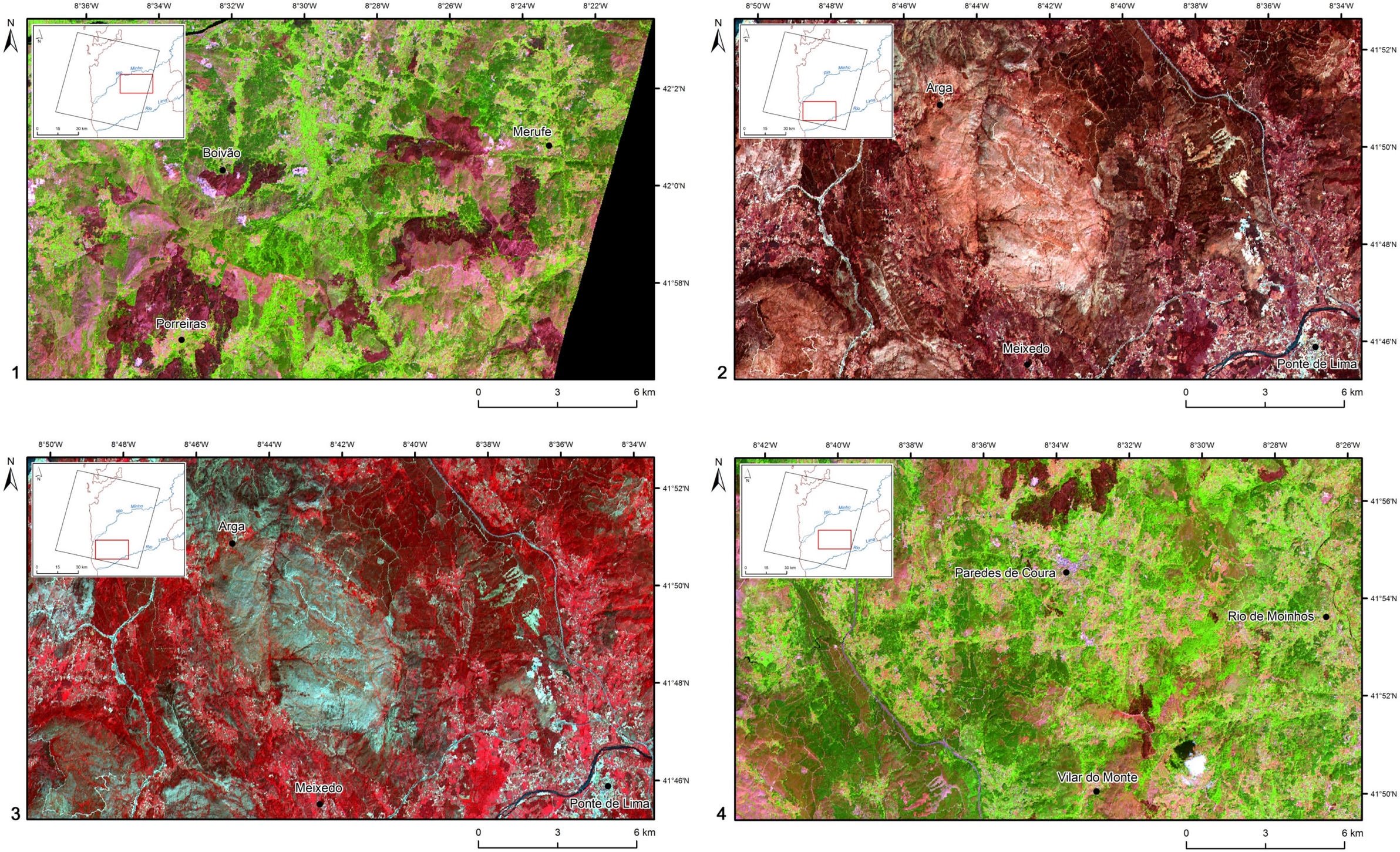


Figura III.12 – Composições coloridas RGB de extractos da área de estudo, com aplicação de filtro de realce de contornos não direccional (sensor HRVIR) – 1: 4-3-2 RGB; 2: 4-2-1 RGB; 3:3-2-1 RGB; 4: 4-3-1 RGB.

Categorias	Critérios de identificação	Simbologia	Interpretação visual
Informação radiométrica	Brilho	IRb	Os lineamentos destacam-se por apresentarem tons mais claros em relação aos elementos envolventes nas áreas com cobertura vegetal. Nas áreas de rocha exposta, apresentam, geralmente, tons mais escuros.
	Cor	IRc	A cor com que os lineamentos são destacados depende da(s) composição(ões) colorida(s) utilizada(s). Regra geral, nas áreas com cobertura vegetal, surgem com cores mais claras que os elementos vizinhos; nas áreas de rocha exposta, apresentam, usualmente, cores mais intensas.
	Textura	IRt	Os lineamentos são estruturas lineares com uma rugosidade relativamente elevada. Em relação a outros elementos lineares, como estradas e caminhos, possuem uma textura mais grosseira.
Geometria	Forma	Gf	Os lineamentos possuem uma forma rectilínea ou curvilínea, mas menos "artificial" que estradas, caminhos ou outros elementos antrópicos.
	Tamanho	Gt	Alguns lineamentos podem ter um tamanho variável entre alguns e dezenas de quilómetros (Lillesand *et al.*, 2003).
	Continuidade	Gc	Determinados lineamentos foram mais facilmente assinalados pelo facto de apresentarem seguimento, interrompido ou continuado, em vários casos, pelos cursos de água.
	Contexto espacial	Gce	Os elementos lineares presentes em áreas de grande concentração urbana foram desprezados, pelo facto de serem, com muita probabilidade, estradas ou caminhos.
Estrutura geológica	Direcção	EGd	O reconhecimento de determinados lineamentos foi facilitado pelas direcções tectónicas preferenciais da área de estudo, nomeadamente N/S, NNE/SSW, NW/SE E NE/SW.
	Paralelismo	EGp	Determinados lineamentos foram mais facilmente reconhecidos por serem paralelos a outros previamente marcados.
	Continuidade	EGc	Nalguns casos, a continuidade de estruturas geológicas bem diferenciadas, como acontece com alguns contactos litológicos, facilitou o reconhecimento de lineamentos.

Quadro 3 – Síntese dos critérios utilizados na identificação dos lineamentos estruturais na área de estudo.

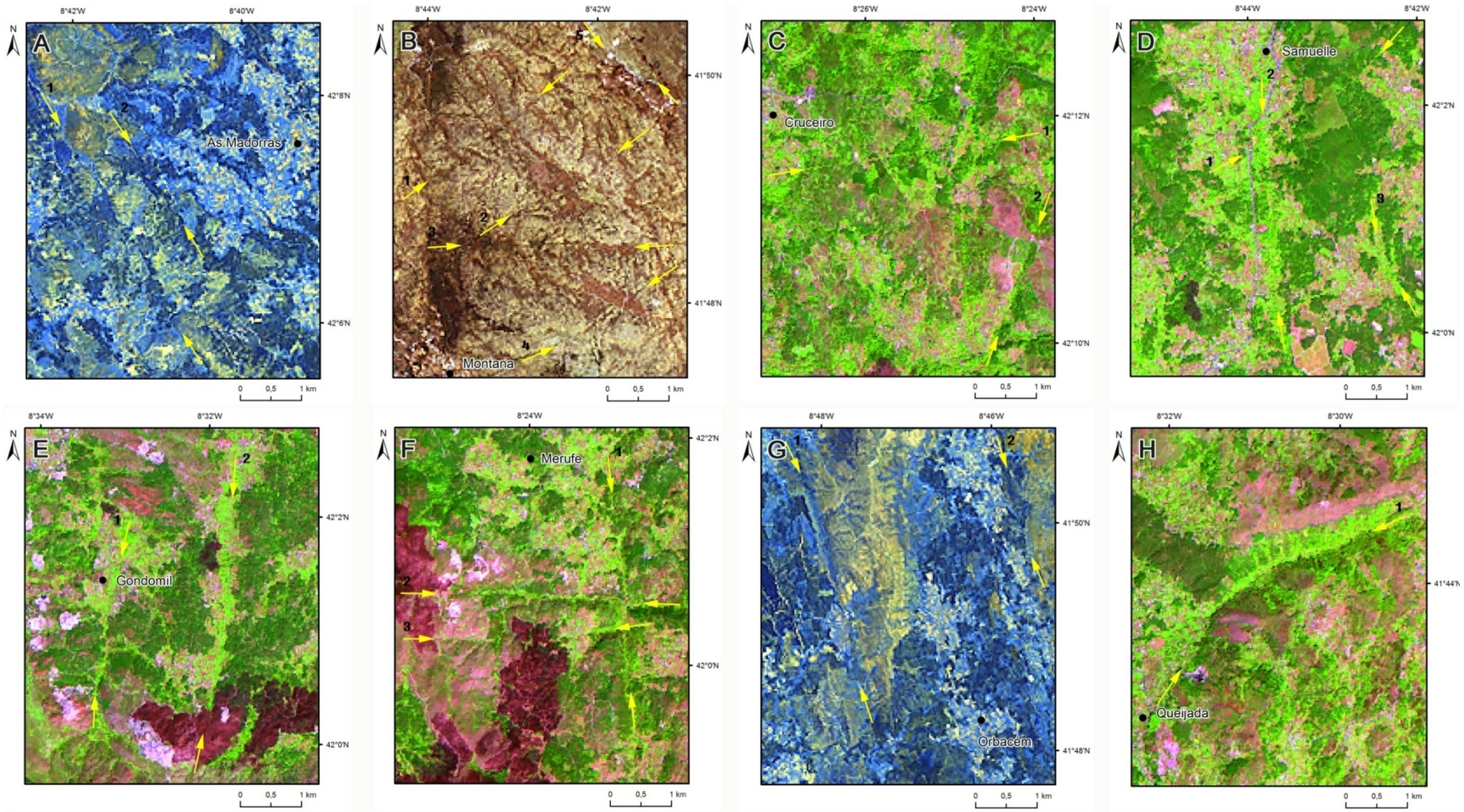
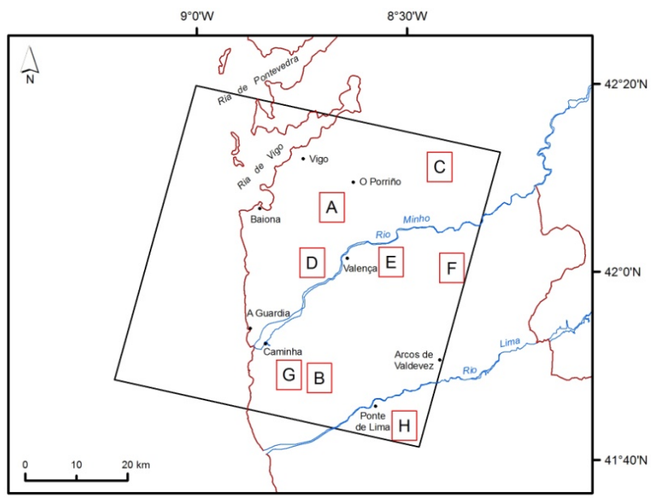
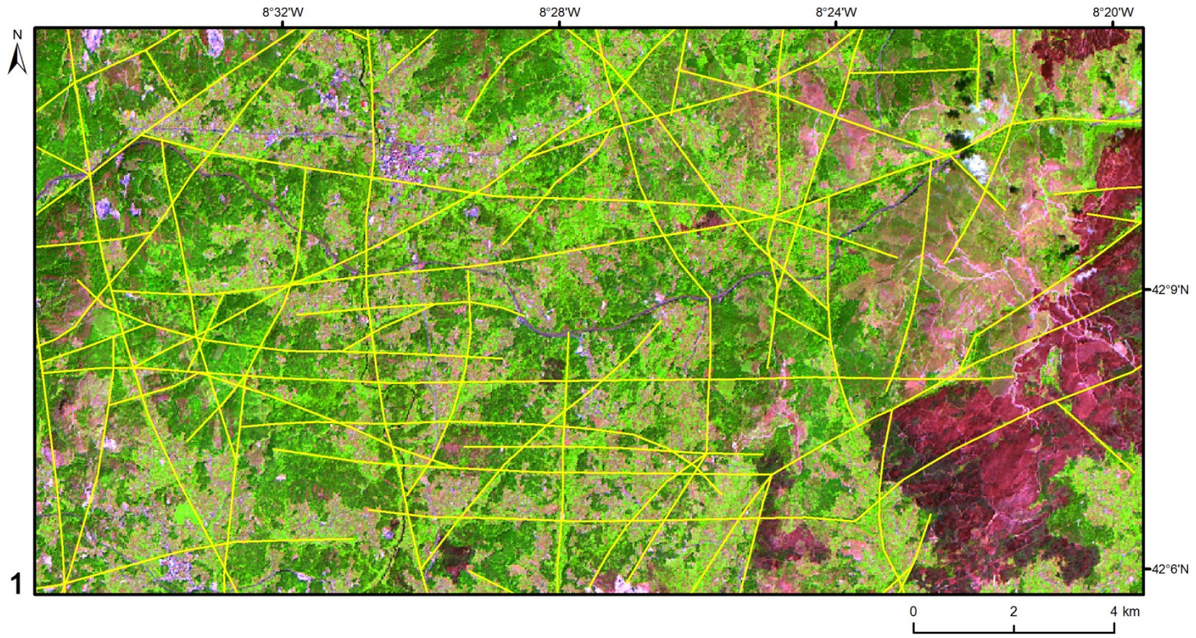


