



Metodologias para a análise de lineamentos geo-estruturais a partir de imagens LANDSAT e SPOT: o exemplo da região entre Vigo e Viana do Castelo (NW da Península Ibérica)

Methodologies for the analysis of geo-structural lineaments from LANDSAT and SPOT images: the example of the region between Vigo and Viana do Castelo (NW Iberian Peninsula)

Pinho, R. ¹ ✉ - Gomes, A. ¹ - Pérez - Alberti, A. ² - Chaminé, H. I. ³

Recibido: 29 de Junio de 2012 • Aceptado: 24 de Setiembre de 2012

Resumo

O presente estudo tem como objectivo a apresentação de metodologias para a detecção remota de lineamentos geo-estruturais a partir de imagens dos satélites LANDSAT e SPOT. Será dada ênfase aos lineamentos com potencial interesse geomorfológico no NW de Portugal Continental e no SW da Galiza (Espanha), através da utilização combinada de dados espectrais de detecção remota espacial, dos sensores ETM+ e HRVIR (satélites Landsat 7 e SPOT 4, respectivamente), bem como de dados altimétricos. A interpretação visual dos dados espectrais foi aperfeiçoada através da aplicação de técnicas de processamento digital, que consistiram na melhoria do contraste tonal por expansão linear do histograma e na aplicação de um filtro espacial de realce de contornos não direccional. Foram utilizadas várias composições coloridas RGB para a identificação de lineamentos estruturais e compararam-se as potencialidades e fragilidades exibidas pela interpretação morfoestrutural que as imagens de satélite permitiram evidenciar para a área de estudo. A identificação deste tipo de estruturas culminou na elaboração de uma cartografia de lineamentos geo-estruturais, que integrou os elementos lineares vectorizados sobre as imagens de satélite e sobre o modelo digital de terreno (MDT).

¹ Departamento de Geografia da Universidade do Porto e Centro CEGOT, Portugal;

✉ rfcpinho@yahoo.com

² Departamento de Geografia e Instituto de Investigaciones Tecnológicas (Área de Geomorfología), Universidade de Santiago de Compostela, Galicia, España;

³ Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada, DEG, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Politécnico do Porto e Centro GeoBioTec|UA, Portugal

Palavras-Chave: Geomorfologia estrutural, Lineamentos, Detecção Remota, LANDSAT, SPOT, NW da Península Ibérica

Abstract

This study aims to present methodologies to obtain geo-structural lineaments from LANDSAT and SPOT satellite images. Emphasis will be given to lineaments with potential geomorphological interest in the NW Portugal and SW Galicia (Spain), through the combined use of spectral data from spatial remote sensing, obtained by ETM+ and HRVIR sensors (Landsat 7 and SPOT 4 satellites, respectively), and altimetric data. Visual interpretation of the spectral data was improved by the application of digital processing enhancement techniques. Those consisted in tonal contrast improvement by linear expansion of the histogram and the application of a non-directional spatial filter of contours enhancement. Several RGB color compositions were used for the identification of geo-structural lineaments in the study area and the strengths and weaknesses shown by the morphostructural interpretation that the satellite images could highlight were compared. The identification of these structures culminated in geo-structural lineaments mapping, which integrated the vectorized linear features on the satellite imagery and on the digital terrain model (DTM).

Key words: Structural Geomorphology, Lineaments, Remote Sensing, LANDSAT, SPOT, NW Iberia

INTRODUÇÃO

A noção de lineamento pode ser encarada 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 e não antrópico” (Brum da Silveira, 2002) e, por isso, revelador de uma estrutura tectónica ou de uma zona de fraqueza crustal (Sabins, 1997).

A detecção remota 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 Maciço Ibérico no domínio das Ciências da Terra, incluindo, por exemplo, várias áreas disciplinares da geomorfologia, da geologia estrutural e da geologia económica, como as cartografias geológico-estrutural e geomorfológica (e.g., Carvalho et al. 1978, Blanchard et al. 1979, Gutiérrez Claverol et al., 1988, Sabins, 1997; Brum da Silveira, 2002; Rabaça et al., 2004; Silva et al., 2006; Martín-González et al., 2007; Pinho et al., 2008, 2009; Pérez-Alberti et al., 2009). 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 a detecção de lineamentos. O recurso a dados de detecção remota espacial, como as imagens de satélite, tem tido um papel de menor relevo neste contexto.

Neste estudo, essencialmente de carácter metodológico, a identificação de lineamentos 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. A interpretação visual das imagens Landsat 7 e SPOT 4 foi aperfeiçoada através da aplicação de duas técnicas de processamento digital: melhoria do contraste tonal por expansão linear do histograma (Sabins, 1997; Mather, 2006; Salinero, 2007) e 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.

