

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Geologia



**Análise Geométrica e Topológica de Redes Poligonais de Contracção
Térmica em Adventdalen, Svalbard, Noruega**

Maura Ferreira da Silva Lousada

Dissertação

Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e
Ordenamento do Território

2012

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Geologia



**Análise Geométrica e Topológica de Redes Poligonais de Contração
Térmica em Adventdalen, Svalbard, Noruega**

Maura Ferreira da Silva Lousada

Dissertação

Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e
Ordenamento do Território

Orientadores: Prof. Doutora Maria da Conceição
Pombo de Freitas e Doutor Pedro Miguel Berardo Duarte Pina

2012

Aos meus queridos Tios e Padrinhos:

Zézinha e João Queiroga Chaves.

..."No matter how complex a surface network appears to be, there exists a simple symmetric relation between its vertices and polygons. Any variation of a surface network contains little mathematical surprise, rather than a kind of reciprocal transformation between vertices and polygons."

- Z. Yong

AGRADECIMENTOS

Ao elaborar a presente dissertação contei com o apoio e a colaboração de diversas pessoas a quem desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

Ao Doutor Pedro Pina, por toda a paciência, compreensão e o apoio, prestado ao longo do decorrer da tese, assim como no decorrer de todos os trabalhos que culminaram na mesma.

À Professora Doutora Conceição Freitas, por todo o apoio prestado ao longo do decorrer da tese, demonstrado inclusivamente a nível logístico, bem como pela sua humanidade e nobreza de carácter.

Ao meu colega José Saraiva, pelo grande contributo científico dado na tese e também pelo apoio pessoal.

Ao Professor Gonçalo Vieira, por ter tido a ideia de constituir um tema para a própria tese, aproveitando o trabalho desenvolvido no projecto ANAPOLIS.

À Professora Doutora Hanne Hvidtfeldt Christiansen da UNIS - The University Centre in Svalbard, pelo apoio prestado nas campanhas de campo em Svalbard, para recolha de dados.

Finalmente a um nível da estrutura mais familiar agradeço também; ao meu namorado Pedro, à irmã Joana e à minha Tia Zézinha.

Este trabalho teve o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projecto ANAPOLIS - Análise de terrenos poligonais em Marte com base em análogos terrestres (PTDC/CTE-SPA/099041/2008).

RESUMO

Esta tese tem como objectivo principal efectuar a caracterização geométrica e topológica de redes poligonais de contracção térmica típicas de regiões de solo permanentemente gelado (*permafrost*) de forma a fornecer informação quantitativa que permita ajudar a compreender a formação e evolução de análogos planetários. As redes poligonais estudadas nesta tese são do tipo cunhas de gelo (*ice-wedges*) e estão situadas no vale de Adventdalen no Alto Ártico (Svalbard, 78°N), tendo os seus contornos sido digitalizados a partir de imagens de detecção remota de muito elevada resolução (20 cm/pixel). Dezassete redes foram analisadas, contendo um total de 6166 polígonos. A partir do seu mapeamento e do modelo digital de terreno disponível de Adventdalen, foi efectuada, com a ajuda de um Sistema de Informação Geográfica, a extracção e análise de vários parâmetros, qualitativos e quantitativos das diferentes redes. Parâmetros extraídos do modelo digital de terreno, tais como declive e curvatura, permitem agregar diferentes grupos de redes em função da sua densidade, e verificar que zonas topograficamente acidentadas albergam redes com polígonos de maiores dimensões e geometrias mais assimétricas. A medição da regularidade das redes é efectuada através da técnica estatística de padrões pontuais (*spatial point patterns*), recorrendo aos vértices e centróides dos polígonos, permitindo separar as redes de Adventdalen em dois tipos, dispersas e agregadas. As relações topológicas e geométricas revelam também que o desenvolvimento destas redes sofre um incremento na valência dos vértices com a diminuição das áreas dos polígonos. Por fim, verifica-se que a assimetria das redes revela um bom ajuste com o decréscimo das áreas dos polígonos indicando que a simetria destas estruturas poderá estar relacionada com a maior proximidade entre as cunhas de gelo.

Palavras-Chave: Redes poligonais, permafrost, cunhas de gelo, padrões pontuais, simetria.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is the geometric and topological characterization of thermal contraction polygonal networks which are typical of permafrost regions, where the soil is permanently frozen. This includes the collection of quantitative information that can help understand the formation and evolution of planetary analogues. The polygonal networks studied in this work result from ice-wedges, and are located in the Adventdalen valley, in the Arctic area (Svalbard archipelago, at 78° N). Their contours were digitized from the analysis of high spatial resolution remote sensing images (20 cm/pixel). Seventeen individual networks were analysed, containing a total of 6166 polygons. Several qualitative and quantitative parameters were extracted for each of the networks, through the analysis of these maps and of the Digital Terrain Model available for the Adventdalen, in a GIS environment. Some parameters obtained from the DTM, such as slope and curvature, lead to the clustering of networks in groups according to their polygon density, and to the verification that areas where topography is more rugged contain networks with larger polygons and asymmetric geometry. The measure of network regularity was made with the statistical technique of spatial point patterns, taking into account the locations of the vertexes and centroids of the polygons; this led to the definition of two types of networks in the Adventdalen: dispersed and aggregated. Topological and geometric relations also reveal that the development of the networks leads to an increase in the numerical value of vertex valence, while the areas of polygons decrease. Finally, it is confirmed that network asymmetry is closely linked to polygon area, which points to a relation between polygon symmetry and distance between the ice-wedges.

Keywords: Polygonal networks, permafrost, ice-wedges, point patterns, symmetry.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Lista de Acrónimos.....	vi
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas.....	xiv
1. Introdução	1
1.1 Contexto.....	1
1.2. Abordagem e Objectivos	2
2. Redes Poligonais de Contração Térmica, formação e conceitos associados.....	3
2.1 <i>Permafrost</i> e Camada Activa	3
2.2 A Formação das Redes e Classificação de Tipologias	4
3. Enquadramentos	9
3.1. Enquadramento Geral da Área de Estudo	9
3.2. Enquadramento Geológico	11
4. Mapeamento de Redes por Detecção Remota.....	13
4.1 Processamento das Imagens	14
4.2 Redes Mapeadas e Redes Estudadas.....	17
5. Validação do Mapeamento.....	21
6. Parâmetros medidos nas 17 redes.....	27
6.1 Parâmetros geométricos e topológicos.....	30
6.2 Parâmetros derivados do MDT	35
6.2.1. Distância Euclidiana das redes às linhas de água	36
6.2.3. Curvatura (a 2ª Derivada do MDT).....	37
7. Medição da Regularidade das redes	40
7.1 Análise de Padrões Pontuais.....	41
7.1.1 Índice de dispersão VMR.....	43

7.1.2 Índice de NNI.....	46
7.1.3 Estimação da Intensidade kernel.....	51
7.2 Assimetria através da Variedade de classes de áreas de polígonos.....	55
8. Intensidade e Regularidade das redes ajustada a parâmetros derivados do MDT	62
9. A Geologia e Geomorfologia das Redes.....	66
10. Valência dos vértices como indicador de regularidade	73
11 Densidade e subdivisão	76
12. Sobre a Simetria em Redes Poligonais de Contração Térmica.....	83
13. Conclusões	88
15. Referências Bibliográficas	97
Anexo I – Mapa Geológico de Adventdalen.....	I
Anexo II – Mapa Geomorfológico de Adventdalen.....	II
Anexo III –Tabela com percentagens de ocupação de unidades Geológicas e Geomorfológicas das 17 redes.....	III
Anexo IV – Metodologia esquemática para elaboração de um mapa de variedade das áreas.....	IV

LISTA DE ACRÓNIMOS

ANAPOLIS - Análise de terrenos poligonais em Marte com base em análogos terrestres (PTDC/CTE-SPA/099041/2008)

ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, Nome do sensor a bordo do satélite Terraque adquire o GDEM

CSR - Complete Spatial Randomness

DELA - Distância euclidiana às linhas de água

DR - Detecção Remota

GCP- Ground Control Points

GDEM - Global Elevation Model

GeoTIFF - ficheiro imagem Tiff com coordenadas incluídas (imagem georreferenciada)

IPN - Instituto Polar Norueguês

KML - Keyhole Markup Language

MAAT- Mean Annual Air Temperature

MDT – Modelo Digital de Terreno

METI - The Ministry of Economy, Trade, and Industry of Japan

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NIR - Near-infrared

NND - Nearest-Neighbor Distance

NNI - Nearest-Neighbor Index

RCP - Rational Polynomial Coefficients

RGB - Red Green Blue

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SPPA -Spatial Point Pattern Analysis

STD - Standard Deviation

UAV - Unmanned Aerial Vehicle

VIF- Variance Inflation Factors

VMR - Variance to Mean Ratio Lista de Figuras

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de três camadas de interface camada activa-permafrost. (1) camada activa (congelamento e fusão sazonal); (2) camada de transição (rica em gelo, congelamento e fusão em escalas de décadas a séculos); (3) Permafrost de longo-termo (congelamento e fusão em escalas de séculos a milénios, (adaptado de Nelson 2004, Shur et al., 2005 e French, 2007).....	4
Figura 2: Processo de fracturação e subsequente formação de cunhas de gelo. Após repetidos ciclos de congelamento e fusão, deformação dos sedimentos, no sentido da superfície. (baseado em Lachenbruch 1962, adaptado de Härtel, 2011).....	5
Figura 3: Terminologia das cunhas de gelo (adaptado de Härtel, 2011).....	6
Figura 4: Sistema de classificação para polígonos que ocorrem em áreas planas, as cunhas são ilustradas em perfil, a formação normalmente progride de um polígono incipiente para um intermédio a fase thermokarst (zonas com depressões, ou aluimento de solo associados à fusão) está dividida em polígonos High-centred e walled, (adaptado de Mackay, 2000). ...	7
Figura 5: Desenvolvimento de cunhas (a) epigenética, (b) singenética (c) anti-singenética (baseado em Mackay, 1990; adaptado de Härtel, 2011).	8
Figura 6: Tipologias de redes poligonais de contracção térmica e terreno de permafrost (adaptado de French, 2007).	8
Figura 7: Redes poligonais no vale de Adventdalen: à esquerda, uma ligação ortogonal em que o polígono apresenta um vértice tetravalente; à direita uma ligação hexagonal com um vértice trivalente.	9
Figura 8: Área de estudo (a) Localização do Arquipélago (mapas de base da ESRI©), (b) Localização da ilha principal Spitsbergen e da cidade de Longyerbyen, o vale de Adventdalen está sinalizado com um quadrado encarnado (mapas de base da ESRI©), (c) Mapa topográfico do vale de Adventdalen.....	9
Figura 9: Vista panorâmica do vale de Adventdalen (fotografia da autoria de Pedro Pina, 2011).....	10
Figura 10: Mapa simplificado da geologia de Svalbard (baseado em Hjelle, 1993; adaptado de Piepjohn et al., 2012).....	12
Figura 11: (a) Footprints das imagens áreas adquiridas ao IPN (em 2 fases) antes da ortorrectificação, (b) Mosaico das imagens ortorrectificadas no vale de Adventdalen (c) Imagem 3D a partir de 4 imagens ortorrectificadas sobre o GDEM – ASTER no ArcScene 3D ESRI©.	16

Figura 12: (a) Conjunto das 119 redes digitalizadas com mais de 10 polígonos, sobre o MDT adquirido ao IPN, (b) exemplos de duas redes com identificação das duas camadas exteriores de polígonos (camadas que são retiradas para o estudo da topologia).....	17
Figura 13: Histograma de áreas de polígonos para: (a) total dos polígonos mapeados, (b) conjunto de 17 redes seleccionadas.....	18
Figura 14: (a) gráfico das áreas médias dos polígonos para o conjunto das 17 redes em função do respectivo STD, (b) rede número 30 com o maior polígono anómalo marcado com uma cruz, com uma área superior a 17 mil metros quadrados.	19
Figura 15: Polígonos mapeados em Adventdalen sobre imagens ortorrectificadas nas 17 redes seleccionadas para estudo detalhado.....	20
Figura 16: (a) Mapeamento de campo (b) Mapeamento digital feito sobre ortofotomapa do IPN, (c) Mapeamento digital feito sobre imagem Kolibri, ((a) e (b) estão sobrepostas ao ortofotomapa do IPN e (c) está sobreposta à imagem Kolibri).	21
Figura: 17 Imagem Kolibri, obtida por um mosaico de fotografias individuais a partir de um veículo (UAV).	22
Figura 18: Sobreposição da rede IPN com a rede do campo.	24
Figura 19: Diferenças entre contornos observados e detectados: (a) imagem Kolibri, (b) imaegm IPN, (c) contornos de polígonos detectados no levantamento de campo : 5 polígonos áreas entre 200 e 500 m ² , (d) polígonos detectados na imagem Kolibri: 1 polígono com 1930 m ²	24
Figura 20: (a) Perfil AB em imagem Kolibri (b) Reflectância das imagens IPN (a verde) e Kolibri (a azul).	26
Figura 21: Zona central da rede 102 (a) imagem IPN (b) Banda NIR da imagem IPN (contrastes típicos da banda 4: água a preto com muito baixa reflectância, sedimentos e vegetação aumentam muito a reflectância nesta banda) (c) Imagem kolibri.	27
Figura 22: Esquema de organização de dados analisados e armazenados numa geodatabase: (a) representa o tema de polígonos digitalizados (para as redes seleccionadas), (b) representa o processo de sumarização das estatísticas (geralmente médias) aplicado a cada parâmetro, (c) representa outro tema onde cada rede é representada por 1 polígono e os seus atributos são resultantes da sumarização dos parâmetros medidos em (a).	28
Figura 23: Histogramas de áreas dos polígonos, em redes que ocorrem em zonas planas, (a) rede 81, (b) rede 94.	31