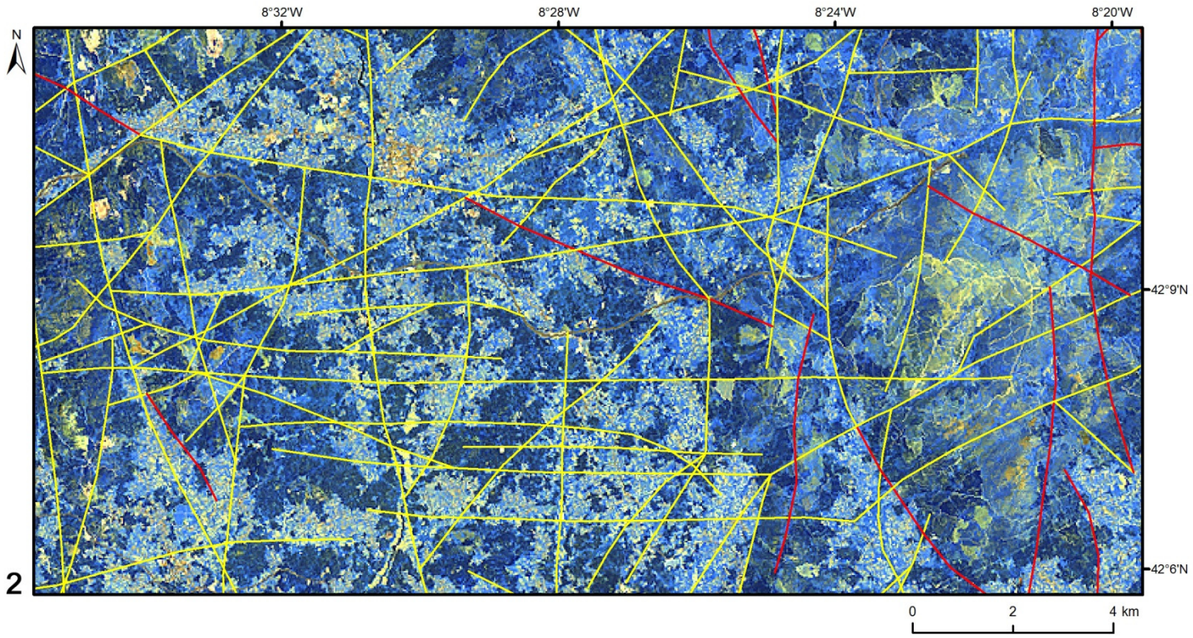
Figura III.13 – Exemplos de identificação de lineamentos em vários sectores da área de estudo, segundo os critérios definidos e respectiva simbologia utilizada no Quadro 3.

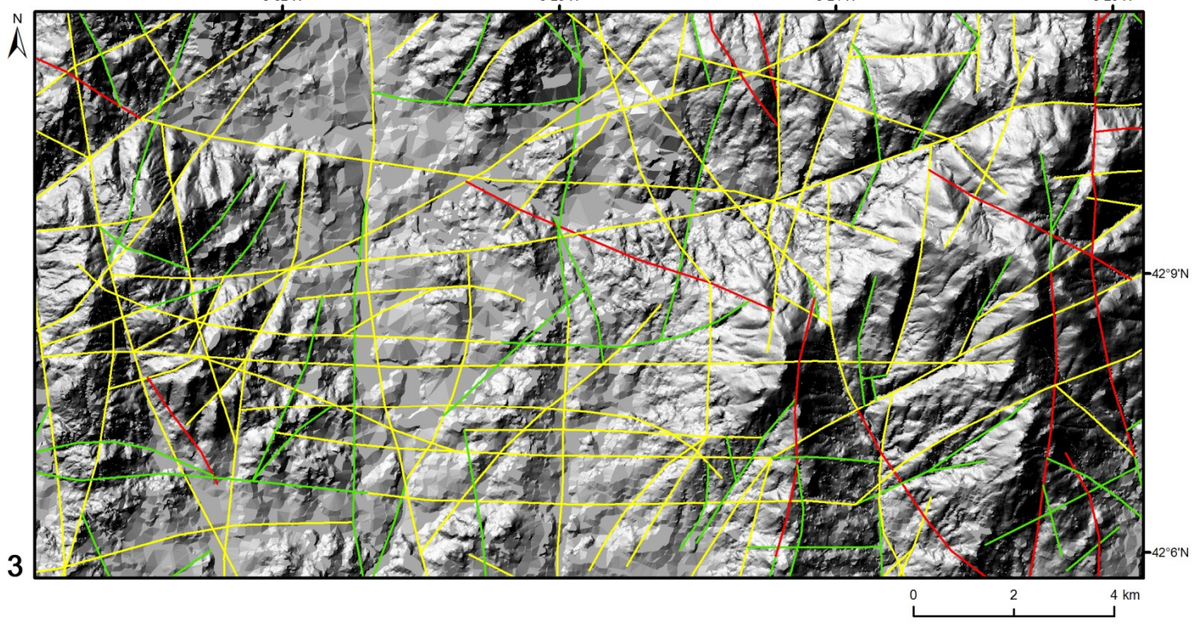


Sector	Elemento linear	Inf. radiométrica			Geometria				Estrutura geológica		
		IRb	IRc	IRt	Gf	Gt	Gc	Gce	EGd	EGp	EGc
A	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
B	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	3	X	X	X	X	X	X	X	X		X
	4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	5	Caminho									
C	1	Caminho									
	2	X	X	X	X	X	X	X	X		X
D	1	Caminho									
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
E	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
F	1	X	X	X	X	X	X	X	X		X
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
G	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
H	1	X	X	X	X	X	X	X			X

Quadro 4 – Reconhecimento dos critérios utilizados na identificação dos lineamentos presentes na Figura III.13.







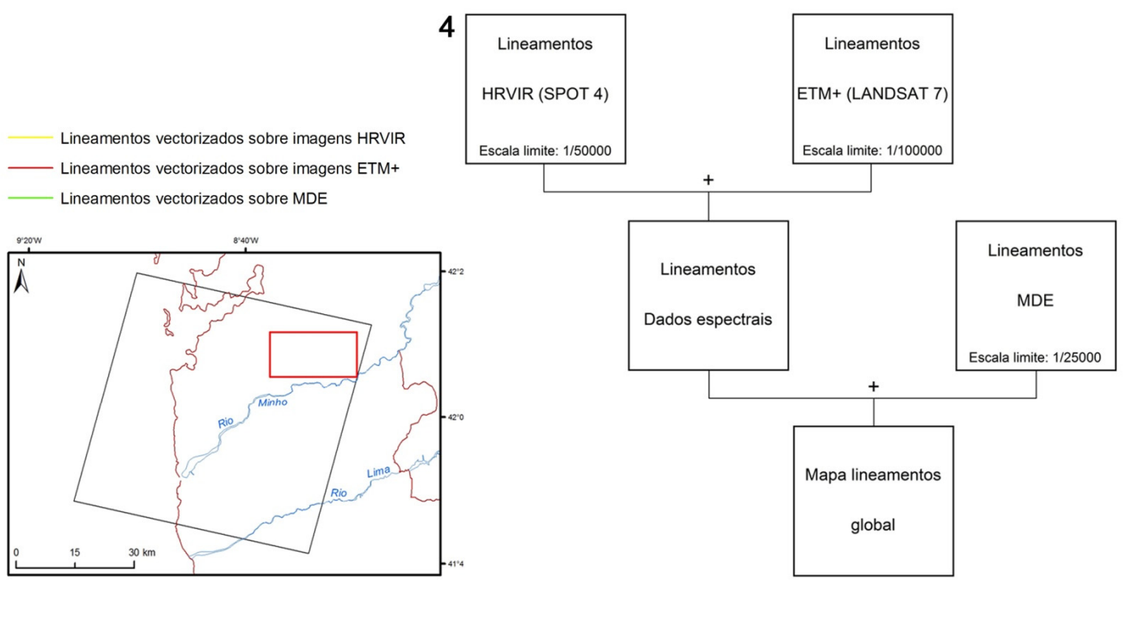
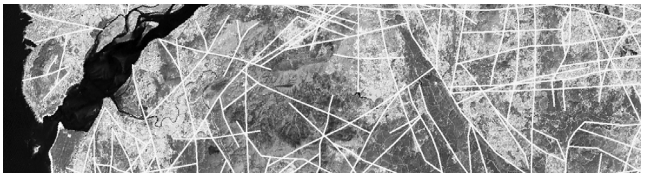


Figura III.14 – Exemplos de vectorização de lineamentos (1: composição colorida 4-3-2 RGB, sensor HRVIR; 2: composição colorida 4-3-2 RGB, sensor ETM+; 3: mapa sombreado do MDE) e esquema metodológico seguido neste processo (4).



IV. RESULTADOS E APLICAÇÕES

IV. 1 O mapa de lineamentos estruturais

Após o processo de vectorização e segmentação dos lineamentos, segundo a metodologia anteriormente descrita, obtiveram-se, para a área de estudo, 2482 segmentos.

A interpretação visual das imagens do sensor HRVIR foi a etapa que possibilitou a identificação do maior número de lineamentos, que depois foram convertidos em 1596 segmentos (cf. mapa 1 da Figura IV.1). O recurso à análise visual das imagens do sensor ETM+ e à segmentação dos lineamentos obtidos por este processo permitiu acrescentar a este valor 159 segmentos (cf. mapa 2 da Figura IV.1). A interpretação visual do mapa de sombreado permitiu extrair novos lineamentos, que depois foram segmentados em 727 linhas com a mesma direcção média (cf. mapa 3 da Figura IV.1).

A aplicação destes processos e das técnicas de processamento digital descritas anteriormente, conduziram à elaboração do mapa de lineamentos estruturais, apresentado na Figura IV.2: 1.

IV. 1. 1 Análise de orientações e distribuição espacial

A leitura do mapa de densidades dos lineamentos estruturais da Figura IV.3: 2 revela uma maior concentração destas estruturas no sector oriental da área de estudo. Com efeito, os valores máximos observam-se a leste do Porriño, a nordeste de Paredes de Coura e a sudeste de Ponte de Lima. A análise comparativa com os dados altimétricos (cf. Figura IV.3: 3) demonstra uma forte correlação entre a maior concentração de lineamentos e os sectores com relevo mais irregular, registando-se os valores mais baixos de densidade de lineamentos nas áreas aplanadas de baixa altitude, tal como se discute posteriormente.