O presente estudo 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.

ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo seleccionada para este trabalho constitui um polígono quadrangular, com uma área de aproximadamente 3600 km² (60 km x 60 km) e corresponde à área abrangida pela cena SPOT (sensor HRVIR) utilizada neste estudo (Figura 1). 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).

A análise da topografia sugere que a área em estudo pode ser subdividida em três unidades principais (Figura 2). A primeira corresponde a uma superfície de aplanamento pouco desenvolvida e imperfeita, de idade provavelmente Plio-quadernária, que penetra ao longo dos rios principais – Minho, Lima e Couira (Brum Ferreira, 1983). 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 na superfície. Estas características esbatem-se no sector oriental da área de estudo, em que o encaixe vigoroso dos vales passa a dominar a morfologia (e.g., Teixeira, 1944; Brum Ferreira, 1983; Soares de Carvalho, 1992; Soares, 2007). A segunda unidade de relevo é constituída por um conjunto de depressões de direcção meridiana (Araújo & Pérez Alberti, 1999), como é o caso da do Porriño, que constituem a segunda unidade de relevo. A superfície de aplanamento é interrompida por serras litorais, como a serra de Arga (823 m), no sector português, e serras interiores de direcção principal NNW-SSE, tanto no sector galego como no sector português, que constituem a terceira grande unidade de relevo. O relevo da área é um autêntico “puzzle” de blocos alternadamente afundados e soerguidos que se encadeiam entre a faixa costeira e as áreas mais interiores (Araújo & Pérez Alberti, 1999). 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).

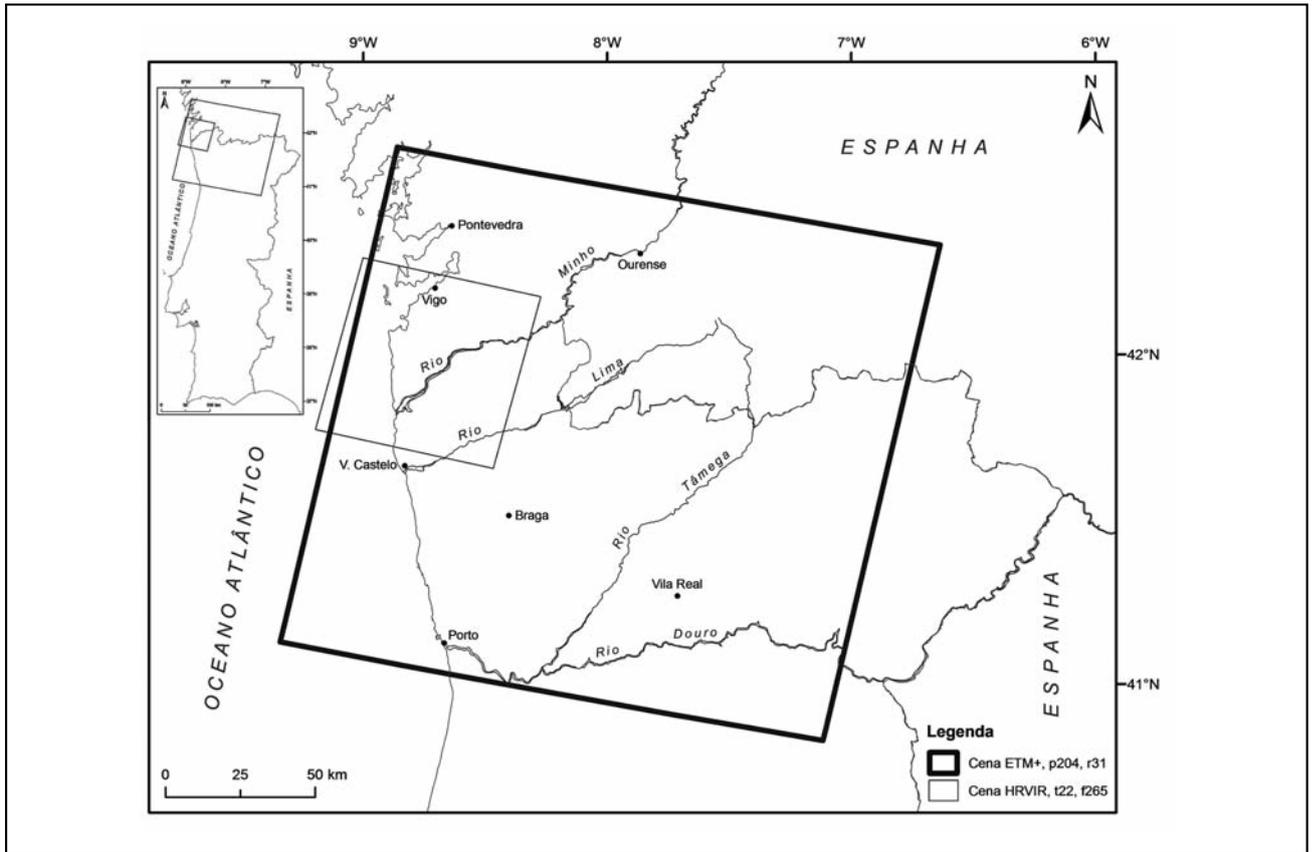


Figura 1. Enquadramento regional do sector de estudo e das cenas ETM+ e HRVIR utilizadas.