Figura 24: Histogramas de áreas dos polígonos, em redes que ocorrem em vertentes, (a) rede 26, (b) rede 42.....	31
Figura 25: Histogramas do número de vizinhos dos polígonos (a) rede de vertente (26), (b) rede de zona plana (81).	34
Figura 26: Exemplo de uma transição entre uma rede completamente hexagonal e uma rede completamente ortogonal, nesta última perde-se o contacto de uma face, contudo a valência dos vértices aumenta, aumentando também a vizinhança do polígono (quadrado).....	34
Figura 27: Grelha de “flow direction” (adaptado de Nelson, et al.,1997).	36
Figura 28: Hierarquia das principaislinhas de água de Adventdalen , obtidas através do MDT do IPN, no Arcgis© 10.0, Hydrology Toolbox, sobrepostas ao MDT do INP, ilustrando também a localização das 17 redes.	37
Figura 29: Processo de escoamento (adaptado de Quintela, 1992).	38
Figura 30: Rede 47, sobre o MDT proveniente do NPI com as curvas de nível, com uma depressão (elipse encarnada).	39
Figura 31: Mapa de curvatura em duas zonas de polígonos de tamanhos diferentes(máscara 1, polígonos maiores; máscara 2, polígonos menores) em que valores negativos indicam células côncavas e valores positivos em células convexas.	40
Figura 32: Padrões pontuais: (a) Disperso, (b) aleatório, (c) Agregado, (adaptado de Dorai-Raj, 2001).....	41
Figura 33: Exemplo de um processo estacionário (igual valência de vértices) e outro isotrópico (com diferentes intensidades entre pontos) relativamente a propriedades de segunda ordem.	42
Figura 34: Gráfico de dispersão de pontos: (λ) intensidade dos vértices por área das redes (segundo Diggle, 2003): à esquerda, em função da densidade das redes (n° de polígonos por km^2); à direita, em função das áreas médias dos polígonos das respectivas redes.	43
Figura 35: Quadriculas utilizadas para obter o índice de dispersão ou VMR, em que o tamanho da quadrícula seleccionada depende do número de eventos e da área de cada rede, tendo sido gerada uma grelha diferente para cada rede: à esquerda a grelha é inicialmente gerada para todo o enquadramento da rede, à direita eliminam-se as quadrículas que não estão dentro do limite da rede.	44
Figura 36: Gráfico do índice de dispersão VMR em função da intensidade (λ) dos vértices nas respectivas áreas das redes. A linha vermelha separa a dispersão da agregação.	45

Figura 37: Exemplo de distância de entre vizinhos mais próximos, não comutativa. (Adaptado de Perry <i>et al.</i> , 2002).....	46
Figura 38: Exemplo de um polígono alongado em que o vizinho mais próximo de um vértice não tem uma cunha de gelo a fazer ligação entre os dois vértices; à esquerda só são visíveis os vértices, à direita os vértices estão sobrepostos aos polígonos identificados na imagem de DR.	49
Figura 39: Gráficos de significância no cálculo do NNI, para os centróides das redes 26 e 81 (formato Arcgis© 10.0): (a) A rede 26 com um índice-Z de -18.12tem menos de 1% de probabilidade de este padrão agregado ser resultado de um processo aleatório; (b) A rede 81com um índice-Z de 43.32 tem menos de 1% de probabilidade de este padrão disperso ser resultado de um processo aleatório.	50
Figura 40: Gráficos do índice NNI em função da intensidade (λ) dos vértices nas respectivas áreas das redes; à esquerda para o padrão de pontos dos vértices, à direita para o padrão de pontos dos centróides dos polígonos. A linha vermelha separa a dispersão da agregação. (na parte esquerda dos gráficos deveria estar “padrão agregado” em vez de “padrão”)	51
Figura 41: Estimação kernel de um padrão pontual, (adaptado de Gatrell <i>et al.</i> , 1996).....	51
Figura 42: Superfície da estimação de intensidade kernel na rede 0. (a) Estimação feita a partir dos vértices dos polígonos com um raio de procura de 20 metros, (b) Estimação feita a partir dos centróides dos polígonos com um raio de procura de 40 metros.	53
Figura 43: Gráficos da intensidade kernel em função da densidade dos polígonos e da intensidade dos vértices. À esquerda a intensidade kernel é calculada a partir dos centróides dos polígonos, à direita a partir dos vértices.....	55
Figura 44: Natural breaks de Jenks aplicados às áreas dos polígonos, à esquerda histograma da classificação no Arcgis© 10.0 (Natural breaks de Jenks indicados por barras verticais posicionadas no eixo do X), à direita valores dos intervalos de cada classe em metros, que passaram, através de uma reclassificação, para uma escala de 1 a 14.....	57
Figura 45: (a) Polígonos com classificação das áreas em 14 classes segundo a optimização de Jenks (b) imagem transformada dos polígonos vectoriais e reclassificada para 14 classes, numeradas de 1 a 14 com ordem crescente de tamanhos (c) Mapa de variedades das classes de áreas.....	57
Figura 46: (a) Gráfico da variedade média das classes de áreas dos polígonos das redes, em função das áreas médias dos polígonos das redes, (b) gráfico da intensidade kernel média a partir dos centróides em função das áreas médias dos polígonos das redes.....	58

Figura 47: (a) Gráfico da variedade média das classes de áreas dos polígonos das redes, em função da densidade média das redes, (b) gráfico das áreas médias dos polígonos das redes em função da densidade média das redes.	60
Figura 48: Tabela litoestratigráfica de Svalbard, cortada para a área de interesse, grupos anteriores ao de Adventdalen foram retirados (adaptado de Dallmann et al., 2001).....	67
Figura 49: Ilustração da rede de drenagem sobre duas formações geológicas semelhantes: Agardhfjellet e Rurikfjellet, na base está parte do mapa geológico (ANEXO I), em sobreposição estão todos os polígonos digitalizados e a rede de drenagem do vale.	68
Figura 50: <i>Janssonhaugen</i> (a) posicionamento de polígonos em material recente relativamente às restantes redes da zona, e rede de drenagem obtida do MDT o quadrado encarnado é o enquadramento da imagem em (b), (b) pormenor do topo de <i>Janssonhaugen</i> , são visíveis linhas de vegetação que acompanham a escorrência da água, o rectângulo encarnado é o enquadramento da imagem em (c), (c) pormenor, da zona de transição de material fluvial recente para a zona de <i>til</i> , com um filamento de polígonos muito pequenos, sobre material recente.....	69
Figura 51: Área de material fluvial recente, desprovida de redes poligonais de contracção térmica, a ilustração tem transparência neste tema para ser observável a presença e dimensão dos leques aluvias nesta zona.	70
Figura 52: Rede 15 sobre diferentes unidades geomorfológicas, aparenta ter também uma transição na geometria dos polígonos.	72
Figura 53: (a) Gráfico de duplo eixo, a azul, a área média dos polígonos de cada rede em função da vizinhança média dos polígonos, a encarnado a percentagem de vértices trivalentes em função da vizinhança; (b) Gráfico de duplo eixo, a azul, a área média dos polígonos de cada rede em função da vizinhança média dos polígonos, a encarnado a percentagem de vértices tetravalentes em função da vizinhança.	74
Figura 54: (a) Rácio de vértices (tetravalentes/trivalentes) em função das áreas médias dos polígonos das redes, (b) percentagem de vértices em função das áreas médias dos polígonos. A valência está representada por diferentes grupos: a azul vértices trivalentes, a encarnado tetravalentes.	75
Figura 55: Geração de grelhas: (esquerda) dois conjuntos de 10 grelhas com formas quadradas e formas hexagonais; as áreas das diferentes formas são iguais dentro da mesma grelha e decrescem com o mesmo valor da primeira grelha até à última; (direita) imagens de pormenor: (A) grelha gerada com quadrados de maior área; (B) grelha gerada com quadrados de menor área; (C) grelha gerada com hexágonos de maior área; (D) grelha	

gerada com hexágonos de menor área, (escalas de unidades métricas com projecção UTM).	76
Figura 56: Grelhas geradas com 1 km ² , para averiguar as diferenças (entre P.G.1 E P.G.2) na curva gráfica da densidade em função da área da quadrícula à medida que as diferentes progressões geométricas fazem decrescer a área das quadrículas na proporção indicada pelas respectivas fracções, P.G.1 - Progressão geométrica 1: (1/2 ⁿ), P.G.2 - Progressão geométrica 2: (1/4 ⁿ).	78
Figura 57: Resultado gráfico das progressões geométricas de divisão das grelhas na figura 54: (esquerda) densidade em função das áreas para a progressão 1: (1/2 ⁿ); (direita) densidade em função das áreas para a progressão 2: (1/4 ⁿ).	78
Figura 58: Densidade de polígonos <i>d</i> , em função do eixo maior médio <i>L</i> em km em redes poligonais de Marte (retirado de Saraiva <i>et al.</i> , 2009).	80
Figura 59: Gráfico da densidade das grelhas geradas para as duas progressões, em função das respectivas áreas das quadrículas.	81
Figura 60: Gráfico da densidade das 17 redes em função as áreas médias dos polígonos de cada rede, incluindo uma breve descrição dos grandes grupos das redes que se encontram ao longo da curva.	82
Figura 61: (a) Potencial rede em formação, perto de um lago com cunhas de desenho aleatório sobre material recente, (b) localização da rede no inicio do vale sinalizada com um quadrado encarnado, (mapa topográfico de Adventdalen).	82
Figura 62: exemplo de regularidade encontrada numa rede em Adventdalen.	83
Figura 63: (a) Modelo de tensão de tracção em torno das fracturas, o comprimento das setas representa a intensidade (adaptado de Plug & Werner, 2001), (b) Cunha de gelo exposta, visível deformação dos estratos envolventes (adaptado de Péwé, 1963), (c) modelo de formação de cunhas hipotéticas na subdivisão de um polígono rectangular.	85
Figura 64: Exemplo da tendência de aumento da simetria numa rede em Adventdalen, onde cunhas secundárias seguem dividem os polígonos antecedentes paralelamente ao seu eixo mais curto.	86
Figura 65: comparação entre diferentes profundidades de fusão, e implicação na infiltração da água, sobre o modelo de três camadas (modificado de Nelson 2004, Shur et al., 2005 e French, 2007).	94
Figura 66: (a) Exemplo de um polígono considerado côncavo, apresenta pelo menos um ângulo interno superior a 180° (b) Exemplo de um polígono considerado convexo, apresenta todos os ângulos internos inferiores a 180°.	95

Figura 67: (a) Setas representam o afastamento ou compactação do solo à medida que as cunhas crescessem, são vectores normais às cunhas, a intersecção de um angulo interno (Fig. 66 a), deixa um espaço em alfa que não é submetido à mesma compactação que ocorre em redor das restantes cunhas, (b) nesta situação ilustram-se cunhas com uma ligação hexagonal perfeita (120°), os vectores normais estão representados apenas no centro da intersecção e mostram que existe um equilíbrio.95

Figura 68: Exemplos práticos de polígonos côncavos retirados aleatoriamente de várias redes ao longo do vale, (ortofotomapas de imagens aéreas do IPN).....96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais estatísticas: dos polígonos totais mapeados e dos polígonos pertencentes às redes seleccionadas para este estudo.	18
Tabela 2: Principais características das imagens de detecção remota, de muito alta resolução, adquiridas no âmbito do mapeamento dos polígonos em Adventdalen.	22
Tabela 3: Número de polígonos e áreas para os 3 tipos de levantamentos efectuados para a rede 102.	23
Tabela 4: Número de vizinhos de cada polígono dos 3 diferentes levantamentos da rede 102.	25
Tabela 5: Valência dos vértices para os 3 diferentes levantamentos da rede 102.	25
Tabela 6: Parâmetros medidos por polígono e breve descrição da sua obtenção.	28
Tabela 7: Parâmetros medidos por rede, sumarizados através do tema dos polígonos digitalizados.	29
Tabela 8: Principais parâmetros geométricos de cada rede.	32
Tabela 9: Principais parâmetros topológicos de cada rede.	33
Tabela 10: Principais parâmetros extraídos do MDT para cada rede.	35
Tabela 11: Valores do índice de dispersão VMR para cada rede, número de vértices e área das quadrículas obtida segundo Mitchell (2005).	46
Tabela 12: Índice dos vizinhos mais próximos NNI, calculado para os padrões pontuais dos vértices e dos centróides dos polígonos.	49
Tabela 13: Correlações de Pearson, entre as diferentes estimações de densidades kernel (diferente raio e diferente fonte de padrão pontual), com a densidade dos polígonos e a intensidade dos vértices.	54
Tabela 14: Sumário dos modelos não lineares ajustados aos dados no gráfico (a) da figura 46.	58
Tabela 15: Sumário dos modelos não lineares ajustados aos dados no gráfico (b) da figura 46.	58
Tabela 16: Sumário dos modelos não lineares ajustados aos dados no gráfico (a) da figura 47.	60
Tabela 17: Sumário dos modelos não lineares ajustados aos dados no gráfico (b) da figura 47.	60