A análise estatística da orientação dos lineamentos estruturais (cf. Figura IV.2: 2) evidencia uma distribuição muito repartida, embora se observe uma maior concentração destes elementos segundo as direcções N0 a N45 e N45 a N90. A análise dos mapas em que se cartografaram os lineamentos filtrados por orientações definidas (N0 a N45; N45 a N90; N90 a N135; e N135 a N180) corrobora, evidentemente, esta conclusão (Figura IV.4).

No entanto, a orientação N0 a N45 é a que abrange maior número de lineamentos, com um total de 518 segmentos (Figura IV.4: 1). Apesar de se verificar uma distribuição bastante homogénea neste quadrante, os valores máximos de densidade observam-se em áreas dispersas: a sul de Caminha, a norte de Arcos de Valdevez, entre o Porriño e Vigo, e próximo de Baiona, em que se verifica um maior número de lineamentos com orientação N-S e NE-SW.

A segunda orientação mais importante é a N45 a N90 (número de segmentos: 440) (cf. Figura IV.4: 2) e, tal como a anterior, está amplamente representada na área de estudo. A análise do mapa de densidades revela, contudo, uma maior concentração de lineamentos no sector português da área de trabalho, particularmente a leste de Valença, a oeste de Paredes de Coura e a leste de Ponte de Lima.

As restantes orientações – N90 a N135 e N135 a N180 – possuem uma representatividade substancialmente inferior, com 307 e 277 segmentos, respectivamente (cf. Figura IV.4: 3 e 4). Para além do menor número de lineamentos, verifica-se também uma distribuição espacial mais heterogénea. Relativamente à orientação N90 a N135, verificam-se máximos de densidade de lineamentos a norte de A Guarda, a leste de Valença e próximo de Paredes de Coura. Em relação à orientação N135 a N180, os valores de densidade são mais elevados a sul do rio Minho, mais precisamente a oeste de Ponte de Lima, entre Caminha e Paredes de Coura e a norte de Arcos de Valdevez.

IV. 2 Análise geomorfológica

IV. 2. 1 Principais unidades de relevo

Na área em estudo, o relevo assemelha-se a um amplo anfiteatro aberto a Oeste, configurado por uma série de "degraus" que descem até ao mar (Araújo & Pérez Alberti, 1999).

O mapa hipsométrico da Figura IV.3: 3 indicia o carácter estrutural desta disposição do relevo. Com efeito, uma análise rápida da topografia da área revela facilmente que este carácter se manifesta por um alinhamento norteado (N-S a NNW-SSE) das elevações principais, que define, igualmente, o traçado dos cursos de água tributários, assistindo-se a um escalonamento das formas de relevo do litoral para o interior e a uma direcção meridiana que as áreas deprimidas de origem tectónica seguem.

Assim, uma análise mais fina sugere que a área em estudo pode ser subdividida em três unidades principais.

A primeira, e de acordo com BRUM FERREIRA (1983), corresponde a uma superfície de aplanamento pouco desenvolvida e imperfeita, de idade provavelmente Plio-quaternária, que penetra ao longo dos rios principais – Minho, Lima e Coura.

Estes rios, sensivelmente paralelos, possuem uma direcção NE-SW a ENE-WSW. Os seus vales são muito largos a jusante, com fundo plano que denuncia o fraco encaixe numa superfície, geralmente abaixo dos 100 m de altitude, embora enquadrados por vertentes abruptas (cf. Figura IV.5: perfis 2 e 3, vale do Minho).

Estas características esbatem-se no sector oriental da área de estudo, em que o encaixe vigoroso dos vales passa a dominar a morfologia (Soares, 2007), ou seja, a Leste de Monção, no caso do rio Minho, a Leste de Ponte de Lima, no caso do Lima, e próximo de Paredes de Coura, no caso do Coura (cf. Figura IV.3: 3).

No entanto, este contexto morfológico só desaparece verdadeiramente no sopé ocidental das altas montanhas do interior, desde a Peneda até ao Marão (serras não cartografadas), onde os rios correm apertados entre vertentes de forte declive, apresentando um fortíssimo encaixe (Coudé-Gaussen, 1981; Brum Ferreira, 1991). Mas, entre as serras litorais e estas

serras interiores, localiza-se um conjunto de depressões de direcção meridiana, que constituem a segunda unidade de relevo.

Como assinala BRUM FERREIRA (1983, pág. 317), a uma escala de análise média, o relevo da área é *"(…) constituído por uma série de alvéolos, de dimensões variadas, de contornos muitas vezes irregulares, atravessados pelos rios principais ou apresentando uma drenagem incipiente, sem hierarquia bem definida."* A título de exemplo, refira-se, próximo de Valença, a existência de um alvéolo quase circular, que se desenvolve, sobretudo, no sector português. Mas, nesta área, observam-se depressões de contorno mais alongado, segundo direcções N-S e NNW-SSE, que deverão ter sido condicionadas por estruturas tectónicas importantes. Esta ideia é corroborada por ARAÚJO & PÉREZ ALBERTI (1999), que se referem a estas formas como depressões tectónicas meridianas, como é o caso da do Porriño, que "encosta" ao norte de Portugal (cf. Figura IV.3: 3).

Verifica-se uma forte associação entre estes alvéolos e as rochas cristalinas (granitos e xistos metamórficos) no interflúvio Minho-Lima, uma vez que aquelas formas não penetram em terrenos xistentos, uma vez que se desenvolvem preferencialmente sobre rochas granitóides (cf. Figura IV.6: 2). Tal como refere BRUM FERREIRA (1983), esta situação é particularmente evidente no caso das depressões de Sopo e Covas, enquanto a depressão do Coura, por exemplo, termina bruscamente por um abrupto de direcção NNW-SSE, a base da serra do Extremo, que coincide com a transição das rochas cristalinas (granitos alcalinos) para os xistos andaluzíticos do Silúrico (Brum Ferreira, 1983; Soares, 2007).

O Minho é a única região portuguesa em que as rochas cristalinas chegam até ao mar. BRUM FERREIRA (ob. cit.) sugere que os processos de alteração/erosão diferencial permitiram o desenvolvimento destas formas alveolares, as quais, por coalescência, associada a uma remoção progressiva das alterites ao longo dos principais eixos de drenagem, formaram depressões largas, quase fechadas, e com direcção meridiana, que constituem hoje o essencial da superfície de aplanamento costeira de idade Plio-quaternária.

Esta superfície é interrompida por serras litorais e interiores de direcção principal NNW-SSE, tanto no sector espanhol como no sector português, que constituem a terceira grande unidade de relevo.

Efectivamente, e considerando referências teóricas sobre a geomorfologia da Galiza (Araújo & Pérez Alberti, 1999), é possível afirmar que o relevo é um autêntico "puzzle" de blocos alternadamente afundados e soerguidos que se encadeiam entre a faixa costeira e as áreas

mais interiores (cf. perfis topográficos da Figura IV.5). Este escalonamento do relevo, formando blocos cada vez mais elevados à medida que se avança para o interior, é igualmente notório no sector português da área de estudo, em que a tectónica também parece actuar de forma directa no modelado, configurando uma sequência de escarpas de falha (Soares, 2007).

Nesta área, o relevo apresenta um aspecto maciço e abrupto (cf. Figura IV.3: 3), desenvolvendo-se a cotas elevadas bem próximo da plataforma litoral (Soares, 2007). Esta característica é mais evidente no sector galego, em que, bordejando a costa, se encontra a serra da Groba, com uma altitude aproximada de 600 m. Em Portugal, desenvolvem-se, igualmente, serras litorais, como a serra de Arga, com uma altitude de 823 m, embora a uma distância superior à linha de costa.

Na região oriental da área de estudo, localizam-se os sectores culminantes das serras interiores, que, na Galiza, se estendem como uma dorsal que inclui, a sul, os montes de Paradanta (Araújo & Pérez Alberti, 1999). No sector português, a leste da serra de Arga, situa-se um novo alinhamento de relevos paralelos, de orientação NNW-SSE, onde se destaca a serra do Extremo, com cotas superiores a 800 m (Soares, 2007).

IV. 2. 2 Expressão geomorfológica dos lineamentos e das nascentes minerais

Aquando da caracterização da distribuição espacial dos lineamentos estruturais – lineamentos totais, não filtrados por direcções –, constatou-se que estes apresentavam uma maior densidade no sector oriental da área de estudo (cf. Figura IV.3: 2). Na verdade, é nas áreas de relevo mais irregular e de rocha exposta – serras interiores, como os montes de Paradanta, na Galiza, e a serra do Extremo, no NW de Portugal continental – que se verificam densidades mais elevadas (cf. Figura IV.3: 3).

Em oposição, as densidades mais baixas registam-se nas áreas aplanadas de baixa altitude, que constituem, tal como referido anteriormente, a "superfície de aplanamento Plio-quaternária". É, portanto, nos vales do Minho e do Lima e em formas como a depressão tectónica do Porriño que se verificam valores inferiores, em virtude das menores diferenças altimétricas na superfície e da maior regularidade do relevo.

Considerando agora os mapas de lineamentos filtrados por direcções, constata-se que a direcção N45 a N90 (cf. Figura IV.4: 2) destaca os lineamentos estruturais com direcção bética (ENE-WSW), orientação semelhante à assumida pelos rios principais (Minho, Lima e Coura).

A direcção N90 a N135 (cf. Figura IV.4: 3) distingue alguns lineamentos que definem a interrupção abrupta dos maciços montanhosos e que contribuem para o reticulado da rede hidrográfica, facto que é particularmente visível no lineamento que se desenvolve desde Baiona até Valença (cf. Figura IV.4: 9).

O mapa de lineamentos filtrados pela direcção N135 a N180 (cf. Figura IV.4: 4) realça os lineamentos estruturais que parecem estar associados a escarpas de falha (coincidindo com o carácter rectilíneo das vertentes, de direcção NNW-SSE) e ao alinhamento dos afluentes principais, condicionando, nalguns casos, o seu traçado.

Neste contexto, convém salientar que estas direcções principais coincidem com as assinaladas na Carta Neotectónica de Portugal para o noroeste do território continental, o que poderá indiciar, considerando a irregularidade do relevo e a frescura morfológica de algumas escarpas, que alguns destes lineamentos se podem relacionar com movimentações tectónicas de Plio-quaternárias (Pereira, 1989).

Como atrás se disse, o relevo da área de estudo é marcado por um escalonamento sucessivo de escarpas de falha, que estabelecem a demarcação entre blocos abatidos e blocos soerguidos de direcção geral N-S a NNW-SSE, como a serra de Arga e do Extremo, no sector português, e as serras da Groba, do Galiñeiro e os montes de Paradanta, no sector galego, tal como já se encontra devidamente assinalado na Carta Geomorfológica de Portugal (Brum Ferreira, 1981).

A análise dos perfis topográficos elaborados (cf. Figura IV.5) mostra que os lineamentos estruturais se localizam em situações topográficas variadas. Uma delas situações está, precisamente, relacionada com as escarpas de falha, uma vez que muitos lineamentos se situam na base dessas escarpas (*i. e.* lineamento próximo de Mondariz, no perfil 1, lineamento perto de Lordelo, no perfil 2, e lineamento próximo de Fontoura, no perfil 3) e nos ressaltos das mesmas (*i. e.* lineamento perto de Granxa, no perfil 1), enquanto outros surgem ainda no entalhe de pequenos cursos de água (*i. e.* lineamentos no vale do rio Gadanha, no perfil 2) e em pequenos entalhes de superfícies aplanadas (*i. e.* lineamentos próximos de Porreiras, no perfil 2).

Esta análise demonstra claramente a utilidade da metodologia expressa na interpretação do relevo. Mas, a cartografia de lineamentos, apoiada na detecção remota, suporta outros objectivos, com aplicações práticas evidentes.

Por exemplo, é um processo comummente utilizado para interpretar a ocorrência de águas subterrâneas, especialmente em áreas constituídas por rochas ígneas e metamórficas e de fraca porosidade primária, normalmente conhecidas como rochas duras (Sander, 2007).