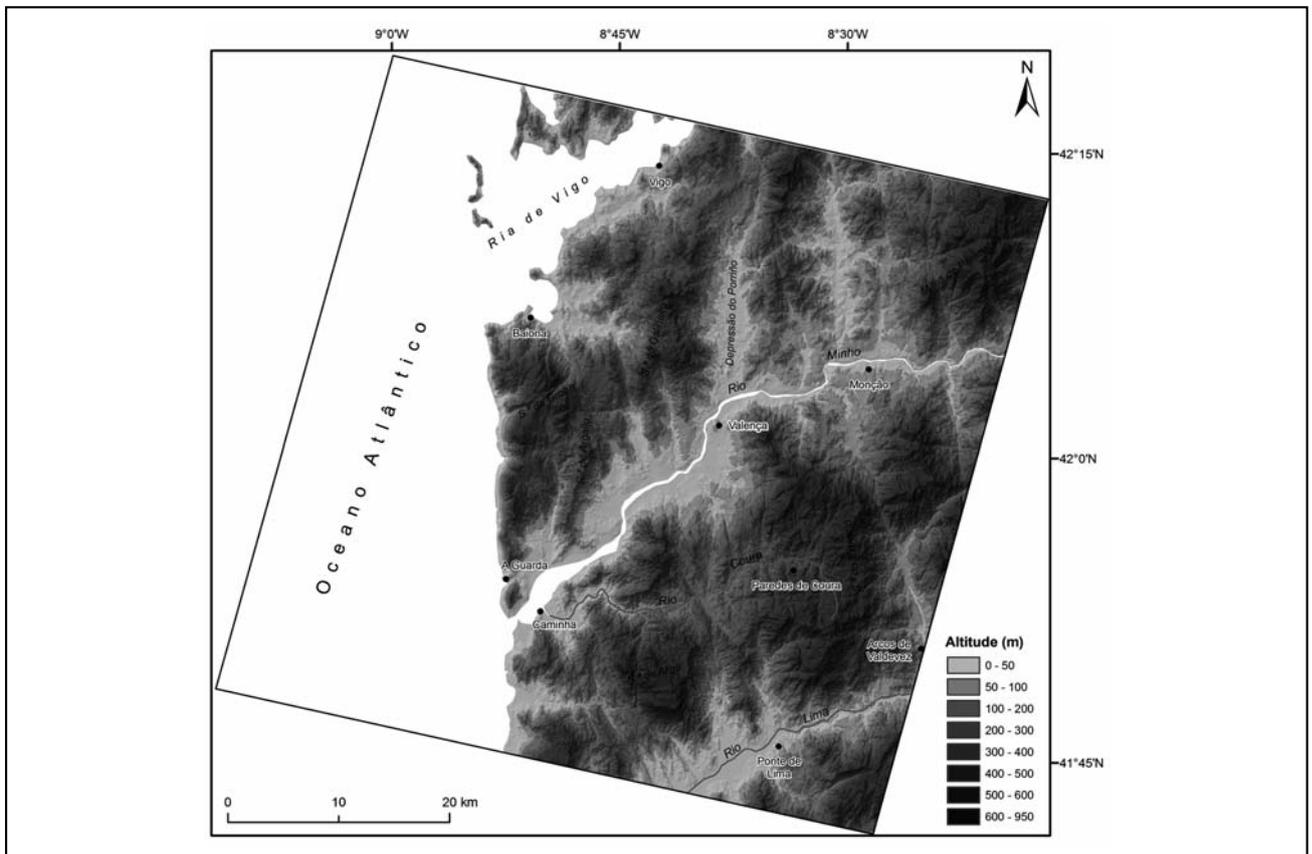


Figura 2. Mapa hipsométrico sobreposto ao modelo digital de elevação sombreado (5x de grau de sobre-elevação) para o sector em estudo.