Tabela 18: Produto da área média dos polígonos pela densidade das redes, confirmação do conceito de proporcionalidade inversa, o produto “x.y” é constante.....	61
Tabela 19: Resumo do Modelo de ajuste entre, a Intensidade Kernel dos polígonos e os seguintes parâmetros derivados do MDT: Intervalo de Curvatura média, DELA3, Altitude Média.	63
Tabela 20: Tabela ANOVA do modelo de ajuste entre, a Intensidade Kernel dos polígonos e os seguintes parâmetros derivados do MDT: Intervalo de Curvatura média, DELA3, Altitude Média.	63
Tabela 21: Tabela de coeficientes e estatísticas de colinearidade do ajuste entre, Intensidade Kernel dos polígonos e os seguintes parâmetros derivados do MDT: Intervalo de Curvatura média, DELA3, Altitude Média.	63
Tabela 22: Resumo do Modelo de ajuste entre a variedade média das áreas dos polígonos (14 classes) e seguintes parâmetros derivados do MDT: DELA3, Valor médio de células côncavas de cada rede.	64
Tabela 23: Tabela ANOVA do modelo de ajuste entre a variedade média das áreas dos polígonos (14 classes) e seguintes parâmetros derivados do MDT: DELA3, Valor médio de células côncavas de cada rede.	64
Tabela 24: Tabela de coeficientes e estatísticas de colinearidade do ajuste entre variedade média das áreas dos polígonos (14 classes) e os seguintes parâmetros derivados do MDT: DELA3, Valor médio de células côncavas de cada rede.	64
Tabela 25: Resumo do Modelo de ajuste entre, o desvio padrão do comprimento das faces dos polígonos e seguintes parâmetros derivados do MDT: DELA3, Valor médio de células côncavas de cada rede.	65
Tabela 26: Tabela ANOVA do modelo de ajuste entre, o desvio padrão do comprimento das faces dos polígonos e seguintes parâmetros derivados do MDT: DELA3, Valor médio de células côncavas de cada rede.	65
Tabela 27: Tabela de coeficientes e estatísticas de colinearidade do ajuste entre, o desvio padrão do comprimento das faces dos polígonos e os seguintes parâmetros derivados do MDT: DELA3, Valor médio de células côncavas de cada rede.	65
Tabela 28: Valores das áreas dos quadrados iguais à dos hexágonos criados nas grelas da figura 45. As áreas decrescem de tamanho em igual proporção: nas grelas de quadrados e Hexágonos. A área total dos hexágonos formados dentro de um círculo é diferente da área total dos quadrados formados dentro de um círculo de igual área. O número de quadrados e	

hexágonos por grelha também é diferente, mas a densidade é a mesma. (Nº H. e Nº Q.,
corresponde ao número de hexágonos e quadrados respectivamente, por grelha).77

Tabela 29: Ajustamento de um modelo não linear aos dados para a P.G.1 - Progressão
geométrica 1: $(1/2^n)$ 79

Tabela 30: Ajustamento de um modelo não linear aos dados em SPSS© 20.0, para a (P.G.2)
- Progressão geométrica 2: $(1/4^n)$ 79

Tabela 31: compilação de literatura de condições climáticas e sub-superficiais em relação a
várias propriedades de polígonos de contracção térmica (Adaptado de Ulrich et al., 2011). .93

1. INTRODUÇÃO

Os padrões de redes poligonais são a forma geomorfológica mais frequentemente encontrada em zonas de *permafrost* contínuo (Chistiansen, 2005; French, 2007; Härtel, 2011). A contracção térmica sazonal que ocorre no solo promove o surgimento de fendas verticais, que no plano resultam em padrões poligonais (Black, 1976). O seu desenvolvimento é complexo pois as primeiras cunhas de gelo que se formam no solo alteram a distribuição da resistência à tracção, afectando também a iniciação, propagação e desenho de novas fendas (Plug, & Werner, 2001). O crescimento das cunhas, por sua vez, é controlado por vários factores ambientais que determinam a dimensão, forma e orientação dos próprios polígonos (Ulrich *et al.*, 2011). A regularidade espacial que alguns destes padrões apresentam despertam o interesse de investigadores há mais dum século e, apesar de muitas hipóteses terem sido avançadas para explicar a sua origem e evolução, nenhuma é ainda considerada definitiva (Ray *et al.*, 1983).

1.1 CONTEXTO

Os trabalhos desenvolvidos nesta tese tiveram o seu início no âmbito do projecto ANAPOLIS - Análise de terrenos poligonais em Marte com base em análogos terrestres, PTDC/CTE-SPA/099041/2008 (Pina *et al.*, 2010). As redes poligonais são uma característica mais comum na superfície de Marte do que na Terra, um facto que tem apontado para a quase omnipresença de gelo no solo marciano. Ainda há muito por compreender em relação à origem destas redes, não só no que diz respeito à sua formação como em relação à variedade de morfologias e dimensões que apresentam. O estudo de análogos terrestres pode assim conduzir a avanços significativos nesta pesquisa.

Os grupos de investigação envolvidos neste projecto pretendem dar uma contribuição relevante para o entendimento da formação destas redes em Marte, através da combinação da análise de imagens por detecção remota e do estudo *in situ* detalhado de análogos terrestres (Pina *et al.*, 2010). Como bolsreira de investigação do projecto, iniciei todos os trabalhos apresentados nos primeiros capítulos da presente tese, nomeadamente a ortorrectificação de imagens de detecção remota, o mapeamento e a extracção de parâmetros geométricos e topológicos das redes. Em 2011, ainda no âmbito do projecto,

participei também na campanha de campo ao local de estudo, para validação do mapeamento por detecção remota.

1.2. ABORDAGEM E OBJECTIVOS

O principal objectivo da presente tese é obter uma compreensão mais profunda da formação destas estruturas poligonais relativamente às suas características morfológicas e topológicas. Pretende-se perceber os mecanismos que podem despoletar e dar origem a duas tipologias extremas de redes, por exemplo, uma onde predominam ligações ortogonais, outra onde predominam ligações hexagonais. Esta quantificação poderá realizada através do estudo de parâmetros geométricos e topológicos, já que no primeiro caso (predominância de ligações ortogonais) existe uma grande percentagem de vértices tetravalentes e no segundo caso (predominância de ligações hexagonais) existe uma grande percentagem de vértices trivalentes.

A abordagem utilizada, de mapeamento dos polígonos nas imagens de detecção remota, foi validada no terreno numa rede típica; as actividades desenvolvidas no terreno orientaram também a escolha de algumas redes significativas (sem polígonos dispersos) para posterior extracção de parâmetros geométricos e topológicos, tais como a área e índice de forma, o número de vizinhos de cada polígono, e a valência dos vértices. Adicionalmente, a utilização de parâmetros extraídos de um modelo digital de terreno (MDT) permitiram conhecer a orientação das redes, o seu declive, a altitude a que se localizam ou a sua curvatura, bem como toda a rede de drenagem do vale de Adventdalen.

Várias metodologias recorrendo à análise de padrões pontuais foram utilizadas para medir a regularidade das redes; no mesmo capítulo é calculada a intensidade Kernel de cada rede e é ainda proposta uma metodologia alternativa para aferir a assimetria das redes. Posteriormente, tanto a intensidade kernel como a assimetria das redes são ajustadas por regressões lineares múltiplas a alguns dos parâmetros referidos anteriormente, nomeadamente os que foram extraídos do MDT. A geologia e geomorfologia de cada rede são também analisadas neste contexto.

A topologia das redes (vizinhos e vértices) é confrontada com as áreas dos polígonos, verificando-se que a valência dos vértices é um bom indicador da regularidade das redes.

São ainda efectuados alguns testes sobre a relação entre a densidade e as áreas, verificando-se que o decréscimo da densidade de polígonos com o aumento da sua área se ajusta a uma função do tipo potência negativa, e que é independente da forma dos polígonos.

Por fim é proposta uma hipótese explicativa para a maior simetria de polígonos tipicamente pequenos, já que a assimetria das redes também decresce em potência com as áreas dos polígonos. Esta hipótese revela que a maior proximidade das mesmas leva a uma distribuição mais equitativa das áreas na formação de novas cunhas.

2. REDES POLIGONAIS DE CONTRACÇÃO TÉRMICA, FORMAÇÃO E CONCEITOS ASSOCIADOS

2.1 PERMAFROST E CAMADA ACTIVA

O permafrost (solo permanentemente gelado), com um ponto de fusão semelhante ao gelo, é rapidamente sensível a alterações de temperatura na superfície, sendo um bom indicador das alterações climáticas actuais, deixando também uma impressão estratigráfica do passado climático. A camada activa é a zona do solo que, nas regiões acima do permafrost, funde durante o verão (French, 2007; French & Shur, 2010).

A espessura da camada activa, ou da camada que funde sazonalmente, pode ser estimada a escalas regionais, em função da temperatura do ar na superfície, ou a uma escala local, mas sendo necessário integrar também parâmetros locais relacionados com a sua variabilidade espacial (que podem implicar diferenças consideráveis no regime térmico do solo) tais como granulometrias dos solos, a sua humidade, existência de cobertura de neve e de vegetação (Shiklomanov & Nelson, 2002). A estimação da profundidade de fusão desta camada varia bastante em função da temperatura da superfície, no entanto, pouco se sabe em relação à sua variação em pequenas distâncias no plano horizontal em função da topografia (Gomersall & Hinkel, 2001).

A figura 1 ilustra o conceito do sistema de três camadas, que entre a camada de *permafrost* e a camada activa inclui uma camada de transição. A utilidade de considerar uma camada de transição advém da existência de zonas ricas em gelo na base ou parte inferior da camada activa e na parte superior do *permafrost*; em anos de calor excepcional a camada activa aprofunda e aumenta a sua espessura (para além da sua média) através desta zona rica em gelo (French, 2007). Esta camada intermédia (de longo-termo) é rica em gelo devido à existência de uma rede de lenticulas ou lentes de gelo segregado (Shur et al. 2005). Desta forma os processos que aqui ocorrem são baseados no fenómeno de criossucção, ou seja, na migração da água no solo por capilaridade para zonas mais geladas devido a efeitos gravitacionais e gradientes térmicos durante o período de congelamento, e que são particularmente pronunciados em solos com granulometrias mais

finas, podendo a sua presença contribuir também para estabilizar o *permafrost* em períodos de grandes amplitudes térmicas (Shur et al. 2005).

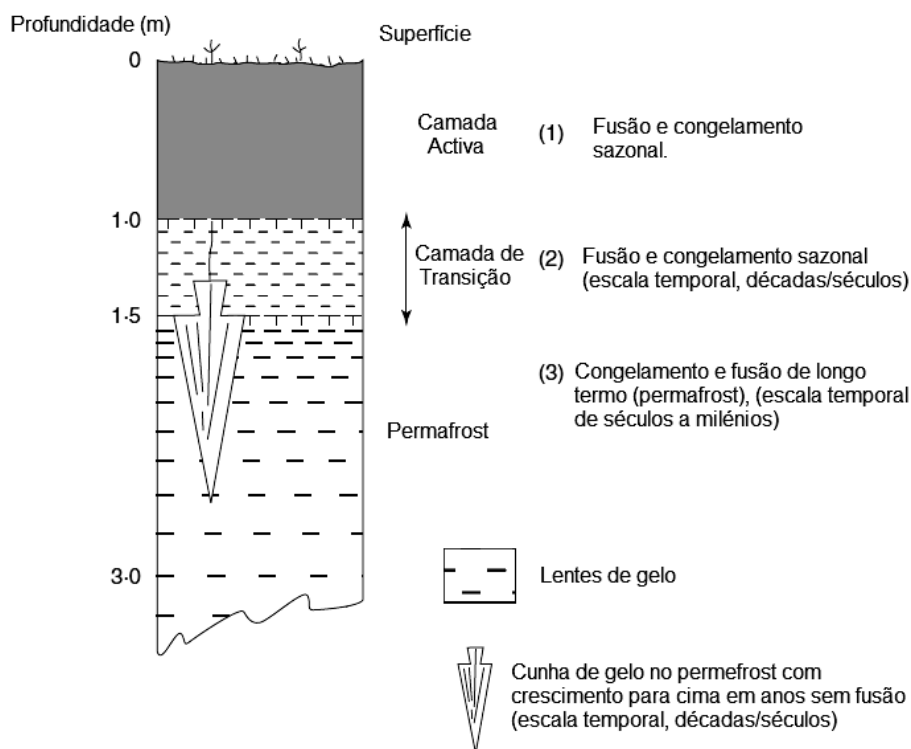


Figura 1: Modelo de três camadas de interface camada activa-permafrost. (1) camada activa (congelamento e fusão sazonal); (2) camada de transição (rica em gelo, congelamento e fusão em escalas de décadas a séculos); (3) Permafrost de longo-termo (congelamento e fusão em escalas de séculos a milénios, (adaptado de Nelson 2004, Shur et al., 2005 e French, 2007).