No sector português da área de estudo, constata-se que a localização das nascentes minerais e termais[9] está condicionada às áreas de afloramento de rochas granitóides ou de substrato granítico (cf. Figura IV.8): granitos biotíticos em geral, porfiróides, no caso das nascentes localizadas entre Valença e Monção; granitos de duas micas, indiferenciados, no caso das nascentes localizadas a noroeste de Paredes de Coura; granitos com restitos e migmatitos, no caso das nascentes localizadas a leste de Monção; e granitos monzoníticos porfiróides, no caso das nascentes a sul de Arcos de Valdevez (Carta Geológica de Portugal, 1/500000, 1992).

Não foi utilizada, para esta análise, a carta geológica correspondente ao sector galego da área de estudo, pois, como se disse atrás, procura-se aqui apenas fazer uma breve incursão por algumas das aplicações dos resultados obtidos.

A análise do mapa de sombreado da Figura IV.7 mostra que o factor altimétrico e a posição topográfica não parecem ser factores muito determinantes na localização das nascentes minerais, uma vez que estas surgem tanto a cotas elevadas, como em locais de baixa altitude (como nos vales dos rios principais e nas áreas tectonicamente deprimidas), embora predominem nestes últimos.

[9] Dados obtidos da Carta de Nascentes Minerais, acessível no sítio do Atlas do Ambiente, http://www.iambiente.pt/atlas/est/index.jsp. Entende-se por nascente mineral uma emanação de água proveniente de fontes naturais ou de fontes artificialmente captadas, com composição química ou propriedades físicas ou físico-químicas distintas das águas comuns. Caracteriza-se por possuir uma elevada quantidade de elementos dissolvidos, acreditando-se vulgarmente, ter efeitos benéficos para a saúde. As águas minerais estão geralmente relacionadas com a circulação profunda e/ou fenómenos vulcânicos ou orogénicos (http://e-geo.ineti.pt). Nascente termal é uma emanação de água que emerge à superfície com temperatura superior a 20ºC, depois de acumular energia sob a forma de calor, proveniente de manifestações vulcânicas (Carvalho, 2006; http://e-geo.ineti.pt).

É conhecido que os lineamentos estruturais que correspondem a fracturas e falhas funcionam como bons condutores de águas subterrâneas (Cook, 2003). Mas, alguns dos lineamentos identificados na área de trabalho estão também relacionados, como se referiu anteriormente, com contactos litológicos e alinhamentos de filões. Será, portanto, precipitado estabelecer uma relação directa e causal entre a localização destes lineamentos estruturais e a das nascentes minerais.

No entanto, é impossível deixar de notar uma quase coincidência na localização das nascentes minerais ao longo do traçado de vários lineamentos estruturais (cf. Figura IV.9), o que poderá indicar que estes correspondem a descontinuidades crustais importantes.

Uma leitura mais pormenorizada revela, todavia, que não existe, em vários casos, uma total coincidência entre a localização dos lineamentos e a posição das nascentes, embora estas se situem na sua proximidade (cf. perfis topográficos da Figura IV.5). Este facto poderá ser explicado por duas situações: ou essa diferença na localização se deve às escalas de análise utilizadas na vectorização dos lineamentos, impossibilitando o máximo de rigor no seu traçado, ou então, mais provavelmente, como refere CARVALHO (2006), reflecte uma importância da circulação subterrânea profunda das águas infiltradas e o seu aparecimento à superfície em locais muito específicos, como acontece com as nascentes termais. Isso pode ficar a dever-se, portanto, como sugere Gomes (2008), à existência de armadilhas estruturais que possibilitam a emergência da circulação subterrânea da água em locais relativamente próximos das fracturas.

Esta breve incursão na expressão geomorfológica dos lineamentos e das nascentes minerais põe apenas em evidência duas das inúmeras aplicações dos resultados obtidos, que constituem temas promissores para futuros trabalhos.

No contexto do ordenamento do território, salienta-se sobretudo a sua importância ao nível dos riscos naturais, designadamente no domínio dos movimentos de vertente. Com efeito, a existência de áreas de fragilidade estrutural deve obrigatoriamente ser considerada no âmbito dos factores condicionantes dos processos de instabilidade geomorfológica (Bateira, 2001).

Por outro lado, o ensaio praticado e a metodologia implementada podem ser úteis para a melhoria da cartografia geológica estrutural, nomeadamente a cartografia hidrogeomorfológica de pormenor. A interpretação dos lineamentos estruturais poderá ser vantajosa para determinar as estruturas hidrogeológicas potenciais relacionadas com as áreas

de carga/descarga das águas subterrâneas, uma vez que as falhas e fracturas são o factor primordial que afecta a produtividade nas principais rochas que afloram no NW português. Assim, este estudo poderá revelar-se igualmente útil na gestão sustentável de recursos hídricos subterrâneos, tal como é intuito do projecto de investigação *HydroSPOT*, aprovado pela Agência Espacial Europeia[10].

[10] Projecto *Morphotectonic, hydrogeomorphologic and hydrogeological mapping of Northwestern Portugal using SPOT images: a contribution to the implementation of good practices on territory planning and management of groundwater resources (HydroSPOT)*, acessível em http://eopi.esa.int/esa/esa?aoid=760&ts=1202903343469&cmd=aodetail (Project ID 5750). A dissertação apresentada constitui o primeiro contributo para a consecução dos objectivos propostos neste projecto.

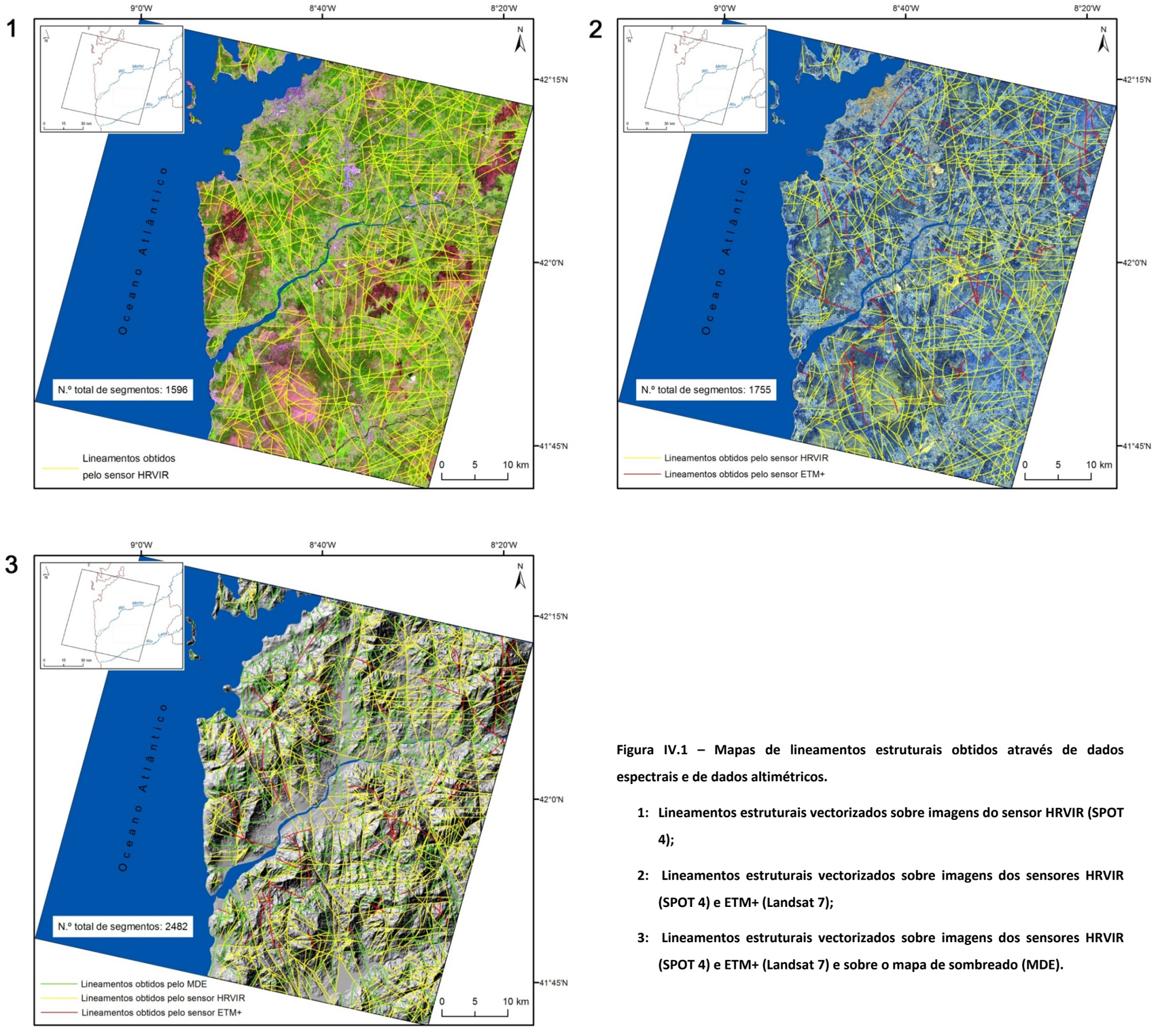


Figura IV.1 – Mapas de lineamentos estruturais obtidos através de dados espectrais e de dados altimétricos.

1: Lineamentos estruturais vectorizados sobre imagens do sensor HRVIR (SPOT 4);

2: Lineamentos estruturais vectorizados sobre imagens dos sensores HRVIR (SPOT 4) e ETM+ (Landsat 7);

3: Lineamentos estruturais vectorizados sobre imagens dos sensores HRVIR (SPOT 4) e ETM+ (Landsat 7) e sobre o mapa de sombreado (MDE).

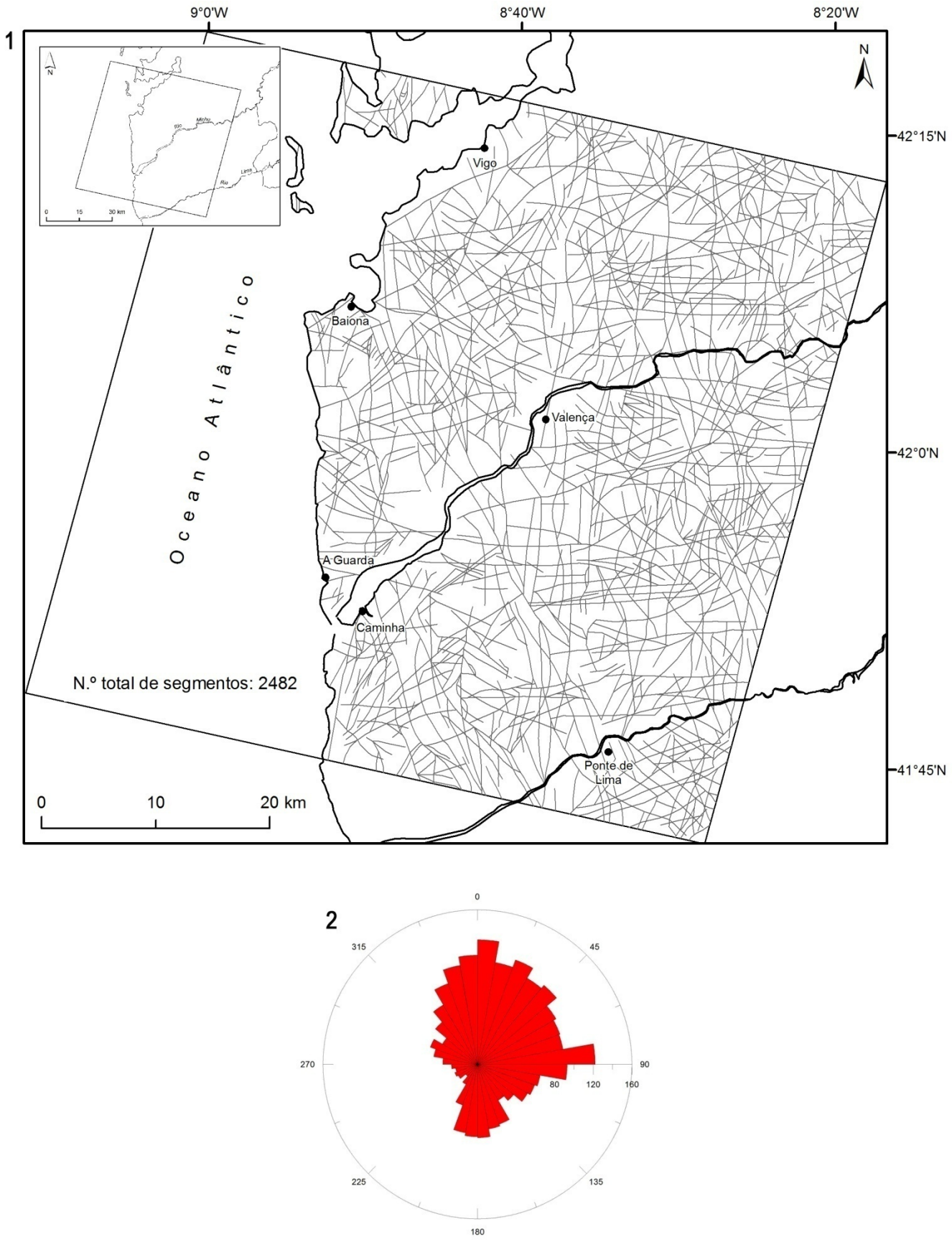


Figura IV.2 – 1: Mapa de lineamentos estruturais; 2: Orientação dos lineamentos.