MATERIAIS E MÉTODOS E RESULTADOS

A) Dados espectrais

A cena do sensor ETM+, onde se integra a área de estudo, foi obtida 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 orbital/ponto (*path/row*) 204/31 e abrange uma vasta área da região Norte de Portugal continental, tal como se pode observar na Figura 1. 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° e azimute do Sol de aproximadamente 127,7°. O ficheiro de metadados revelou que os dados de imagem estavam georreferenciados segundo o sistema de projecção Universal Transverse Mercator (U.T.M.), datum WGS-84 e que a cena tinha sido ortorrectificada. A cena SPOT foi obtida através do projecto *HydroSPOT* (<http://leopi.esa.int/esa/esa?aoiid=760&rs=1202903343469&cmd=ao-detail>) apoiado pela Agência Espacial Europeia (ESA). Esta cena tem centro nominal orbital/ponto (*path/row*) 221/265 e abarca uma área francamente menor que a cena Landsat (cf. Figura 1), correspondendo, tal como se disse atrás, à área de estudo apresentada. A análise do ficheiro de metadados da cena SPOT indicou que a imagem estava georreferenciada segundo o sistema de projecção Lambert Azimuthal Equal Area (LAEA), datum ETRS 1989, e que tinha sido, igualmente, ortorrectificada. Visto que as duas cenas possuíam sistemas de projecção cartográfica diferentes, foi necessário atribuir-lhes um sistema de projecção comum. 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), de modo a permitir a sobreposição de toda a informação disponível. 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.

B) Dados altimétricos

A elaboração do MDT para a área de trabalho implicou 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 das duas entidades possuíam sistemas de projecção cartográfica diferentes, pelo que foi necessário atribuir-lhes um sistema de projecção cartográfica comum. Projectaram-se com o sistema de projecção Universal Transverse Mercator (U.T.M.), datum WGS-84 (Fuso 29, hemisfério norte), ou seja, o sistema utilizado para o conjunto de toda a informação incorporada no SIG. O MDT, em formato vectorial, foi elaborado no programa ArcGIS 9.2, e, posteriormente, convertido para o formato matricial. Foi ainda realçado pela aplicação do “efeito sombra”, que gerou um mapa de sombreado da área de estudo (azimute 315° e altura do Sol 45°), ao qual se aplicou um grau de sobrelevação vertical de 5 vezes, para enfatizar os aspectos morfológicos.

C) Processamento digital dos dados espectrais

As técnicas de melhoramento de imagem que seguidamente se descrevem foram executadas no programa PCI Geomatics 9.1.

Com vista à optimização da percepção visual dos elementos das imagens, foi 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*”), acompanhada de uma saturação de 1%, 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). Esta operação 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) e do sensor HRVIR (exceptuando a banda pancromática, não fornecida pela ESA). Os resultados obtidos melhoraram claramente o processo de interpretação visual, permitindo uma melhor discriminação dos elementos da imagem.

A segunda técnica de melhoramento de imagem utilizada consistiu na aplicação de 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 (Sabins, 1997). A modificação do contraste espacial 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). Neste estudo, utilizou-se um “*kernel*” de 3x3, com coeficiente central 8 e restantes coeficientes -1. Esta operação de filtragem foi feita banda a banda e o filtro aplicado foi não direccional, realçando os elementos lineares presentes em todas as direcções. A aplicação deste filtro foi bastante útil no processo de reconhecimento e marcação de lineamentos, pois, ao aumentar o detalhe geométrico na imagem, permitiu realçar zonas de fronteira entre áreas com níveis de cinza diferentes e, deste modo, enfatizou, tal como pretendido, elementos lineares no terreno.

D) Composições coloridas rgb e seu contributo para a identificação de lineamentos estruturais

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, calculou-se o “índice óptimo” (*Optimum Index Factor – OIF*), com o objectivo de contemplar melhor a variação original dos dados numa determinada área (Salinero, 2007):

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

em que Sk é o desvio-padrão de cada uma das três bandas que integram a composição colorida e r_j corresponde ao coeficiente de correlação entre cada par de bandas da composição colorida. Várias composições coloridas têm sido apresentadas para o reconhecimento de estruturas geológicas e para a identificação de lineamentos (e.g., Sabins, 1997; Gutiérrez Claverol et al., 1988; Brum da Silveira, 2002; Pérez, 2002; Rabaça et al., 2004; Silva et al., 2006; Martín-González et al., 2007). 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.

Seguidamente, apresentam-se as composições coloridas (imagens compósitas) que foram produzidas para a identificação de lineamentos na área de estudo (Figura 3), tendo em consideração os dados do sensor ETM+. São igualmente listadas as respectivas características, bem como as vantagens e desvantagens na prossecução desse objectivo, que a tarefa da análise visual permitiu identificar.

- 5-4-3 RGB – Foi a que maiores potencialidades ofereceu na identificação de lineamentos em áreas com cobertura vegetal de densidade variável.