Desta forma a camada intermédia existe porque os gradientes térmicos relacionados com a camada activa e a parte superior do *permafrost* permitem que a humidade migre no sentido da superfície durante o inverno e no sentido do *permafrost* durante o verão (French, 2007).

2.2 A FORMAÇÃO DAS REDES E CLASSIFICAÇÃO DE TIPOLOGIAS

As redes de contracção térmica são um padrão de superfície associado ao tipo padrões não ordenados, *non-sorted* (Washburn, 1979; Härtel, 2011). A contracção térmica do *permafrost* abre fendas verticais que podem ser preenchidas por sedimentos (*sand-wedges*), água líquida que depois congela (*ice-wedges*) ou ambos os materiais, sendo nesse caso designadas por redes compostas. Tanto as redes de cunhas de gelo como de sedimentos podem formar-se e desenvolver-se em ambientes de permafrost contínuo; contudo, as *sand-wedges* são mais características de zonas áridas como os Vales Secos

da Antártida, e as cunhas de gelo (*ice-wedges*), são características de regiões mais húmidas no Ártico, tais como Svalbard, Canadá, Sibéria e Alaska (Black, 1976).

Muitas hipóteses têm sido propostas para explicar a formação das redes poligonais de contracção térmica. Segundo uma das principais referências da literatura (Lachenbruch, 1963) a hipótese que parece ter evidências mais claras a seu favor é a chamada Teoria da Contracção Térmica, que é sumarizada da seguinte forma:

Durante o inverno ártico, por exemplo, sabe-se que se formam várias fracturas na tundra gelada, na ordem dos milímetros em largura e com alguns metros de profundidade (Fig. 2a). Assume-se que estas fracturas são resultado de tensão causada por contracção térmica. No início da primavera supõe-se que a água da neve derretida infiltra-se dentro destas fendas e com o abaixamento de temperatura acaba por congelar e produzir um veio que penetra no *permafrost* (Fig.2b). No inverno seguinte a renovação da contracção térmica, supostamente abre fendas verticais nos locais anteriores por se encontrarem sujeitos a menores tensões. Outro incremento de gelo é adicionado, quando a água da primavera seguinte derrete e se infiltra na fenda renovada que volta a congelar. Este ciclo é repetido ao longo de décadas e séculos (fig. 2c e d) (Lachenbruch , 1963).

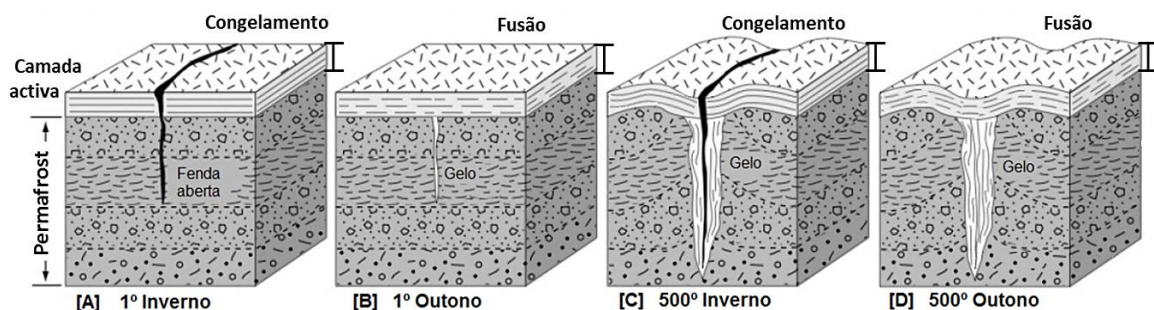


Figura 2: Processo de fracturação e subsequente formação de cunhas de gelo. Após repetidos ciclos de congelamento e fusão, dá-se deformação dos sedimentos, no sentido da superfície. (baseado em Lachenbruch 1962, adaptado de Härtel, 2011).

O coeficiente linear de expansão do gelo puro é 52.7×10^{-1} a 0°C , mas a -30°C é apenas 50.5×10^{-1} , ou seja, é menos plástico quando a temperatura de um solo congelado baixa; por isso, quando o solo é muito rico em gelo surgem então as fissuras ou fendas (French, 2007). As fendas abertas são preenchidas repetidamente por sedimentos, material orgânico, neve e cristais de gelo, mas em primeiro lugar recebem a água derretida da neve que rapidamente congela e impede a fenda de fechar. O veio de gelo derrete na camada activa no verão seguinte, porém o gelo acumula-se no permafrost. A fracturação sazonal recorrente ocorre preferencialmente em fracturas anteriores e leva ao crescimento vertical

e lateral, portanto a composição sequencial da cunha é mais recente no sentido do centro da cunha de gelo (Harry & Gozdzik 1988).

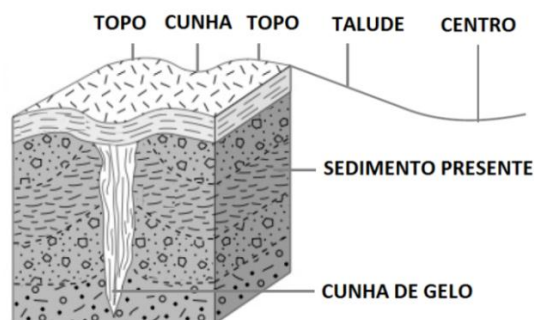


Figura 3: Terminologia das cunhas de gelo (adaptado de Härtel, 2011)

Tipicamente as superfícies das redes poligonais são caracterizadas por duas elevações paralelas adjacentes à cunha, mais baixa (Fig.3). Esta topografia está relacionada com os movimentos anuais do solo, que são direccionados para a cunha de gelo, como detectado por observações de campo (Mackay 1980, 2000); adicionalmente, o crescimento gradual do gelo na cunha provoca o deslocamento lateral e para cima do solo, por flexão dos estratos de sedimento presentes, como ilustrado na figura 2, em [C] e [D] (Mackay, 2000; Härtel, 2011).

As temperaturas críticas para a fracturação do gelo dependem em primeiro lugar do facto do coeficiente linear de expansão do gelo puro ser mais baixo a temperaturas muito negativas do que a 0° C, logo um solo rico em gelo fractura mais facilmente quando a temperatura baixa muito (French, 2007). Estudos clássicos de Péwé (1966) revelaram que a fracturação do gelo no solo ocorria em regiões caracterizadas por temperaturas MAAT abaixo de -6° C. Contudo, segundo Lachenbruch (1962), em geral a fracturação devida à contracção térmica ocorre mais provavelmente em condições de arrefecimento rápido do solo a baixas temperaturas, não havendo uma relação simples entre a temperatura do ar e os factores que controlam a fracturação no solo.

Recentemente, Christiansen (2005) através de um ano de monitorização (2002-2003) de um polígono *low-centered* (côncavo), pertencente a uma das redes estudadas neste trabalho, concluiu que a fracturação só ocorreu no solo quando as temperaturas desceram abaixo de -15° C.

Relativamente à morfologia dos polígonos, Mackay (2000) propôs um sistema de classificação dos polígonos (Fig. 4), tanto para a sua morfologia como para a sua seqüência de desenvolvimento. No seu sistema de classificação morfológica, que se aplica

a áreas planas, mostra em perfil as fases progressivas de evolução desde um polígono incipiente, até ao que denomina de intermédio. Após a fase de crescimento representa a morfologia de aluimento como Fase de *Thermokarst*. A sequência de desenvolvimento mostra a subdivisão para um polígono primário, geralmente em áreas planas e homogéneas, até à divisão terciária.

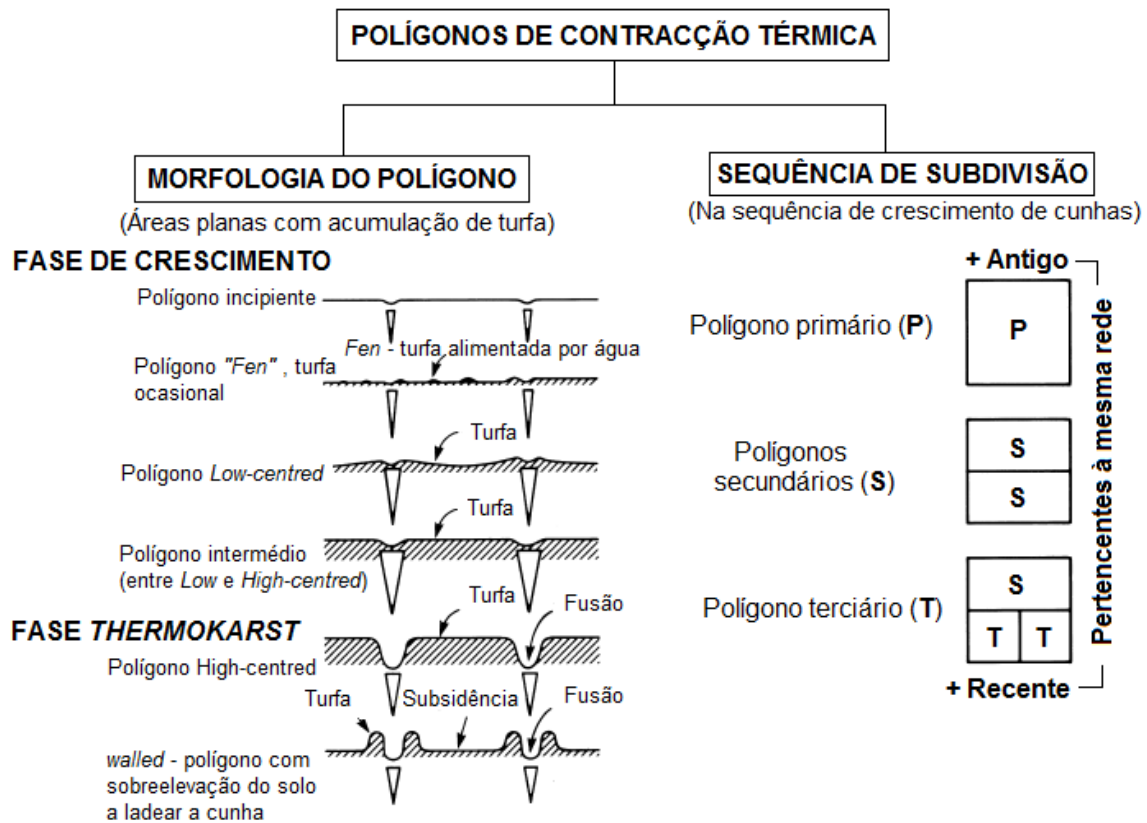


Figura 4: Sistema de classificação para polígonos que ocorrem em áreas planas; as cunhas são ilustradas em perfil, a formação normalmente progride de um polígono incipiente para um intermédio; a fase de thermokarst (zonas com depressões, ou aluimento de solo associado à fusão) está dividida em polígonos *High-centred* e *walled*, (adaptado de Mackay, 2000).

As cunhas de gelo também podem ser classificadas de acordo com a direcção preferencial do seu crescimento em: epigenéticas, singenéticas e anti-singenéticas. As cunhas epigenéticas crescem em zonas estáveis onde a sedimentação e a erosão são baixas, ou seja, as cunhas crescem mais em largura e menos em altura. As cunhas singenéticas crescem para cima em áreas onde há agradação do permafrost por sedimentação ou alterações climáticas evidentes. As cunhas anti-singenéticas crescem para baixo, em locais de erosão e remoção de material (Mackay, 2000).

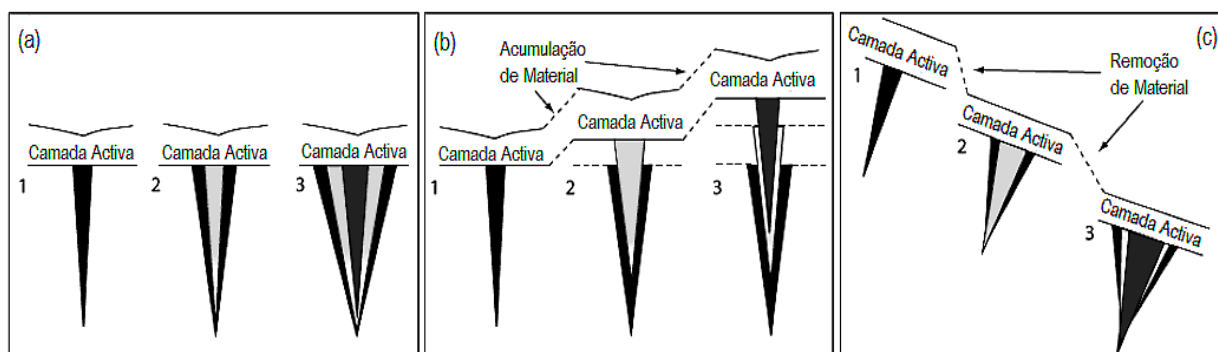


Figura 5: Desenvolvimento de cunhas (a) epigenética, (b) singenética (c) anti-singenética (baseado em Mackay, 1990; adaptado de Hârtel, 2011).