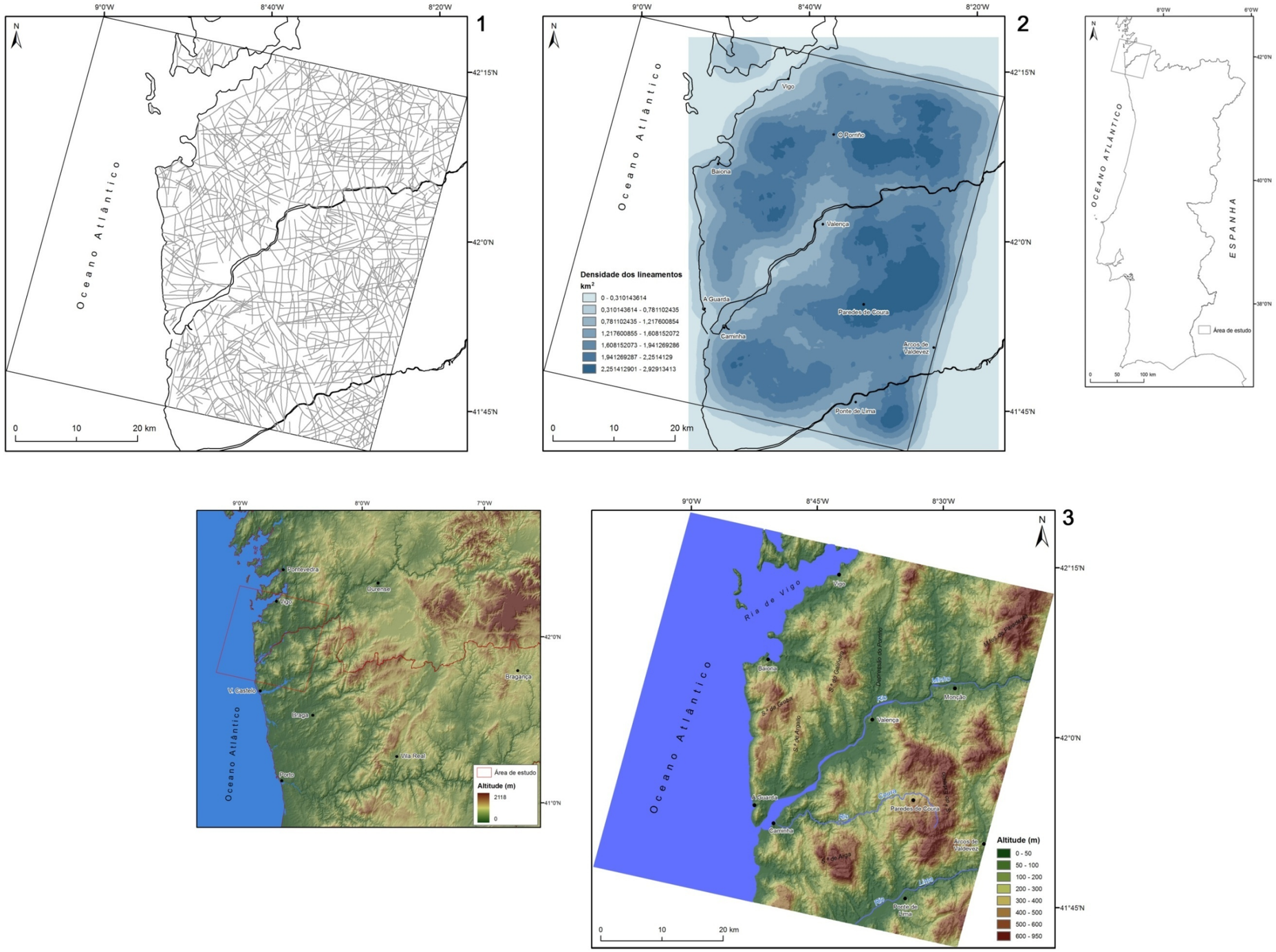


Figura IV.3 – 1: Mapa de lineamentos estruturais; 2: Mapa de densidade dos lineamentos estruturais (tamanho de célula de 20 m e raio de 4000 m); 3: Mapa hipsométrico sobreposto ao modelo digital de elevação sombreado (5x de grau de sobreelevação).

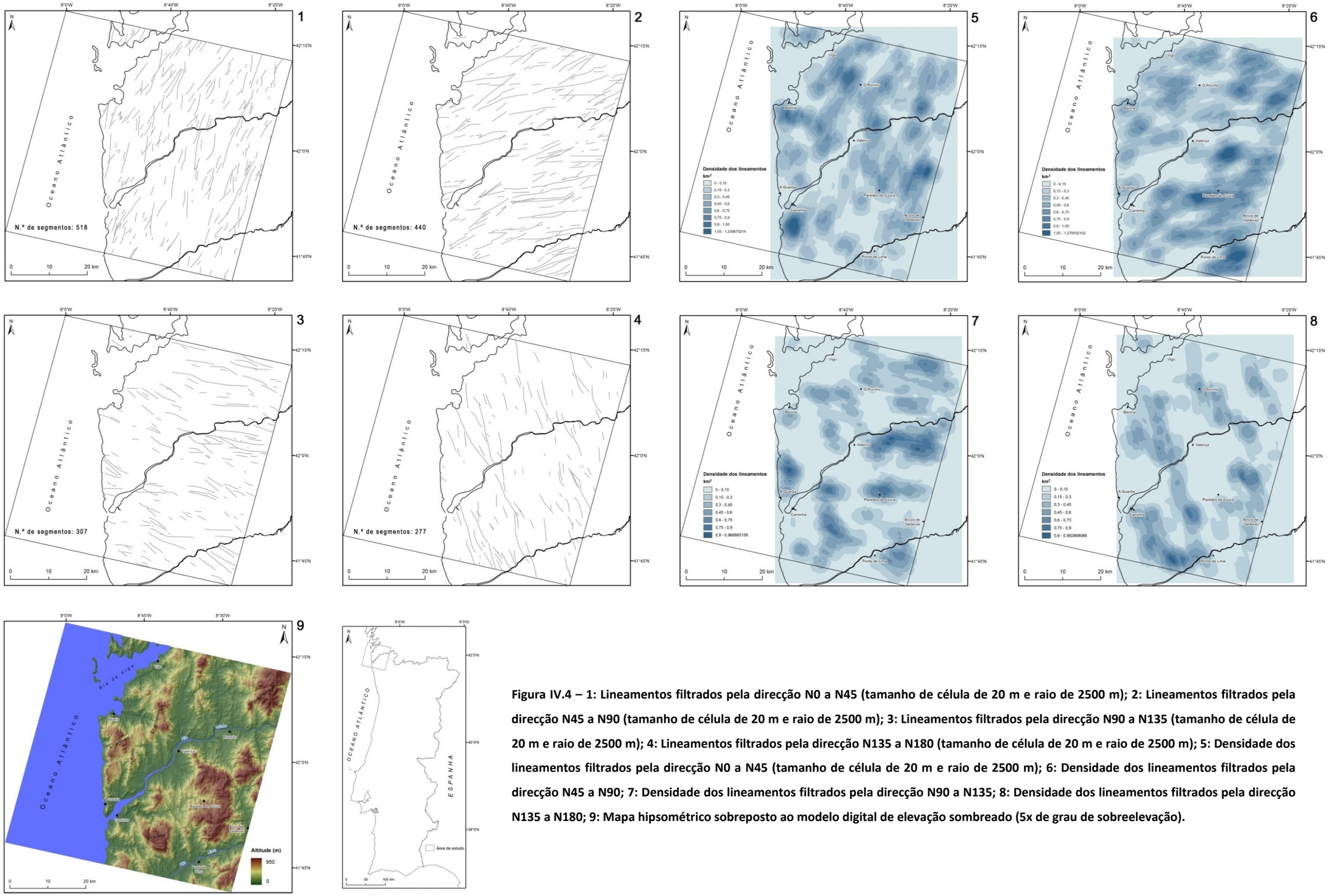
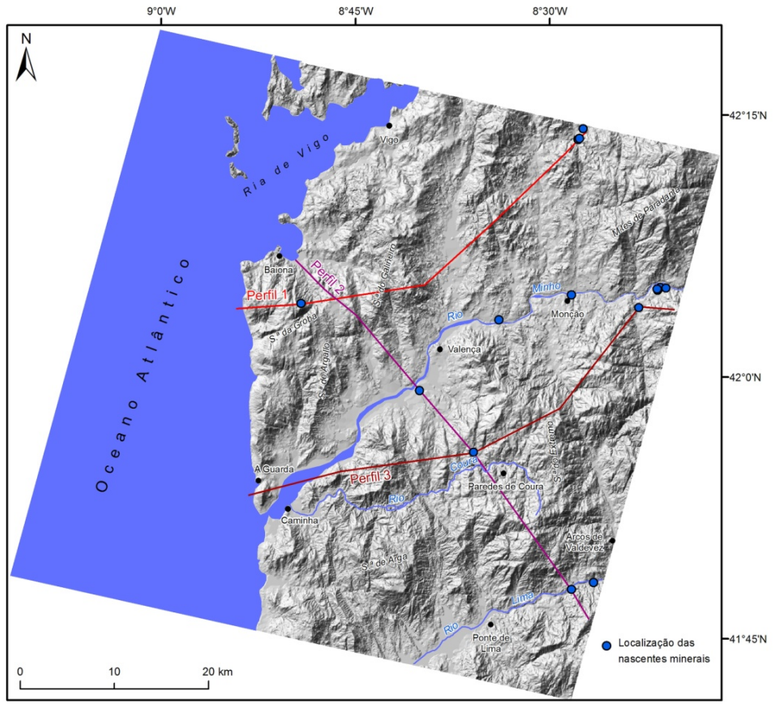
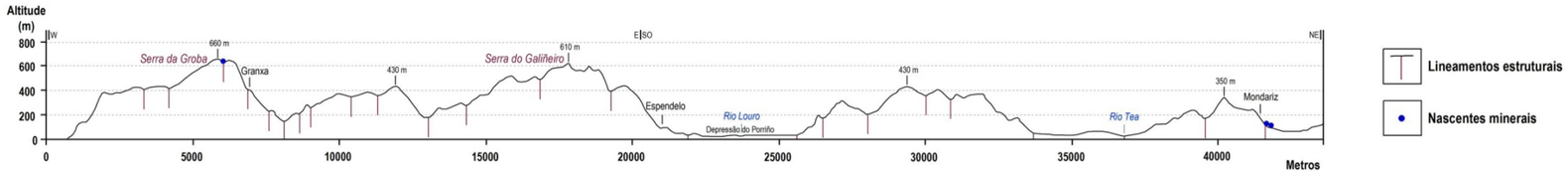