Nestas áreas, os lineamentos destacam-se por apresentar tonalidades de verde mais claras (áreas associadas a concentração de humidade), distinguindo-se nitidamente dos elementos envolventes (Figura 3: 1). 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 – Foi a composição que melhor se ajustou à identificação de lineamentos em áreas de rocha exposta, em que os lineamentos se destacavam dos elementos envolventes, por apresentarem tons acastanhados, que contrastavam claramente com as tonalidades bege e cinza (maioritariamente) dos afloramentos rochosos (Figura 3: 2) Revelou-se também útil para fazer a distinção 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.

Nas áreas com densa cobertura vegetal, revelou-se, contudo, pouco útil, ao contrário de outras composições coloridas.

- 7-4-1 RGB – Revelou grande utilidade na identificação de lineamentos em áreas com cobertura vegetal, à semelhança da composição 5-4-3. 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 (Salinero, 2007).

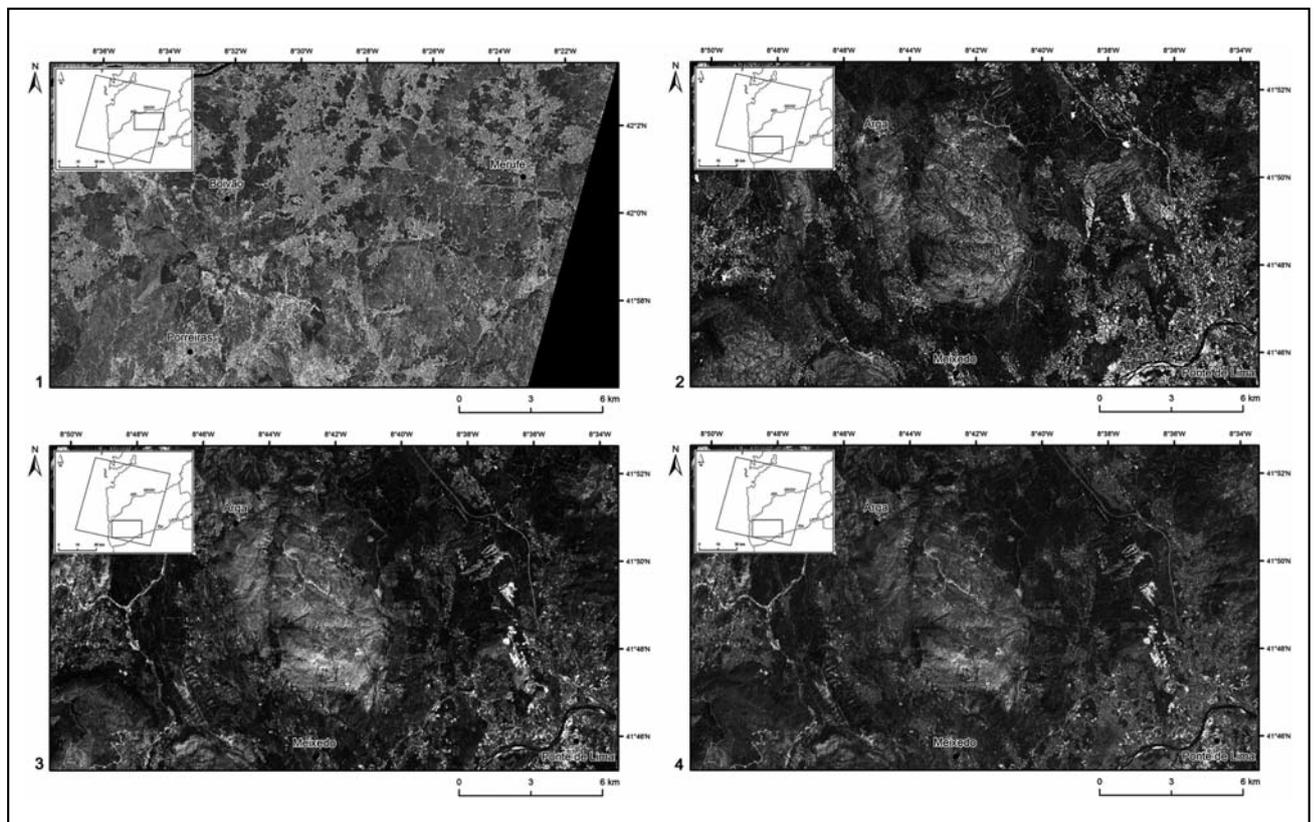


Figura 3. Composições coloridas RGB de extractos da área de estudo, com aplicação de filtro de realce de contornos não direccional – 1: 5-4-3 RGB (sensor ETM+); 2: 5-7-3 RGB (sensor ETM+); 3: 4-2-1 RGB (sensor HRVIR); 4: 3-2-1 RGB (sensor HRVIR).

- 7-5-4 RGB – 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.