French (2007) apresenta também uma classificação de tipologias de acordo com a orientação dos polígonos e o tipo de intersecção das cunhas, isto é, o valor do seu ângulo interno. Segundo o mesmo autor, as pesquisas de Lachenbruch (1962, 1966) revelam que as redes devem exibir tendência para formar ligações ortogonais ao longo do tempo. Isto significa que uma rede inicialmente com mais ligações hexagonais tenderá a transformar-se numa rede com mais ligações ortogonais. As redes orientadas com o declive do terreno surgem normalmente perto de corpos de água (French, 2007).

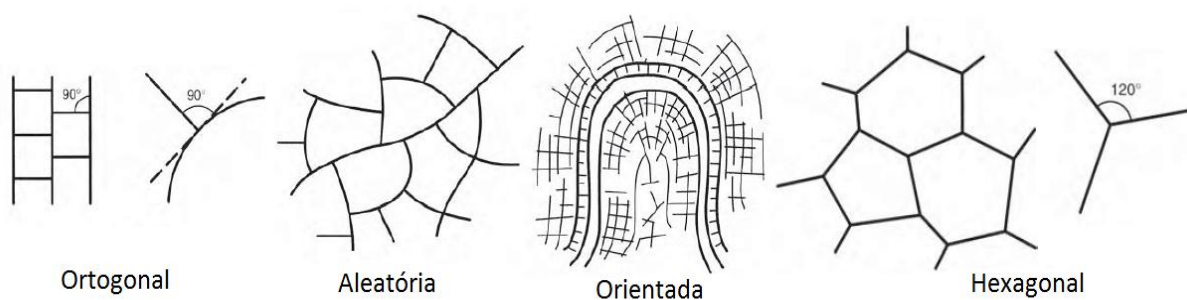


Figura 6: Tipologias de redes poligonais de contração térmica e terreno de permafrost (adaptado de French, 2007).

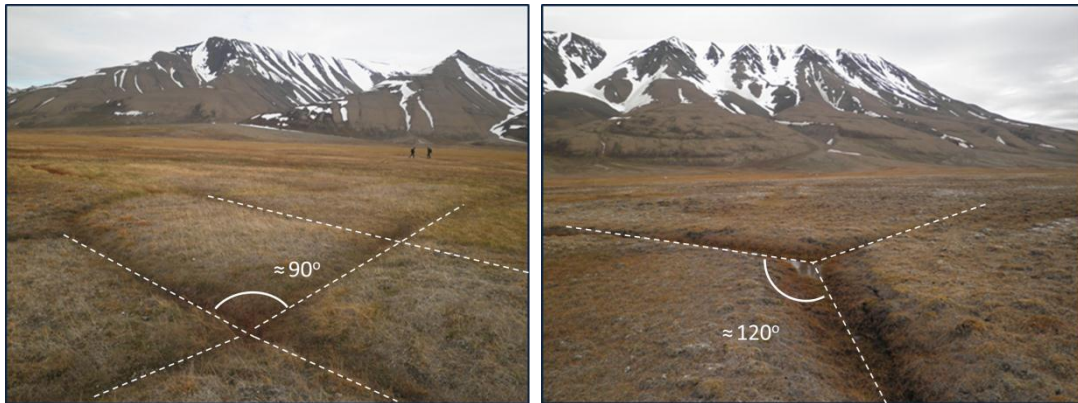


Figura 7: Redes poligonais no vale de Adventdalen: à esquerda, uma ligação ortogonal em que o polígono apresenta um vértice tetravalente; à direita uma ligação hexagonal com um vértice trivalente.

3. ENQUADRAMENTOS

3.1. ENQUADRAMENTO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo fica localizada no Arquipélago de Svalbard (situado entre 74° e 81° N, desde 10° a 35° E), mais especificamente na sua ilha principal Spitsbergen, que tem uma área de cerca de 61200 km². A área coberta pelo mapa geológico de Adventdalen cobre 2250 km² e situa-se na parte central de Spitsbergen; a região é montanhosa, moderadamente glaciada e o clima é polar; a sequência rochosa exposta tem cerca de 3400 m de espessura (Major e Nagy , 1972).

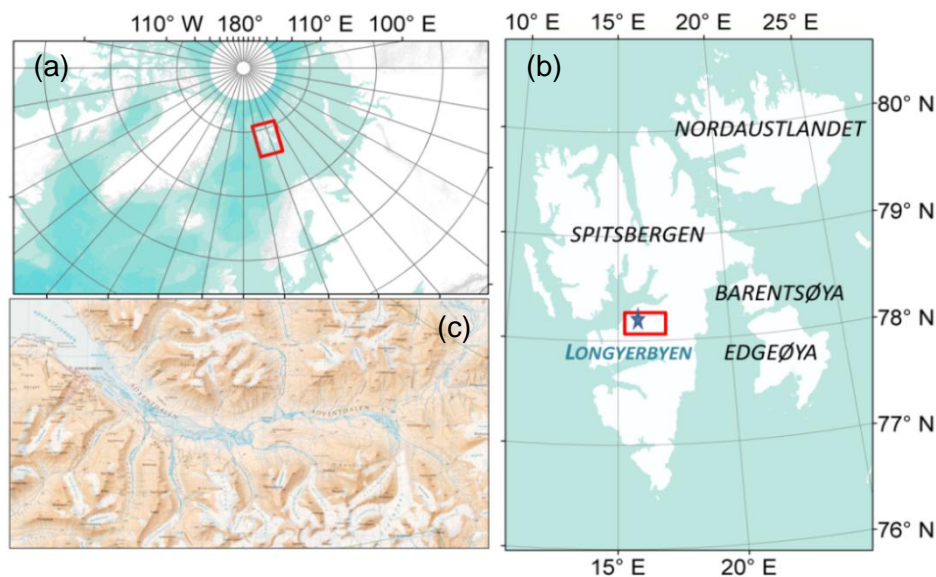


Figura 8: Área de estudo (a) Localização do Arquipélago (mapas de base da ESRI©), (b) Localização da ilha principal Spitsbergen e da cidade de Longyerbyen, o vale de Adventdalen está sinalizado com um rectângulo encarnado (mapas de base da ESRI©), (c) Mapa topográfico do vale de Adventdalen.

Durante os últimos anos, a pequena cidade portuária de Longyearbyen tem-se tornado um importante centro de pesquisa no Ártico, com a instalação da UNIS-University Centre at Svalbard, sendo também a mais setentrional instituição de ensino e investigação do mundo (Härtel, 2011). O apoio logístico da UNIS, como instituição acolhedora, e do IPN, foram fundamentais para a realização das campanhas de campo.

O vale de Adventdalen é um vale largo em forma de U que foi deglaciado há cerca de 10 Ka. Geologicamente, a área tem registos desde o Pérmico até ao Eocénico, e a exposição das rochas apresenta-se com idades gradualmente mais recentes para sul (Dallmann et al., 2001).

Adventdalen é uma das zonas mais secas de Svalbard, com uma média anual de precipitação apenas de 190 mm, e uma média anual de temperatura (MAAT) perto de -6°C no aeroporto de Svalbard (Christiansen, 2005). O clima é, portanto, relativamente seco e apenas 18% da superfície à volta da cidade de Longyerbyen é coberta por glaciares, o que é um valor relativamente baixo quando comparado com o resto de Svalbard onde os glaciares cobrem cerca de 60% da superfície (Sørbel et al., 2000).

O vale de Adventdalen é bastante plano e largo, rodeado de vertentes com declives acentuados onde ocorrem diversos processos que modelam a paisagem. Neste tipo de vales o rio desenvolve muitos canais, há grandes volumes de sedimentos de rochas erodidas pelo gelo que sobrecarregam a bacia que tem apenas o período do verão para os movimentar. No fim do verão os sedimentos estagnam com a diminuição da circulação de água e bloqueiam a passagem da água, abrindo-se novos canais no ano seguinte (Piepjohn et al., 2012).



Figura 9: Vista panorâmica do vale de Adventdalen (fotografia da autoria de Pedro Pina, 2011).

A vegetação presente é escassa e é constituída pela típica da tundra do Alto Ártico, em que as áreas com cobertura contínua incluem sobretudo musgos, herbáceas e líquenes, que estão restritas a zonas relativamente protegidas, enquanto as áreas montanhosas, estando mais expostas, apresentam apenas pequenas manchas de vegetação também com algumas plantas vasculares (Major & Nagy, 1972).

A espessura do *permafrost* nesta região varia entre cerca de 100 metros nas zonas de vale, até aproximadamente 450 m nas regiões montanhosas (Ulrich *et al.*, 2011). Já a espessura da camada activa varia de alguns decímetros até 1.5 metros dependendo da vegetação, cobertura de neve e condições de superfície (Sørbel *et al.*, 2001).

As redes poligonais de contracção térmica encontram-se ao longo de todo o vale de Adventdalen (cerca de 35 km). As várias redes poligonais com fendas de contracção térmica acompanham mais ou menos a distribuição da rede de drenagem. As redes surgem predominantemente em zonas relativamente planas, mas algumas encontram-se em vertentes com 25 graus de declive (Sørbel *et al.*, 2001). A sua distribuição surge em posições mais elevadas à medida que se penetra no vale para montante do rio. Matsuoka (1999) e Christiansen (2005) encontraram ambas evidências de que a contracção térmica de algumas redes poligonais continua ainda a ocorrer presentemente neste vale.

3.2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

Algumas das áreas livres de gelo em Svalbard contam uma importante história geológica, pois estão também livres de vegetação como apresenta, por exemplo, a parte central da Europa. Uma grande parte da história da Terra está exposta nas ilhas deste Arquipélago o que o torna único e atractivo para os geólogos (Piepjohn *et al.*, 2012). Os registos geológicos de Adventdalen mostram a existência de rochas sedimentares com idades entre as épocas do Pérmico e o Eocénico. Geologicamente a região situa-se na margem norte de uma importante bacia terciária (CTB - Central Tertiary Basin), no promontório de uma fold-thrust (falha tectónica inversa de baixo angulo) que atravessa Spitsbergen (Fig.10). Os depósitos do Pérmico consistem sobretudo, em rochas marinhas carbonatadas, depositadas em ambientes costeiros. No Mesozóico (Triássico a Cretácico Inferior), os sedimentos são dominados por argilas e siltitos marinhos, reflectindo assim várias sequências do desenvolvimento da bacia sob condições maioritariamente estáveis em termos da plataforma (Dallmann *et al.*, 2001).

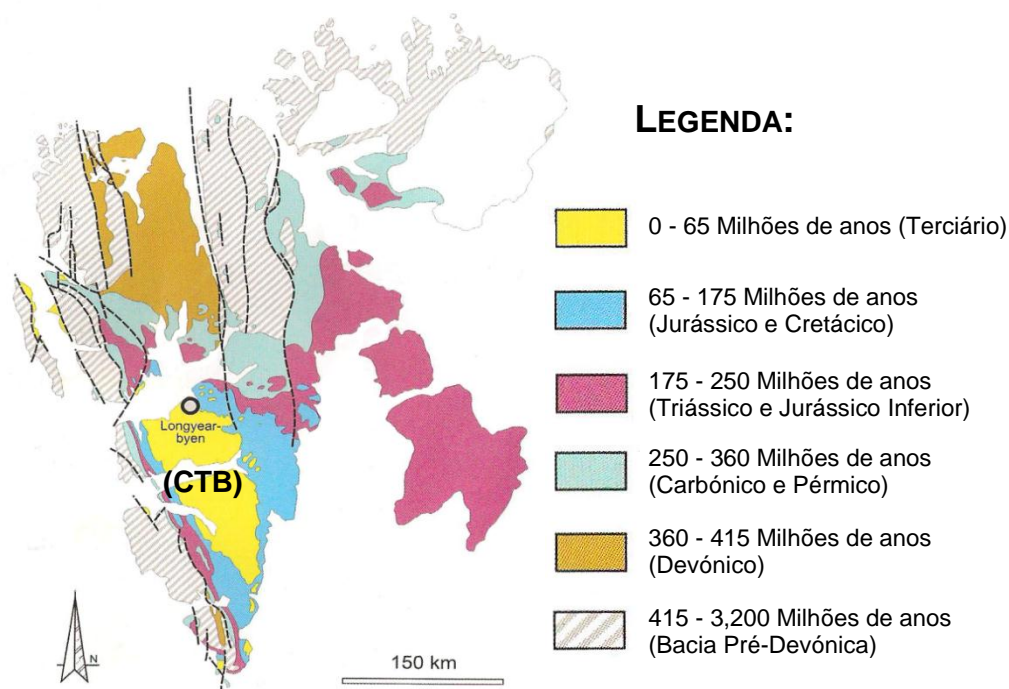


Figura 10: Mapa simplificado da geologia de Svalbard (baseado em Hjelle, 1993; adaptado de Piepjohn et al., 2012).