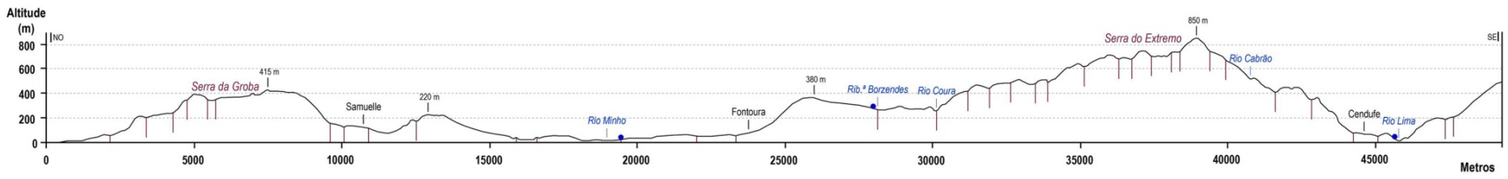
Figura IV.4 – 1: Lineamentos filtrados pela direcção N0 a N45 (tamanho de célula de 20 m e raio de 2500 m); 2: Lineamentos filtrados pela direcção N45 a N90 (tamanho de célula de 20 m e raio de 2500 m); 3: Lineamentos filtrados pela direcção N90 a N135 (tamanho de célula de 20 m e raio de 2500 m); 4: Lineamentos filtrados pela direcção N135 a N180 (tamanho de célula de 20 m e raio de 2500 m); 5: Densidade dos lineamentos filtrados pela direcção N0 a N45 (tamanho de célula de 20 m e raio de 2500 m); 6: Densidade dos lineamentos filtrados pela direcção N45 a N90; 7: Densidade dos lineamentos filtrados pela direcção N90 a N135; 8: Densidade dos lineamentos filtrados pela direcção N135 a N180; 9: Mapa hipsométrico sobreposto ao modelo digital de elevação sombreado (5x de grau de sobreelevação).



Perfil 1



Perfil 2



Perfil 3

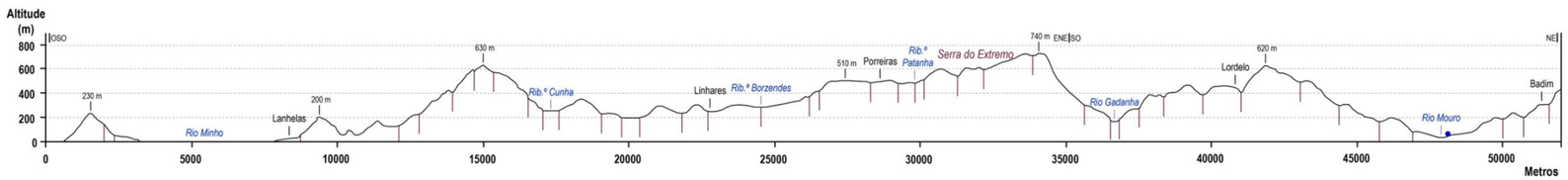


Figura IV.5 – Perfis topográficos realizados (sobreelevação vertical de 5x) e localização na área em estudo.

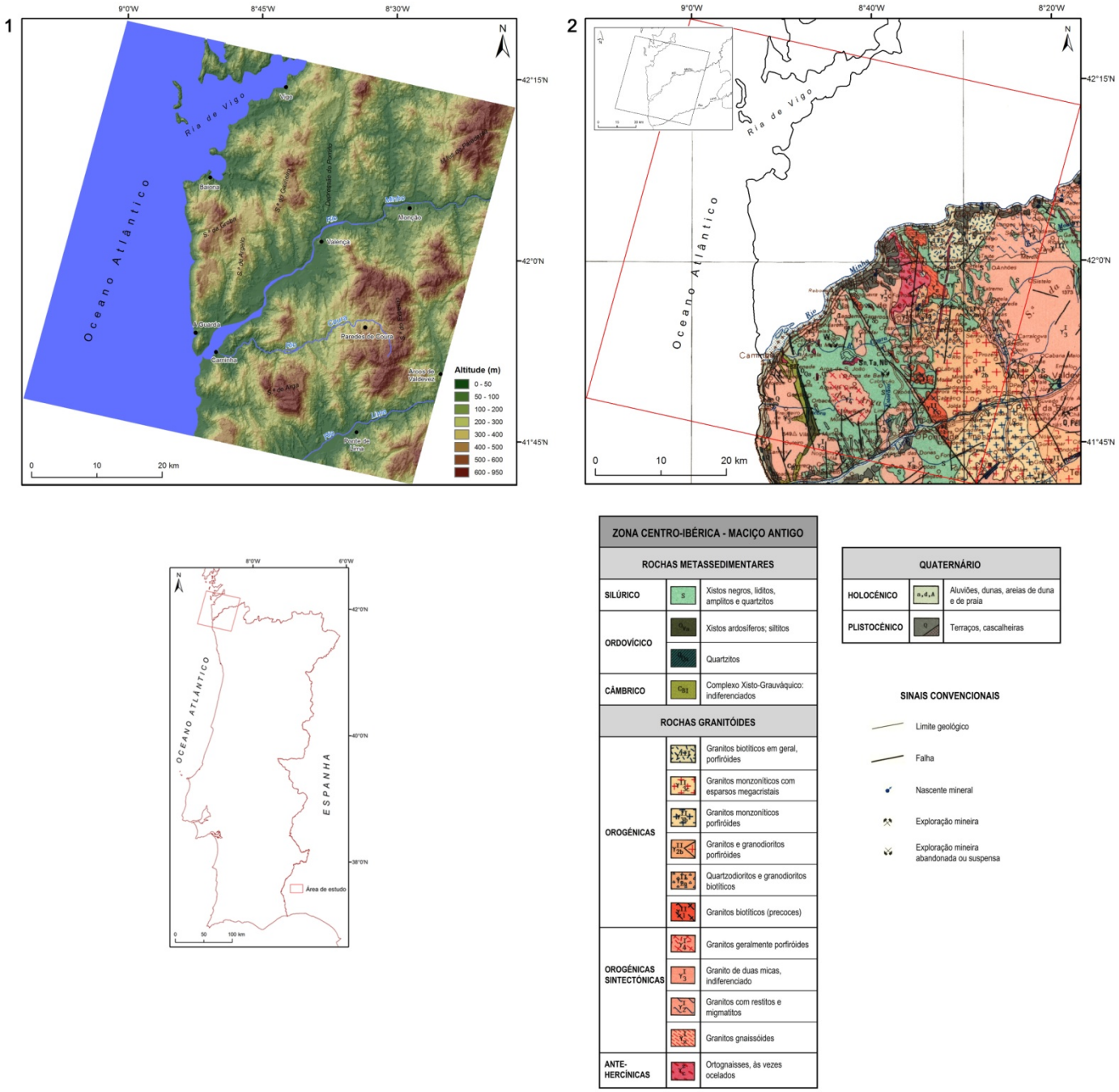


Figura IV.6 – 1: Mapa hipsométrico sobreposto ao modelo digital de elevação sombreado (5x de grau de sobreelevação); 2: Mapa geológico da área em estudo (fonte: Carta Geológica de Portugal, 1:500 000, SGP, Lisboa, 1992).

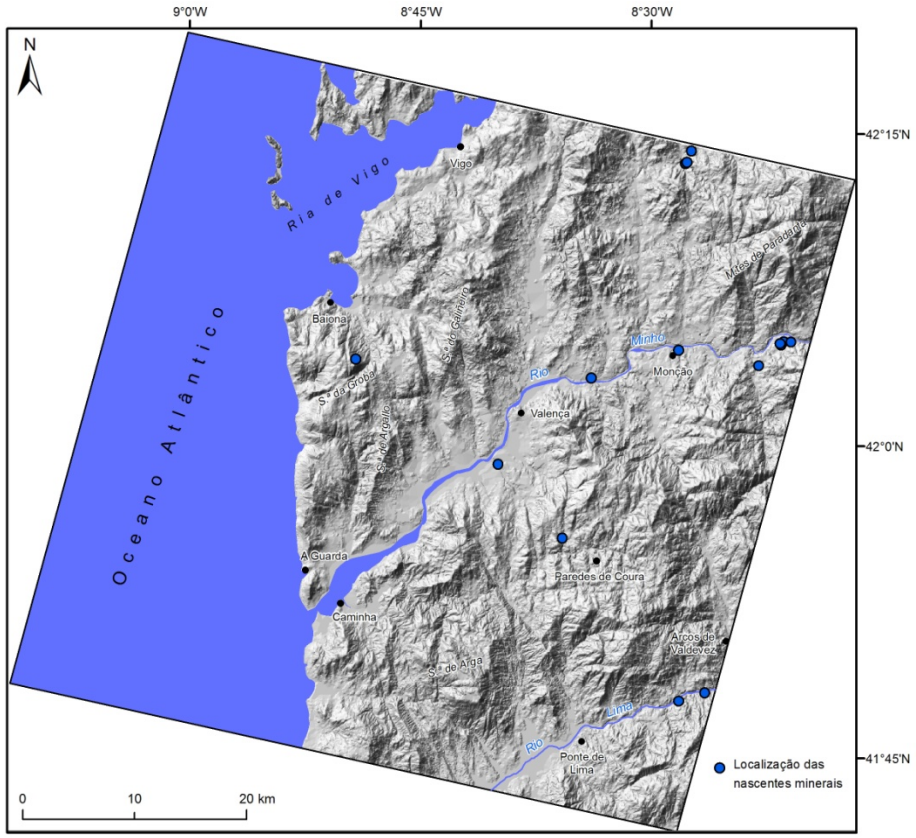


Figura IV.7 – Localização topográfica das nascentes minerais.

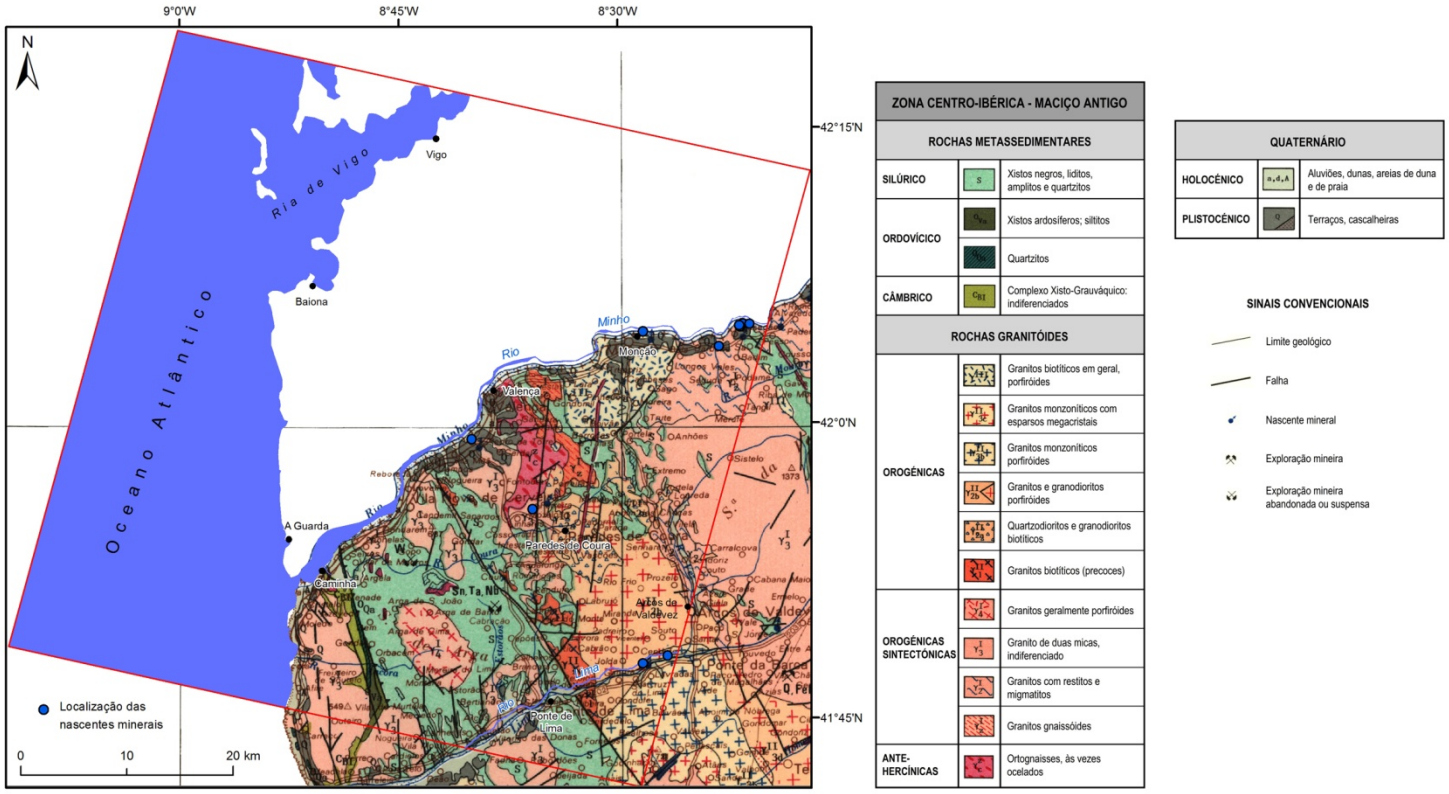


Figura IV.8 – Relação entre nascentes minerais e o tipo de litologia.