A selecção das composições coloridas respeitantes ao sensor HRVIR foi feita segundo os procedimentos descritos para o sensor ETM+. Foram utilizadas as seguintes composições coloridas:

- 4-3-2 RGB – Composição colorida que se afigurou mais vantajosa para a identificação de lineamentos da área de estudo, especialmente nas áreas com cobertura vegetal. 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, pelo que as características, potencialidades e fragilidades para a consecução do objectivo central deste trabalho são semelhantes.
- 4-2-1 RGB – Permitiu uma melhor diferenciação entre lineamentos e caminhos e estradas, pois estes são realçados por cores esbranquiçadas, enquanto aqueles são destacados por tons acastanhados (Figura 3 : 3).

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 – 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 (Figura 3: 4).

E) Critérios de detecção e identificação de lineamentos estruturais

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,

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.

Figura 4. Síntese dos critérios utilizados na identificação dos lineamentos estruturais na área de estudo.

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 (Figura 4): 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.

Assim, no processo de interpretação visual das imagens de satélite, empregaram-se critérios de identificação similares aos da foto-interpretação clássica (Salinero, 2007). 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).

F) Marcação de lineamentos geo-estruturais: uma metodologia

O processo de vectorização de lineamentos consubstanciou-se nos critérios de detecção e identificação caracterizados anteriormente e foi realizado no programa ArcGis 9.2, por análise visual sobre imagens expostas no monitor, segundo o esquema da Figura 5. 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).

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 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. 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, 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, 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. Uma vez que nesta fase se utilizaram escalas de análise mais pormenorizadas, o mapa de sombreado permitiu melhorar a precisão da localização dos lineamentos

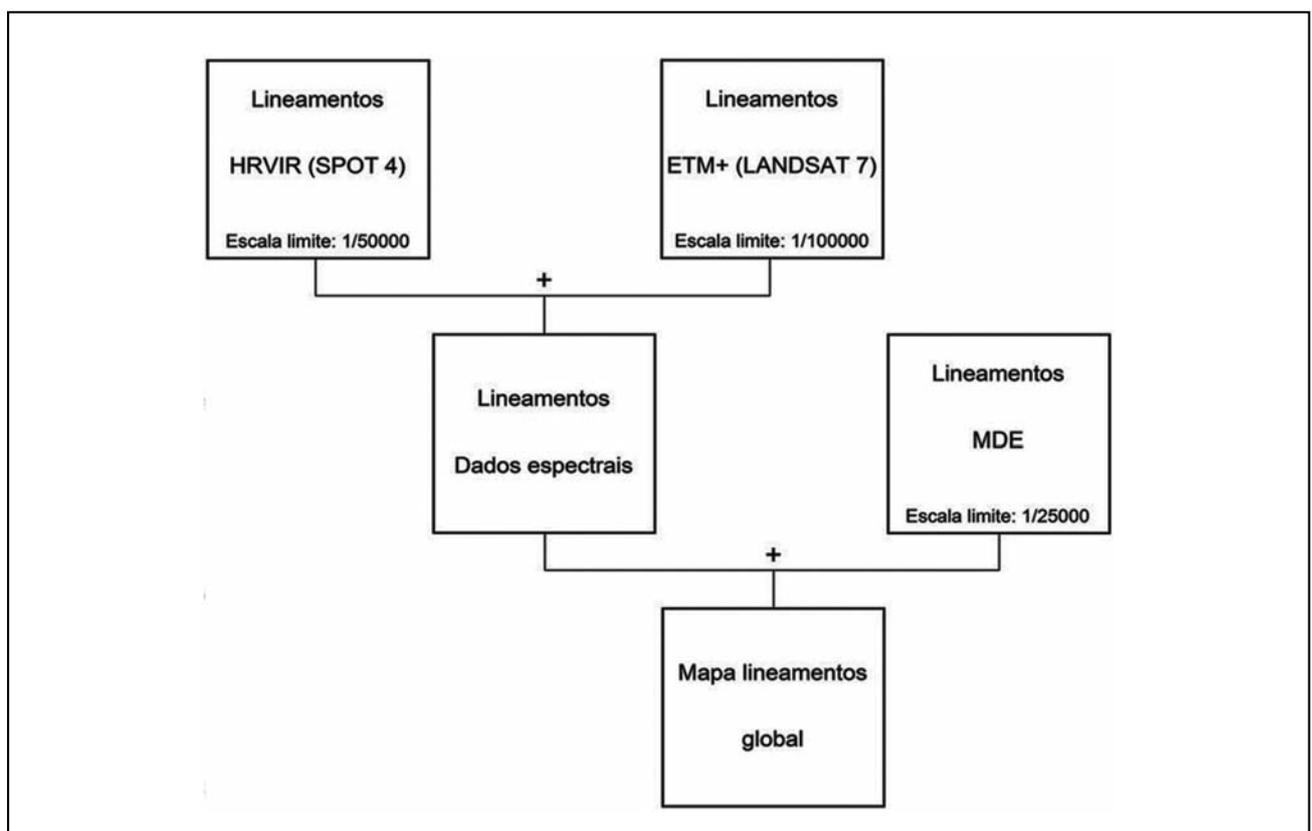


Figura 5. Esquema metodológico seguido na vectorização dos lineamentos.

marcados nas fases anteriores, sobretudo os vectorizados sobre as imagens do sensor ETM+, cujas escalas de análise proporcionavam menor pormenor e, conseqüentemente, 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.