Devido ao movimento das placas tectónicas, Svalbard deslocou-se do Pólo Sul até à sua posição actual no Alto Ártico, tendo passado no seu percurso por uma grande variedade de climas e episódios de deformações tectónicas que estão reflectidas em formações rochosas diversas. O último grande evento tectónico está relacionado com a abertura do Oceano Ártico, no Terciário. Por estar na posição marginal em que se encontra, na extremidade da plataforma do mar de Barents, o arquipélago não era apenas elevado ou erodido mas era também afectado pelas tensões dos deslocamentos laterais (transcorrentes) das placas tectónicas entre Svalbard e a Gronelândia. Desta forma surgiu no Eocénico a cintura de *fold-thrust* (Härtel, 2011). A CTB é atravessada por falhas tectónicas na sucessão do Mesozóico, devido a um grande descolamento que gerou falhas inversas, que acabaram por dividir a zona do mapa em dois principais blocos tectónicos (Dallmann *et al.*, 2001).

Segundo Salvigsen (1984) os grandes fiordes e vales de Svalbard indicam que já no Quaternário importantes glaciações estiveram envolvidas na formação desta paisagem. Modelos de glaciação para Svalbard, sugerem que existiu de facto uma última grande glaciação, a recente “*Weichselian*” (última glaciação que chegou a atingir o norte da Europa) durante o Pleistocénico. O deslocamento da linha de costa em alguns locais de Svalbard e estudos estratigráficos no mar de Barents apoiam esta teoria, uma vez que o padrão de emergência que ocorre em Svalbard está de acordo com o desaparecimento de

calotes de gelo nesta região (Landvik & Salvigsen, 1985; Landvik et al., 1987). Segundo Worsley (2008), durante o Neogénico Svalbard foi afectado repetidamente por subsidência, induzida por glaciares, mas também pelo levantamento isostático (equilíbrio gravitacional em que a elevação das placas depende da sua espessura e densidade), bem como pela erosão.

Salvigsen (2002) considera ainda que durante o Holocénico toda a região de Svalbard continuou a emergir, tendo obtido fortes evidências a partir de praias elevadas no arquipélago, inclusive com datações de radiocarbono de vários ossos de baleia.

O Quaternário está representado em Adventdalen; cerca de 1/6 da área do mapa é coberta por depósitos não consolidados. A maior parte destes depósitos são originários da passagem de glaciares e da meteorização mecânica, com a consequente modificação da rede de drenagem, e da acção das marés (Major & Nagy, 1972).

As redes poligonais de contracção térmica ocorrem em quase todo o vale perto do rio Adventdelva, maioritariamente em zonas planas com depósitos recentes do Quaternário, não consolidados, essencialmente dos tipos fluvial e marinho. As formações em posição topográfica mais elevada onde ocorrem redes, identificadas neste trabalho por DR, estão nas formações de Rurikfjellet e Agardhfjellet (ver anexo I, mapa geológico de Adventdalen). Como mais à frente se verá, o polígono mapeado a uma cota mais elevada encontra-se aproximadamente a 311 m acima do nível médio do mar (a.s.l.), embora segundo Sørbel *et al.* (2001), já tenham sido encontrados polígonos até 500 m a.s.l. nesta região.

4. MAPEAMENTO DE REDES POR DETECÇÃO REMOTA

Começou-se por testar nas redes do Adventdalen algoritmos de segmentação e caracterização automática de redes poligonais desenvolvidos para os exemplos de Marte (Pina *et al.*, 2006; Bandeira *et al.*, 2010), de forma a obter a parametrização geométrica e topológica das redes (Pina *et al.*, 2008; Saraiva *et al.*, 2009). No entanto, o algoritmo de segmentação automática obteve desempenhos não totalmente satisfatórios com diferenciados graus de identificação dos contornos dos polígonos. Nas redes em que a presença de água líquida era abundante, nomeadamente nas depressões correspondentes aos seus interiores ou entre polígonos adjacentes, as identificações eram efectuadas incorrectamente. Nas regiões secas, o algoritmo funcionou relativamente bem. Uma vez que a generalização deste algoritmo para ser aplicado indistintamente em imagens da Terra ou de Marte estava fora dos objectivos desta tese, optou-se por efectuar a digitalização dos polígonos de uma forma manual nuns SIG. Foram utilizadas, como

informação de base, imagens aéreas resultantes de uma campanha fotogramétrica feita no verão de 2009 pelo IPN.

As imagens que cobrem todo o Adventdalen foram adquiridas ao IPN em formato bruto, ou seja, sem ortorrectificação. No entanto, como contêm toda a informação necessária para realizar as correcções geométricas adequadas, foi possível desencadear o processo que permite construir um mosaico completo de todo o vale constituído por um total de 53 imagens ortorrectificadas. Estas imagens têm 4 bandas (R, G, B e NIR, ou seja, vermelho, verde, azul e infra-vermelho próximo) e uma resolução espacial de 20 cm/pixel, pelo que são consideradas imagens de muito elevada resolução.

4.1 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

As imagens de DR da superfície terrestre normalmente têm distorções geométricas, resultantes da trajectória da plataforma de aquisição mas também das diferenças de altitude do terreno. A ortorrectificação remove estas distorções ao criar um ortofotomapa, em que as suas características, ajustadas ao relevo topográfico terrestre, passam a estar posicionadas como num mapa planimétrico. Podem-se portanto efectuar nestas imagens medições geométricas com precisão. Schowengerdt (2007) define a ortorrectificação como o deslocamento pontual da imagem gerado pela variação do relevo, fazendo com que cada pixel da imagem fique posicionado como se fosse observado de um ponto verticalmente acima.

Muitas imagens de satélite são fornecidas directamente com os Rational Polygonal Coefficients (RPC), informação que permite obter um modelo matemático da geometria da imagem que, em conjunto com um MDT, permite efectuar a ortorrectificação da imagem. Neste caso o IPN não forneceu os RPC mas sim os dados técnicos para o fazer. Entre eles estão parâmetros internos (distância focal, ponto principal, etc.), que são os parâmetros que determinam a geometria interna da câmara (Cramer *et al.*, 2000). No caso do software ENVI[®] que foi utilizado para realizar esta tarefa, é possível construir os RPC para determinada câmara ou sensor a partir de uma série de dados disponibilizados pelo fornecedor (no nosso caso o IPN). A câmara utilizada no voo do IPN (ULTRACAM XP) tem uma orientação interna conhecida e é do tipo métrica, porque os parâmetros internos de orientação não mudam em cada imagem. Uma câmara ‘amadora’ é considerada não métrica porque os seus parâmetros internos mudam cada vez que a câmara é focada. Os outros parâmetros fornecidos pelo IPN e que variam, em cada fotografia, são os parâmetros de orientação exterior. Estes parâmetros determinam a posição e orientação da

câmara no voo em coordenadas absolutas, através de 6 valores: coordenadas de projecção no centro da imagem (x_0, y_0, z_0) e rotação do avião em 3 eixos ((x) omega, (y) phi e (z) kappa) (Cramer *et al.*, 2000).

Desta forma 53 imagens aéreas, que cobrem praticamente todo o vale foram ortorrectificadas no ENVI[®]. Para cada uma das imagens foram construídos os respectivos RPC com o *input* dos parâmetros internos (constantes) e os de orientação externa que variam de imagem para imagem. Depois de se obter o ficheiro RPC para determinada imagem inicia-se a ortorrectificação recorrendo também a um MDT (Fig11c). Começou-se por utilizar o único MDT então disponível, o GDEM do ASTER, com 30 metros por pixel de resolução, valor bastante inferior ao requerido. Relembre-se que o GDEM é um produto do METI e da NASA, cobre toda a superfície terrestre e tem a vantagem de ser fornecido em formato GeoTIFF. A ortorrectificação realizada, essencialmente, por se ter que construir os RPC para cada imagem, propriamente, foi um processo moroso. O erro resultante deste processo é bastante variável e bem visível na sobreposição dos ortofotomapas, pois nos seus cantos, varia entre 1 a 2 metros. No entanto, na região central de cada imagem está garantidamente correcto por corresponderem a pontos cujas coordenadas foram introduzidas nos parâmetros de orientação externa.

Estes erros podem ser atribuídos ao uso de um MDT pouco adequado, e à falta de alguns GCP por inexistência de imagens adjacentes exteriores. Apesar dos erros obtidos nestas correcções geométricas, verificou-se que por as redes se localizarem nas regiões mais planas do vale e de cada rede estar totalmente contida num único ortofotograma, ou seja não ser necessário digitalizar nenhuma rede a partir de dois ortofotogramas adjacentes, o que permitiu dispor de resultados maioritariamente correctos na posição e geometria das redes de polígonos.

A figura 11 (a) ilustra as “*footprints*” das fotografias aéreas em bruto, conforme foram adquiridas ao IPN (antes da ortorrectificação). Esta tarefa foi realizada com imagens adquiridas em duas fases: numa primeira fase (contornos a encarnado) as imagens adjacentes têm 60% de sobreposição, o que se verificou ser excessivo, levando a que na segunda fase (contornos a azul) se utilizasse um menor número de imagens e que têm uma sobreposição de cerca de 20% depois de ortorrectificadas.

Muito recentemente foi possível adquirir ao IPN, no âmbito do projecto ANAPOLIS, um MDT de melhor resolução (20m/pixel) e de bastante maior qualidade final. Os ortofotogramas não voltaram a ser ortorrectificados com este MDT mais recente, mas as medidas obtidas relativas ao MDT (declive, altitude, escoamento, entre outras) foram já processadas a partir deste modelo de melhor qualidade.

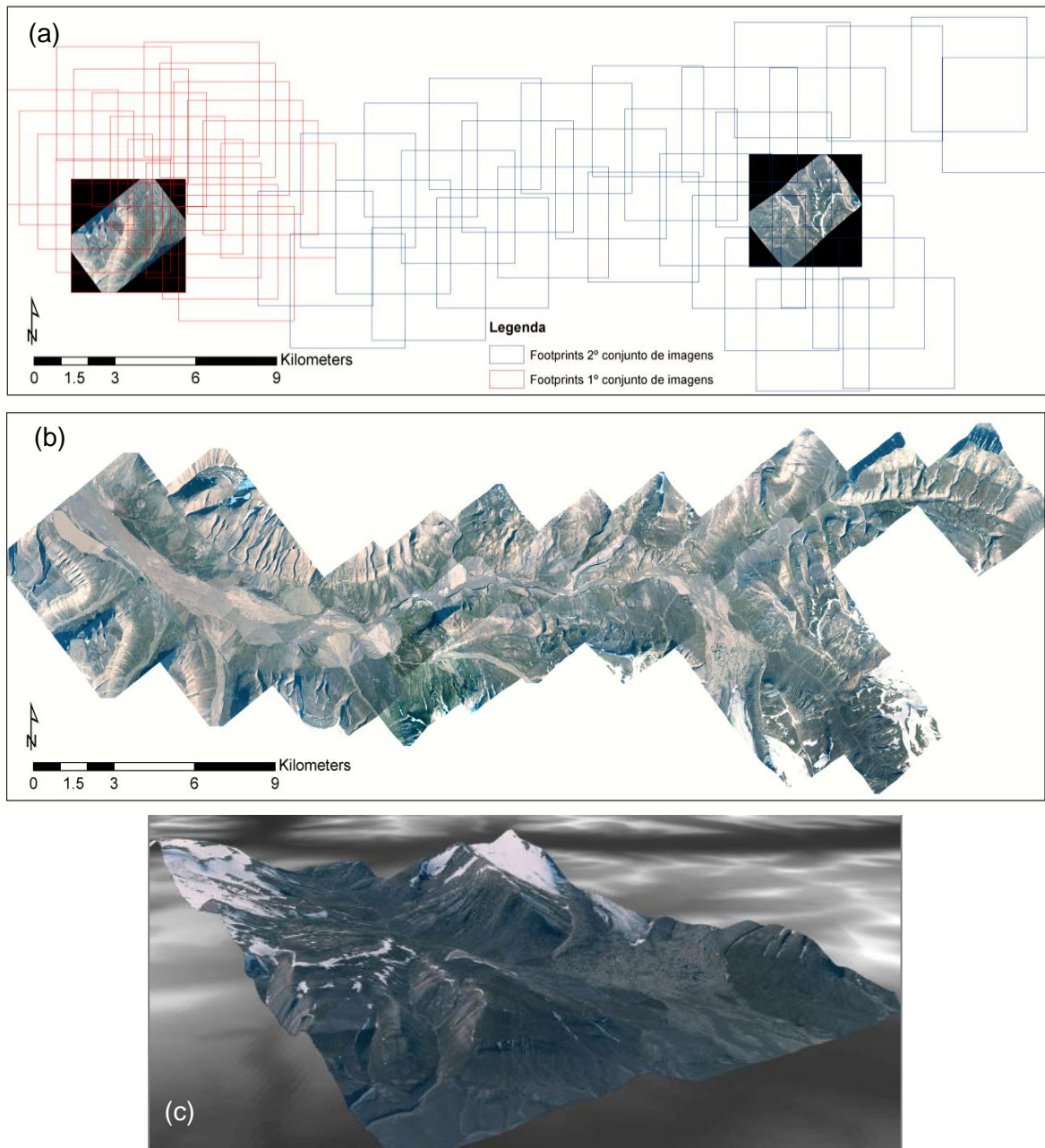


Figura 11: (a) Footprints das imagens áreas adquiridas ao IPN (em 2 fases) antes da ortorrectificação, (b) Mosaico das imagens ortorrectificadas no vale de Adventdalen (c) Imagem 3D a partir de 4 imagens ortorrectificadas sobre o GDEM – ASTER no ArcScene 3D ESRI©.