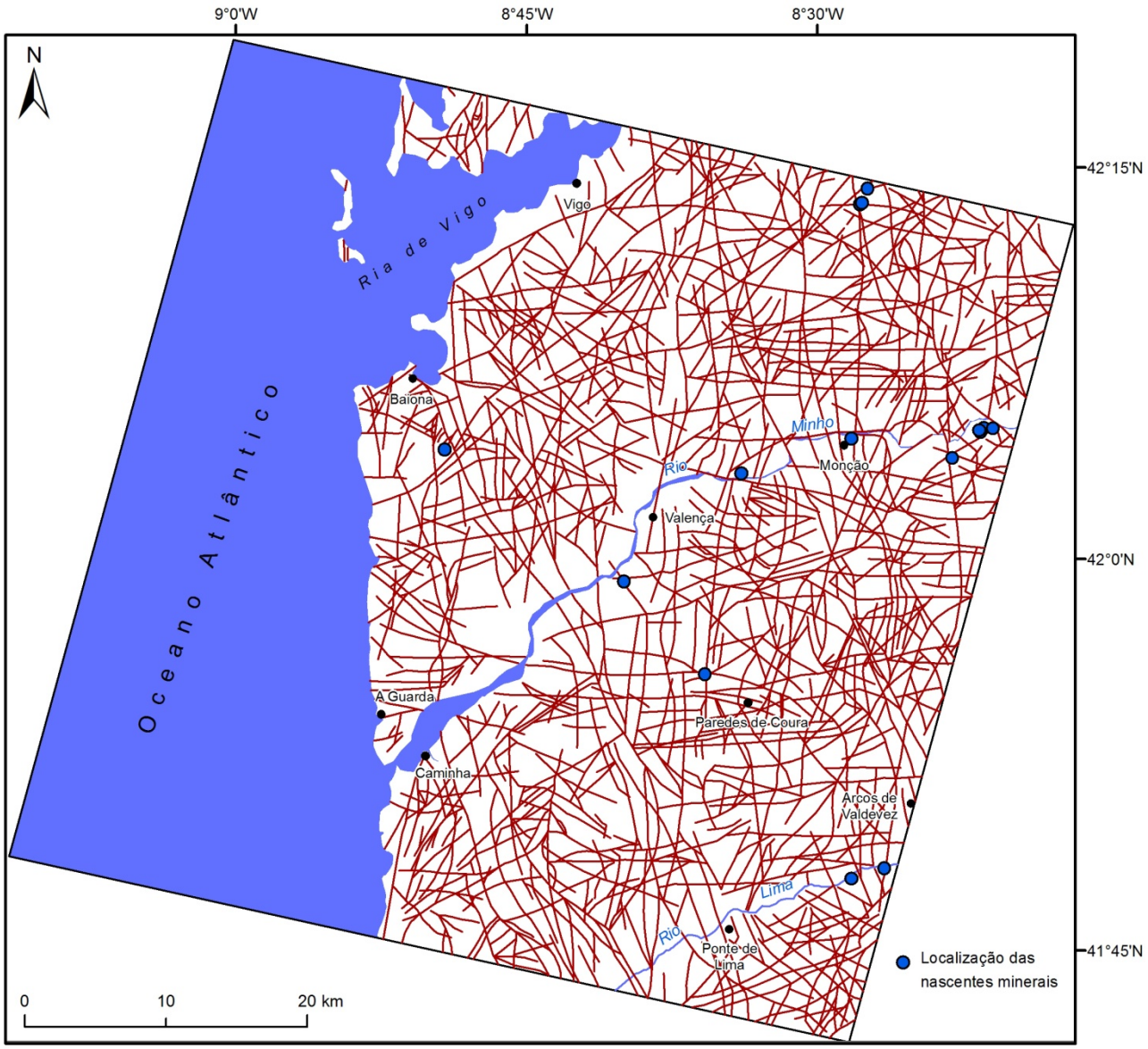
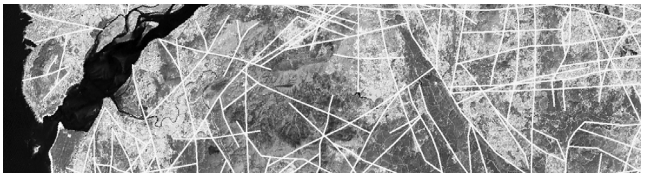


Figura IV.9 – Relação entre a posição dos lineamentos estruturais e a localização das nascentes minerais.



V. CONCLUSÕES

Actualmente, o número de estudos que se apoiam em processos de detecção remota tem vindo a aumentar. As aplicações são, também, cada vez mais diversas.

A identificação de lineamentos estruturais em gabinete tem-se consubstanciado, sobretudo, na análise e na interpretação visual de fotografias aéreas. Estas formas de representação da superfície terrestre possuem, normalmente, uma resolução espacial superior à das imagens de satélite (devido à menor altitude da plataforma que alberga o sensor), permitindo escalas de análise mais pormenorizadas, mas, por registarem apenas informação num único intervalo espectral – espectro visível – não possibilitam o mesmo nível de reconhecimento e diferenciação dos alvos que os dados dos sensores multiespectrais, pelo facto de não proporcionarem assinaturas espectrais tão rigorosas. Por outro lado, não permitem a visão sinóptica das imagens de satélite, pelo que não foram utilizadas neste trabalho.

As imagens de detecção remota espacial estão, pois, a começar a revolucionar o trabalho dos geógrafos e dos geólogos e provaram ser recursos indispensáveis para melhorar o processo de cartografia geológica e geomorfológica. A evolução tecnológica registada nos últimos anos tem permitido a concepção e o desenvolvimento de novos sensores com resoluções espaciais e espectrais mais finas, o que estimulará ainda mais o interesse da comunidade científica pelas potencialidades desta ciência.

A cartografia de lineamentos tem constituído, no contexto da cartografia geológica e geomorfológica, a maior aplicação da análise visual a partir de imagens espaciais.

As técnicas de processamento digital dos dados de detecção remota usadas, ao melhorarem a qualidade visual das imagens brutas, constituíram uma mais-valia na identificação de lineamentos estruturais, permitindo um reconhecimento visual mais expedito destas estruturas lineares.

Neste estudo, essencialmente metodológico, a utilização combinada de dados altimétricos e espectrais de detecção remota permitiu a identificação de mais de 2400 segmentos de lineamentos estruturais na área seleccionada.

N.º de segmentos		Peso no n.º total de segmentos
SPOT 4 HRVIR	1596	64,3%
Landsat 7 ETM+	159	6,4%
MDE	727	29,3%

Quadro 5 – Número de segmentos de lineamentos estruturais obtidos a partir dos dados espectrais e altimétricos e respectivo peso no número total de segmentos.

A grande maioria dos lineamentos foi identificada através das imagens do sensor HRVIR, do satélite SPOT 4 (cf. Quadro 5).

O recurso a imagens do sensor ETM+, do satélite Landsat 7, permitiu um acréscimo de mais de 6% de segmentos, em virtude da maior resolução espectral deste sensor e da diferente data de aquisição dos dados, com ângulo de elevação e azimute do Sol distintos das imagens do sensor HRVIR, o que possibilitou a identificação de lineamentos que, nestas imagens, não eram detectados.

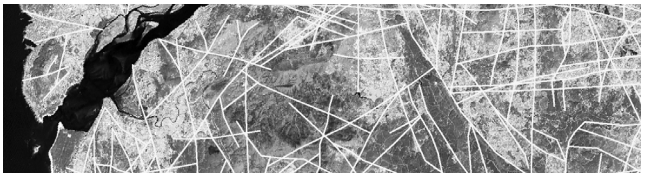
A interpretação dos aspectos geomorfológicos realçados no mapa de sombreado obtido a partir do MDE possibilitou um acréscimo de cerca de 29% de segmentos ao total obtido pelos processos anteriores.

Apesar de se ter verificado uma elevada coincidência entre os lineamentos vectorizados sobre as imagens de satélite e a morfologia evidenciada no mapa de sombreado, este último processo afigurou-se extremamente vantajoso na identificação de lineamentos estruturais em áreas urbanizadas, como a de A Guarda e a de entre Vigo e Baiona, no sector galego, e a de Caminha, a de Ponte de Lima, a de Valença e a de Monção, no sector português, onde a interpretação visual sobre as imagens de satélite apresentava, evidentemente, limitações. Por outro lado, ao possibilitar escalas de análise mais pormenorizadas, permitiu melhorar a precisão da localização de lineamentos estruturais previamente marcados através da análise dos dados espectrais.

Por sua vez, alguns dos lineamentos obtidos pela análise visual das imagens de satélite não eram detectados no mapa de sombreado, especificamente em áreas aplanadas ou com pouca irregularidade altimétrica.

O cruzamento de dados espectrais e altimétricos para a consecução do objectivo essencial deste trabalho revelou-se, desta forma, bastante útil, na medida em que as limitações de qualquer um desses processos foram compensadas pelas vantagens do outro. Esta utilização combinada de dados altimétricos e espectrais poderá, inclusive, ser aprofundada e enriquecida futuramente com os dados gratuitos do projecto ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM – disponível em www.gdem.aster.ersdac.or.jp/), de parceria conjunta entre o Japão e os E.U.A, disponibilizados recentemente.

Os resultados obtidos poderão encetar diversos trabalhos de investigação no futuro. Nesta dissertação, fez-se uma breve incursão por apenas duas das aplicações possíveis: a expressão geomorfológica dos lineamentos estruturais e a sua relação com a localização das nascentes minerais e termais, que constituem temas promissores para futuros estudos.



VI. BIBLIOGRAFIA

Araújo, M. A. e Pérez Alberti, A. (1999). Os meios geográficos no noroeste peninsular. Geografia do Eixo Atlântico, Universidade de Santiago de Compostela, pp. 137-200.

Bakker, W. H. et al. (2004). Principles of Remote Sensing. An introductory textbook. The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, 540 pp.

Bateira, C. V. (2001). Movimentos de vertente no NW de Portugal, Susceptibilidade Geomorfológica e Sistemas de Informação Geográfica. Tese de Doutoramento, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 475 pp.

Belward, A. S. e Valenzuela, C. R. (1991). Remote sensing and geographical information systems for resource management in developing countries. Springer, 506 pp.

Brum da Silveira, A. P. (2002). Neotectónica e Sismotectónica de um sector do Alentejo Oriental. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 339 pp.