A aplicação dos processos e das técnicas de processamento digital descritas anteriormente conduziu à elaboração do mapa de lineamentos estruturais, apresentado na Figura 6. Constatá-

se um predomínio de lineamentos com a direcção NNW-SSE, 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-quadernárias (Soares de Carvalho, 1992; Soares, 2007).

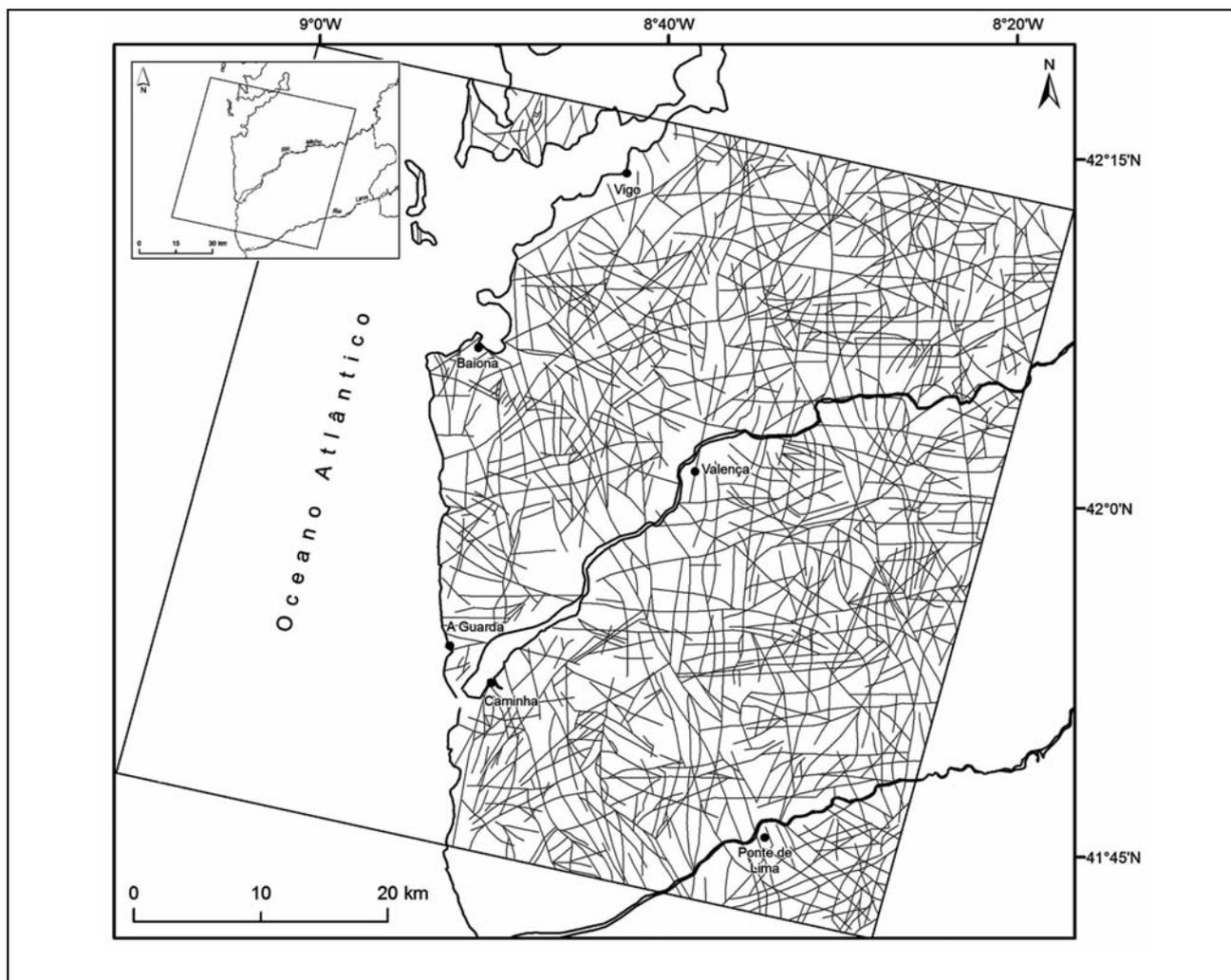


Figura 6. Mapa de lineamentos geo-estruturais para o sector entre a Ria de Vigo (SW Galiza, Espanha) e o Rio Lima (NW Portugal).