4.2 REDES MAPEADAS E REDES ESTUDADAS

Após a digitalização de todos os polígonos, verificou-se que existem regiões com grandes redes (em número de polígonos), mas também pequenos agrupamentos ou *clusters* que ocorrem maioritariamente em zonas de vertente mais erodidas onde a visualização dos contornos dos polígonos se esbate e a continuidade espacial das redes parece ficar comprometida, dando origem a uma fragmentação e pulverização em redes de menor número de polígonos.

Neste sentido, foram exportados para outro tema todos os *clusters* com mais de 10 polígonos agregados, o que gerou um novo tema de redes com 119 unidades (redes).

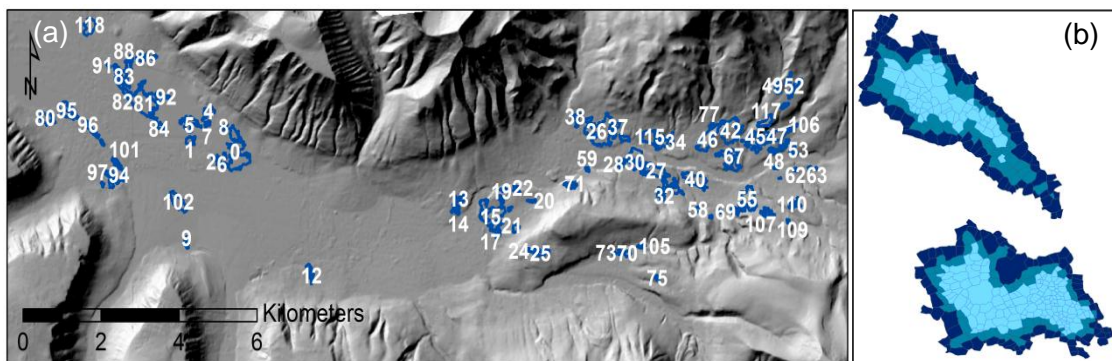


Figura 12: (a) Conjunto das 119 redes digitalizadas com mais de 10 polígonos, sobre o MDT adquirido ao IPN, (b) exemplos de duas redes com identificação das duas camadas exteriores de polígonos (camadas que são retiradas para o estudo da topologia).

Este conjunto de 119 redes (Fig.12a), foi ainda reduzido para 17 redes para serem estudadas em detalhe. Estas 17 redes foram seleccionadas por terem 20 ou mais polígonos após lhes serem retiradas duas camadas externas (Figura 12b). Estas camadas exteriores devem ser retiradas para, no âmbito dos cálculos dos parâmetros topológicos, todos os polígonos terem polígonos em toda a sua vizinhança e assim não enviesar os resultados. Algumas redes foram excluídas por, apesar de serem constituídas por um número grande de polígonos, possuírem uma forma mais alongada e ficarem abaixo do limiar de 20 polígonos após a eliminação das duas camadas exteriores. Na tabela 1 apresentam-se estatísticas globais relativas ao número e áreas dos polígonos totais mapeados e os mapeados para o conjunto das 17 redes seleccionadas.

Tabela 1: Principais estatísticas: dos polígonos totais mapeados e dos polígonos pertencentes às redes seleccionadas para este estudo.

Estatísticas	Total de Polígonos Mapeados	Polígonos das 17 redes
Número de polígonos	10327	6166
Área média/polígono (m ²)	413,5	351,8
Mediana (m ²)	264,5	215,2
Desvio padrão	493,7	463,2
Enviesamento (<i>Skewness</i>)	7,6	11,6
Área mínima (m ²)	5,7	9,1
Área máxima (m ²)	17665,9	17665,9

As 17 redes seleccionadas mantêm 59.7% dos polígonos mapeados, o que deixa de fora 40,3% dos polígonos digitalizados. No entanto, a distribuição de tamanhos mantém-se muito semelhante, como se pode ver pelos histogramas apresentados na figura 13.

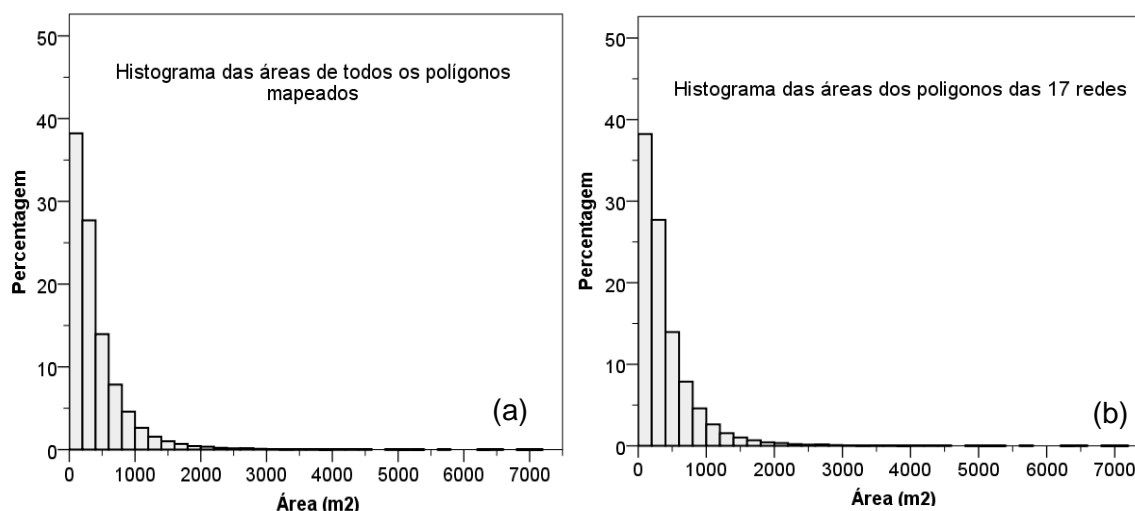


Figura 13: Histograma de áreas de polígonos para: (a) total dos polígonos mapeados, (b) conjunto de 17 redes seleccionadas.

Por outro lado, de forma a reforçar a representatividade da selecção efectuada, cerca de 67% dos polígonos totais mapeados têm uma área inferior ao seu valor médio. (413.5 m²), enquanto para o conjunto das 17 redes, se obtém um valor semelhante (cerca de 69%) abaixo do respectivo valor médio (351,8 m²).

De notar que a Tabela 1 mostra que existe um polígono com tamanho máximo de 17665,9 m², um verdadeiro *outlier que*, embora tenha sido incluído em todos os cálculos, foi retirado das figuras dos histogramas para permitir uma melhor visualização da distribuição dos restantes. Este polígono desviou sempre os dados ao longo de todas as medições,

inclusivamente nos modelos de ajuste de regressão linear que melhoravam consideravelmente quando o mesmo era retirado, no entanto foi sempre mantido. Para ilustrar melhor esta situação mostra-se um gráfico com as áreas médias das redes e o desvio padrão dessas mesmas áreas médias na figura 14. Note-se que o desvio padrão aumenta com as áreas médias dos polígonos. Este facto será abordado mais tarde na medição da variabilidade ou regularidade das redes (na secção 7.2).

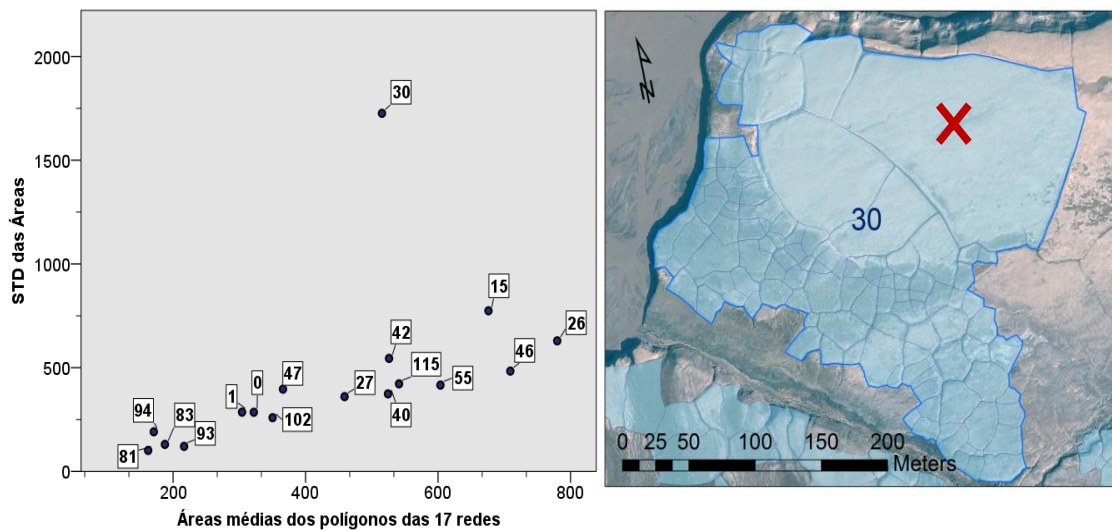


Figura 14: (a) gráfico das áreas médias dos polígonos para o conjunto das 17 redes em função do respectivo STD, (b) rede número 30 com o maior polígono anómalo (marcado com uma cruz), com uma área superior a 17 mil metros quadrados.

A localização do conjunto das 17 redes mapeadas, bem como o pormenor de cada uma dessas redes apresenta-se na Fig.15. Verifica-se visualmente desde logo a disparidade de formas que as redes apresentam globalmente (umas mais isotrópicas e outras mais alongadas, umas convexas e outras com concavidades), bem como a existência de redes ou regiões de redes em que predominam organizações de vértices trivalentes ou tetravalentes. As análises quantitativas efectuadas serão apresentadas mais à frente.



Figura 15: Polígonos mapeados em Adventdalen sobre imagens ortorrectificadas nas 17 redes seleccionadas para estudo detalhado.

5. VALIDAÇÃO DO MAPEAMENTO

De forma a avaliar se a delimitação dos polígonos efectuada num ecrã de um computador através das ferramentas disponíveis em ambiente SIG é adequada, procedeu-se à validação do mapeamento efectuado sobre as imagens do IPN.

Foi escolhida uma rede para ser utilizada como referência, neste caso a número 102 (ver figura 15) na região da qual foi realizado intensivo trabalho de campo em 2010 e 2011. O mapeamento (desenho) desta rede efectuado sobre a imagem IPN foi, por um lado, confrontado com o mapeamento sobre uma imagem de melhor resolução espacial que foi então possível adquirir (designada por imagem Kolibri) e, por outro, confrontado com um levantamento de campo. Deste procedimento resultaram 3 mapeamentos da mesma rede (Fig. 16), que foram confrontados entre si através das medições geométricas e topológicas, de forma a aferir a eventual disparidade tanto da imagem do IPN em relação à de melhor resolução, como a de ambas as imagens em relação ao levantamento que se efectuou no campo.

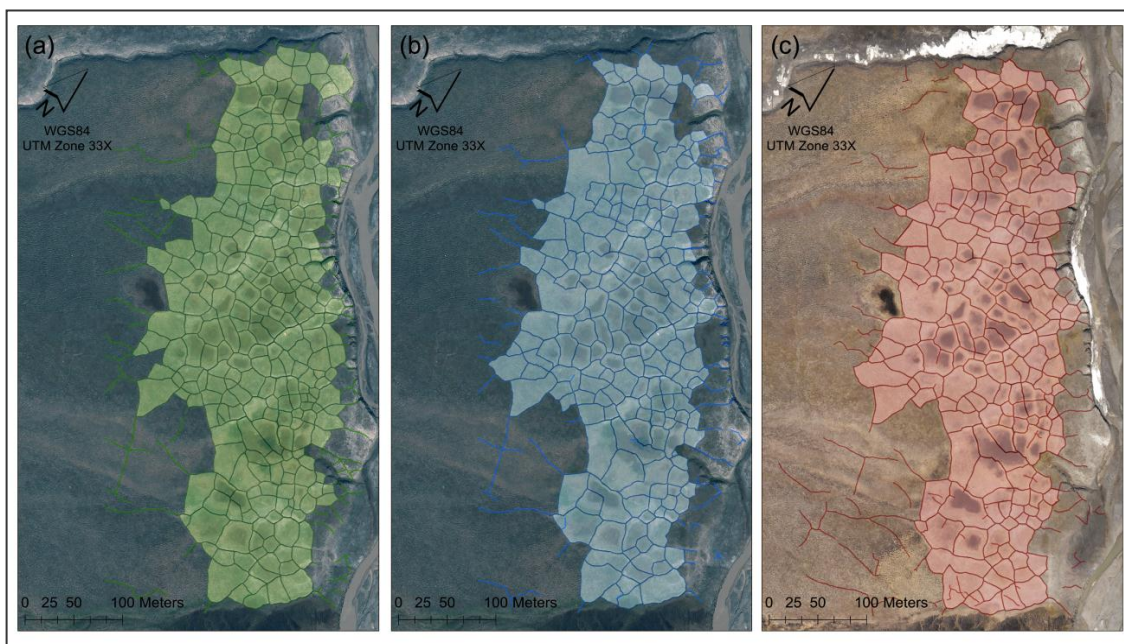


Figura 16: (a) Mapeamento de campo (b) Mapeamento digital feito sobre ortofotomapa do IPN, (c) Mapeamento digital feito sobre imagem Kolibri, ((a) e (b) estão sobrepostas ao ortofotomapa do IPN e (c) está sobreposta à imagem Kolibri).