Brum Ferreira, A. d. (1983). Problemas da evolução geomorfológica quaternária do noroeste de Portugal. Cuadernos do Laboratório Xeológico de Laxe, 5: 311-332.

Brum Ferreira, A. d. (1991). Neotectonics in Northern Portugal. A geomorphological approach, Z. Geomorph. N. F., pp. 73-85.

Brum Ferreira, D. d. (1981). Carte Géomorphologique du Portugal. Memórias do Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa, N.º 6, Lisboa, 53 pp.

Carvalho, J. M. (2006). Prospecção e pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Maciço Antigo Português: linhas metodológicas. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 292 pp.

Cook, P. C. (2003). A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers. CSIRO Land and Water. Seaview Press, Glen Osmond, 115 pp.

Coudé-Gaussen, G., 1981. Les Serras da Peneda et do Gerês. Memórias do Centro de Estudos Geográficos, N.º 5, Lisboa, 254 pp.

Feio, M. e Brito, R. S. (1949). Les vallées de fracture dans le modelé granitique portugais. Comptes Rendus du Congrés International de Géographie, UGI, Lisboa, pp. 254-262.

Feio, M. (1951). Reflexões sobre o relevo do Minho. Notas Geomorfológicas I, Lisboa, CEG, pp. 5-46.

Fonseca, A. D. e Fernandes, J. C. (2004). Detecção Remota. Lidel Edições Técnicas, Lisboa, 224 pp.

Gomes, A. (2008). Evolução Geomorfológica da Plataforma Litoral entre Espinho e Águeda. Tese de Doutoramento, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 347 pp.

Hobbs, W. H. (1904). Lineaments of the Atlantic border region. Geological Society American Bulletin, 15: pp. 483-506.

Jensen, J. R. (2000). Remote Sensing of The Environmet – An Earth Resource Perspective. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 544 pp.

Keller, E. A. (2002). Active Tectonics. Prentice Hall, Upper Saddle River, 362 pp.

Keller, E. A. e Pinter, N. (1996). Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape. Prentice Hall, New Jersey, 338 pp.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. e Chipman, J.W. (2003). Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Nova Iorque, 704 pp.

López, L. A. (2003). Análisis de la fracturación en un área granítica intraplaca: El Domo del Tormes. Tese de Doutoramento, Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Geológicas, Madrid, 198 pp.

Marques, F. O. et al. (2001). The Amares basin: an ENE-WSW graben formed by recent reactivation of the late-Variscan fracture network? Comun. Inst. Geol. e Mineiro, 88: 33-50.

Mather, P. M. (2006). Computer Procesing of Remotely-Sensed Images. An Introduction. John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, 324 pp.

O' Leary, D. W., Friedman, J. D. e Pohn, H. A. (1976). Lineament, linear lineation, some proposed new standards for old terms. Geological Society American Bulletin, 87.

Pérez, M. P. V. (2002). Cinemática Terciaria y Cuaternaria de la Falla de Alentejo-Plasencia y su Influencia en la Peligrosidad Sísmica del Interior de la Península Ibérica. Tese de Doutoramento, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense Madrid, Madrid, 343 pp.

Pereira, D. I. (1989). Sedimentologia e estratigrafia dos depósitos quaternários do rio Minho (região de S. Pedro da Torre). Provas de A.P.C.C., Universidade do Minho, 132 p.

Rabaça, T. J. L., Conde, L. N., Pinto, A. F. F. e Pereira, A. J. S. C. (2004). Avaliação das potencialidades de técnicas de detecção remota como suporte à cartografia geológica na região central de Portugal. Revista electrónica de Ciências da Terra: 1-14.

Richards, J. A. e Jia, X. (2006). Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. Springer, Nova Iorque, 439 pp.

Sabins, F. F. (1997). Remote Sensing. Principles and Interpretation. Waveland Press, Inc., Long Groove, 494 pp.

Salinero, E. C. (2007). Teledetección Ambiental. La observatión de la Tierra desde el Espacio. Editorial Ariel, Barcelona, 586 pp.

Sander, P. (2007). Lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations. Hydrogeology Journal, 15: pp. 71-74.

Sausen, T. M. (1997). Projecto Educa SeRe. Cadernos Didácticos n.º 1. Programas Espaciais. Sistemas Sensores Ópticos. Landsat. SELPER/Capítulo Brasil e INPE, São José dos Campos, 37 pp.

Silva, S., Caranova, R., Cabral, J. e Costa, A. M. (2006). Análise e interpretação de imagens de satélite Landsat TM 5 da região Norte de Portugal Continental, VII Congresso Nacional de Geologia. Universidade de Évora, Pólo de Estremoz da Universidade de Évora, pp. 1133-1136.

Soares, L. (2007). A importância das formações superficiais no âmbito dos processos de erosão hídrica e movimentos de vertente no NW de Portugal. Tese de Doutoramento, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto, 850 pp.

Torrecilla, R. C. et al. (2007). Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGis. Ra-Ma Editorial, Madrid, 911 pp.

Cartografia

Carta Geológica de Portugal, 1/500 000, folha nº 1, Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, 1992.

Carta Militar de Portugal, 1/25 000, folhas nºs 2, 3, 4, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 27, 28, 29, 40, 41 e 42 (altimetria, em suporte digital – ficheiro vectorial), Instituto Geográfico do Exército, Lisboa.

Carta Neotectónica de Portugal, 1/ 1 000 000, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 1989.

Carta Geomorfológica de Portugal, 1/500 000, Memórias do Centro de Estudos Geográficos, Nº 6, Lisboa, 1981.

Mapa Topográfico Nacional, 1/25000, folhas nºs 222, 223, 224, 260, 261, 262, 298 e 299 (suporte digital – ficheiros vectoriais), Instituto Geografico Nacional, Espanha.

Imagens de satélite

Cena *p*204, *r*31, 24/06/2000, Landsat 7 ETM+ (NASA Landsat Program, 2000, Landsat ETM+ scene LG1p204_r031_7t20000624, SLC-Off, USGS, Sioux Falls, 06/24/2000).

Cena *t*22, *f*265, 23/08/2006, SPOT 4 HRVIR (Dados cedidos pela ESA – *European Space Agency* –, projecto IMAGE2006).

Fotografias aéreas

Ortofotos 154A, 154B, 163A, 282A, 282B, 284A, 284B, 291A, 293A, 1/5000, Instituto Geográfico Português, 2005.

ANEXOS

ANEXO 1

Cálculo do Optimum Index Factor (OIF)

Landsat 7 ETM+, *path/row 204/31*, 24-06-2000

$$OIF = \frac{\sum_{k=1,3} S_k}{\sum_{j=1,3} |r_j|}$$

S_k - desvio-padrão de cada uma das três bandas que integram a composição colorida

r_j - coeficiente de correlação entre cada par de bandas da composição colorida

Banda	Desvio-padrão (S)
1	38,7264
2	30,8301
3	30,3084
4	45,8458
5	50,9929
6	____
7	32,7174

Combinações possíveis	Somatório do desvio-padrão (S) de cada banda da combinação
1-2-3	99,8649
1-2-4	115,4023
1-2-5	120,5494
1-2-7	102,2739
1-3-4	114,8806
1-3-5	120,0277
1-3-7	101,7522
1-4-5	135,5651
1-4-7	117,2896
1-5-7	122,4367
2-3-4	106,9843
2-3-5	112,1314
2-3-7	93,8559
2-4-5	127,6688
2-4-7	109,3933
2-5-7	114,5404
3-4-5	127,1471
3-4-7	108,8716
3-5-7	114,0187
4-5-7	129,5561

Combinações possíveis	Pares de bandas da combinação	Coeficientes de correlação (r)	Somatório dos coeficientes de correlação (r) de cada par da combinação	Optimum Index Factor (OIF)
1-2-3	1-2	0,96	2,82	35,4131
	1-3	0,89		
	2-3	0,97		
1-2-4	1-2	0,96	2,45	47,1030
	1-4	0,68		
	2-4	0,81		
1-2-5	1-2	0,96	2,53	47,6480
	1-5	0,71		
	2-5	0,86		
1-2-7	1-2	0,96	2,54	40,2653
	1-7	0,72		
	2-7	0,86		
1-3-4	1-3	0,89	2,34	49,0943
	1-4	0,68		
	3-4	0,77		
1-3-5	1-3	0,89	2,50	48,0111
	1-5	0,71		
	3-5	0,90		
1-3-7	1-3	0,89	2,54	40,0599
	1-7	0,72		
	3-7	0,93		
1-4-5	1-4	0,68	2,30	58,9413
	1-5	0,71		
	4-5	0,91		
1-4-7	1-4	0,68	2,20	53,3135
	1-7	0,72		
	4-7	0,80		
1-5-7	1-5	0,71	2,40	51,0153
	1-7	0,72		
	5-7	0,97		
2-3-4	2-3	0,97	2,55	41,9546
	2-4	0,81		
	3-4	0,77		
2-3-5	2-3	0,97	2,73	41,0738
	2-5	0,86		
	3-5	0,90		
2-3-7	2-3	0,97	2,76	34,0058
	2-7	0,86		
	3-7	0,93		
2-4-5	2-4	0,81	2,58	49,4840
	2-5	0,86		
	4-5	0,91		

2-4-7	2-4	0,81	2,47	44,2888
	2-7	0,86		
	4-7	0,80		
2-5-7	2-5	0,86	2,69	42,5801
	2-7	0,86		
	5-7	0,97		
3-4-5	3-4	0,77	2,58	49,2818
	3-5	0,90		
	4-5	0,91		
3-4-7	3-4	0,77	2,50	43,5486
	3-7	0,93		
	4-7	0,80		
3-5-7	3-5	0,90	2,80	40,7210
	3-7	0,93		
	5-7	0,97		
4-5-7	4-5	0,91	2,68	48,3418
	4-7	0,80		
	5-7	0,97		

Combinações possíveis	Ordem decrescente do Optimum Index Factor (OIF)
1-4-5	**58,9413**
1-4-7	**53,3135**
1-5-7	**51,0153**
2-4-5	49,4840
3-4-5	49,2818
1-3-4	49,0943
4-5-7	48,3418
1-3-5	48,0111
1-2-5	47,6480
1-2-4	47,1030
2-4-7	44,2888
3-4-7	43,5486
2-5-7	42,5801
2-3-4	41,9546
2-3-5	41,0738
3-5-7	40,7210
1-2-7	40,2653
1-3-7	40,0599
1-2-3	35,4131
2-3-7	34,0058

ANEXO 2

Cálculo do Optimum Index Factor (OIF)

SPOT 4 HRVIR, *track/frame 22/265*, 23-08-2006

$$OIF = \frac{\sum_{k=1,3} S_k}{\sum_{j=1,3} |r_j|}$$

S_k - desvio-padrão de cada uma das três bandas que integram a composição colorida

r_j - coeficiente de correlação entre cada par de bandas da composição colorida

Banda	Desvio-padrão (S)
1	28,0893
2	41,1815
3	37,0209
4	40,6054

Combinações possíveis	Somatório do desvio-padrão (S) de cada banda da combinação
1-2-3	106,2917
1-2-4	109,8762
1-3-4	105,7156
2-3-4	118,8078

Combinações possíveis	Pares de bandas da combinação	Coeficientes de correlação (r)	Somatório dos coeficientes de correlação (r) de cada par da combinação	Optimum Index Factor (OIF)
1-2-3	1-2	0,98	2,55	41,6830
	1-3	0,78		
	2-3	0,79		
1-2-4	1-2	0,98	2,69	40,8462
	1-4	0,82		
	2-4	0,89		
1-3-4	1-3	0,78	2,50	42,2862
	1-4	0,82		
	3-4	0,90		
2-3-4	2-3	0,79	2,58	46,0495
	2-4	0,89		
	3-4	0,90		

Combinações possíveis	Ordem decrescente do Optimum Index Factor (OIF)
2-3-4	46,0495
1-3-4	42,2862
1-2-3	41,6830
1-2-4	40,8462