CONCLUSÕES

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. A grande maioria dos lineamentos foi identificada através das imagens do sensor HRVIR, do satélite SPOT 4. O recurso a imagens do sensor ETM+, do satélite Landsat 7, permitiu identificar outros lineamentos, 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 MDT possibilitou um acréscimo de lineamentos 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, 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.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu o apoio da Agência Espacial Europeia (ESA), através do projecto *HydroSPOT* (FLUP/Labcar-ga|ISEP/USC-ESA|ID5750). HIC recebeu apoio parcial pelo projecto PESt-C/CTE/UI4035/2011-2012 (GeoBioTec|UA). As trocas de impressões com os colegas Alcides Pereira (FCT|Universidade de Coimbra), Laura Soares (FL|Universidade do Porto), José Teixeira (GeoBioTec|Universidade de Aveiro), Paulo E. Fonseca (FC|Universidade de Lisboa) revelaram-se muito úteis. Agradecem-se, por fim, todos os comentários dos revisores e da direcção da revista.

TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

- 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.
- BLANCHARD, J. P., COTTARD, F., ARRIBAS, A., GAGNY, C. I., OVEJERO, G., SANTIAGO, L. E. SERVAJEAN, G. (1979).
Étude de la distribution des gîtes métallifères par l'interprétation photosatellite associé & l'autocorrélation optique: application aux gisements de Sn-W du NW de la Péninsule Ibérique. *7e. Reun. An. Sc. Terre, Lyon, SGF*, pp. 58.
- 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 Xeolóxico de Laxe*, 5: 311-332.
- CARVALHO, D. (1978).
Lineament patterns and hypogene mineralization in Portugal. *Estudos Notas e Trabalhos do Serv. Fom. Min.*, 23: 91-106.
- FEIO, M. e BRITO, R. S. (1949).
Les vallées de fracture dans le modelé granitique portugais. *Comptes Rendus du Congrès International de Géographie, UGI, Lisboa*, pp. 254-262.
- GUTIÉRREZ CLAVEROL, M., LUQUE, C., MARTÍNEZ-GARCÍA, E., RUIZ, F. e SUÁREZ, V. (1988).
Los lineamientos deducidos de imágenes de satélite de las Zonas Cantábrica y Asturoccidental Leonesa (NW de España). *Est. Geol.*, 44 (3-4): 263-270.
- 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.
- MATHER, P. M. (2006).
Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. *John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex*, 324 pp.
- MARTÍN-GONZÁLEZ, F., CARREÑO CONDE, F. e PABLO, M.A. DE (2007).
Aplicación de imágenes Landsat (TM y ETM+) en estudios geoestructurales en el NO del Macizo Ibérico. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe, Coruña*. 32: 47-62.
- PÉREZ-ALBERTI, A., GOMES, A., PINHO, R. e LOPEZ-BEDOYA, J. (2009).
The structural control on the dynamics of coastal granite (NW of the Iberian Peninsula). *Abstracts 7th International Conference on Geomorphology, Melbourne*.
- PINHO, R., GOMES, A. e CHAMINÉ, H. I. (2008).
A utilização de técnicas de detecção remota na identificação de lineamentos com potencial interesse morfoestrutural no NW português. *In: Resumos do IV Congresso Nacional de Geomorfologia, Braga, Portugal*.

- PINHO, R., GOMES, A. E CHAMINÉ, H. I. (2009).
A detecção de lineamentos estruturais mediante a interpretação de imagens dos satélites LANDSAT e SPOT: um estudo comparativo aplicado ao Norte de Portugal.
Resumos do VII Congresso da Geografia Portuguesa, Ass. Portg. Geógr., Coimbra, p. 65.
- 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.
- SABINS, F. F. (1997).
Remote sensing: principles and interpretation.
Waveland Press, Inc., Long Groove, 494 pp.
- SALINERO, E. C. (2007).
Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio.
Editorial Ariel, Barcelona, 586 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, 850 pp.
- SOARES DE CARVALHO, G. (1992).
Depósitos quaternários e cenozóico indiferenciado.
In: Pereira, E. (Coord.), Carta Geológica de Portugal na escala 1/200 000. Notícia Explicativa da Folha 1. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 47-50 pp.
- TEIXEIRA, C. (1944).
Tectónica plio-pleistocénica do noroeste-peninsular.
Boletim da Sociedade Geológica de Portugal, 4 (I-II): 19-40.