A imagem Kolibri de muito elevada resolução espacial (6 cm/pixel) utilizada para o mapeamento da rede 102 foi captada por uma empresa privada (Kolibri Geoservices) que efectua voos com um Veículo Aéreo Não-Tripulado ou UAV (Unmanned Aerial Vehicle). A

câmara montada neste veículo é uma câmara regular não métrica (PENTAX Optio 40), pelo que não existem parâmetros internos para ortorrectificação, no entanto as imagens foram fornecidas com coordenadas KML para o centro de cada foto. A imagem na figura 17 corresponde ao mosaico feito a partir de fotos individuais de 4000x3000 *pixels*.

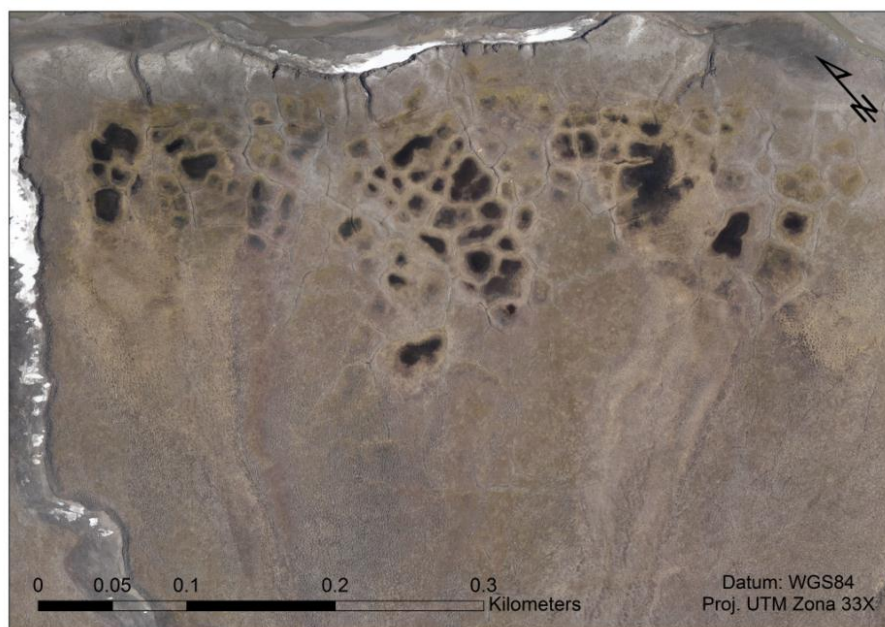


Figura: 17 Imagem Kolibri, mosaico de fotografias individuais obtidas a partir de um UAV.

Este mosaico foi georreferenciado sobre o ortofotomapa IPN correspondente na zona da rede 102, com a maior precisão possível, para minimizar as diferenças geométricas entre os polígonos. A georreferenciação foi efectuada no *software* ArcGis[®], tendo-se obtido um erro médio de 2.3 *pixels*. Este mosaico embora tenha melhor resolução espacial que o ortofotomapa do IPN, apresenta apenas as três bandas do espectro visível (RGB). As principais características das duas imagens de DR utilizadas encontram-se resumidas na Tabela 2.

Tabela 2: Principais características das imagens de detecção remota, de muito alta resolução, adquiridas no âmbito do mapeamento dos polígonos em Adventdalen.

Imagem	Data de aquisição	Processamento	Resolução espacial	Bandas	Resolução radiométrica
IPN	Julho 2009	Ortorectificado com DTM ASTER	20 cm/pixel	R+G+B+NIR	8 Bits Intervalo [0, 255]
Kolibri	Junho 2009	Mosaico de fotografia aérea georreferenciada	6 cm/pixel	R+G+B	8 Bits intervalo [0, 255]

No âmbito do projecto ANAPOLIS (Pina *et al.*, 2010) foram realizadas duas campanhas de campo em Adventdalen em 2010 e 2011 que permitiram, entre várias outras tarefas, efectuar o estudo detalhado desta rede (102).

Na campanha de 2010 foi efectuado o levantamento de 121 polígonos (vários pontos ao longo de cada cunha, no seu centro) com recurso a um GPS diferencial (DGPS) em modo RTK, tendo a rede ficado parcialmente coberta. O levantamento no campo da restante rede foi completado na campanha de 2011. Refira-se que na realização desta tarefa, o protocolo seguido levou a que cada polígono fosse identificado com uma pequena bandeira numerada e que as cunhas fossem também identificadas visualmente e desenhadas manualmente no campo sobre o mosaico Kolibri. Este levantamento foi posteriormente digitalizado para ser confrontado com os mapeamentos por DR.

Na tabela 3 apresenta-se um resumo dos números de polígonos e áreas obtidas para os três diferentes levantamentos da mesma rede.

Tabela 3: Número de polígonos e áreas para os 3 tipos de levantamentos efectuados para a rede 102.

Levantamento	Nº Polígonos	Áreas (m ²)				
	Total	Média	Máximo	Mínimo	STD	Área total de rede
Campo	268	298	1245	50	191	79821
IPN	197	398	2189	28	304	78386
Kolibri	180	431	2311	39	350	77466

Em termos de números de polígonos existe uma diferença razoável entre os levantamentos por DR e o levantamento de campo. Enquanto no levantamento IPN há 73% do número de polígonos do levantamento de campo, o levantamento Kolibri tem 67%. Já entre as imagens as diferenças não são tão significativas, devendo a melhor resolução espacial da imagem Kolibri ser equilibrada pela melhor resolução espectral da imagem IPN. Por outro lado, as áreas totais das redes identificadas são praticamente idênticas: a rede IPN tem 98% da área global da rede levantada em campo, já para a rede Kolibri esse valor é de 97%.

Verifica-se visualmente que quando se sobrepõem as imagens dos diferentes levantamentos não há diferenças significativas na geometria dos polígonos (Fig.18).

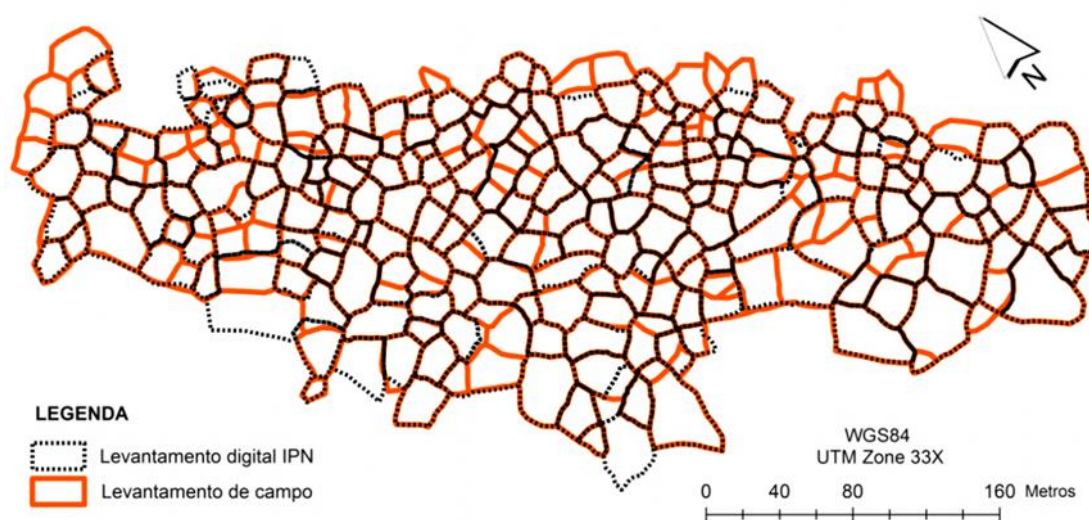


Figura 18: Sobreposição da rede IPN com a rede do campo.

A diferença no número de polígonos levantados em campo, resultou das identificações na periferia da rede (cunhas mais estreitas, ténues e incompletas), mas também do facto de *in situ* conseguirmos observar mais cunhas internas com menores espessuras (talvez de segunda ou terceira ordem) aumentando assim o número total de polígonos e mantendo as áreas globais das redes relativamente semelhantes.

Em relação às diferenças entre imagens verificou-se que, apesar de a imagem Kolibri ter melhor resolução espacial, algumas cunhas eram mais facilmente identificáveis na imagem IPN, por esta apresentar um maior contraste (Fig. 19 a e b).

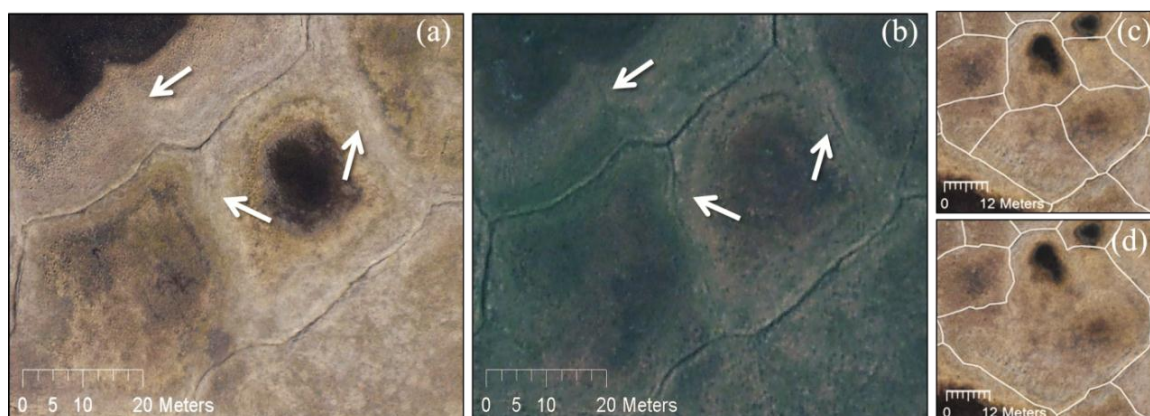


Figura 19: Diferenças entre contornos observados e detectados: (a) imagem Kolibri, (b) imagem IPN, (c) contornos de polígonos detectados no levantamento de campo : 5 polígonos áreas entre 200 e 500 m², (d) polígonos detectados na imagem Kolibri: 1 polígono com 1930 m².

Verificando-se experimentalmente que através das imagens de DR não se detectam todas as cunhas, foi necessário avaliar a importância das diferenças na geometria e topologia dos 3 levantamentos. Nesse âmbito, foram calculadas as vizinhanças dos polígonos e as

valências dos vértices destas redes, tendo sido retiradas as 2 camadas externas para contabilizar essas quantidades.

A Tabela 4 apresenta o número médio de vizinhos de cada polígono e respectivos estatísticos básicos para cada tipo de levantamento.

Tabela 4: Número de vizinhos de cada polígono dos 3 diferentes levantamentos da rede 102.

Polígonos	Número		Vizinhos			
	Levantamento	Total	Utilizados nos cálculos	Média	Máximo	Mínimo
Campo	268	189	6.26	10	3	1.29
IPN	197	108	6.10	11	3	1.37
Kolibri	181	93	6.00	10	2	1.34

Os resultados relativos à topologia são praticamente os mesmos para as 3 redes: o valor médio de vizinhos para cada polígono é sempre próximo de 6, com desvios padrão e valores extremos muito semelhantes. Verifica-se assim que, apesar do número de polígonos variar entre os diferentes mapas da rede, os valores topológicos globais não são afectados na mesma magnitude por esse facto.

A Tabela 5 apresenta as valências dos vértices, calculadas para o mesmo número de polígonos interiores contabilizados na vizinhança.

Tabela 5: Valência dos vértices para os 3 diferentes levantamentos da rede 102.

Levantamento	Vértices Pentavalentes		Vértices Tetraivalentes		Vértices Trivalentes		Número Total
	Número	%	Número	%	Número	%	
Campo	0	0.0	36	8.7	376	91.3	412
IPN	0	0.0	17	5.7	280	94.3	297
Kolibri	1	0.4	12	4.3	263	95.3	276

Apesar de o número de vértices envolvidos ter uma variação importante entre os 3 levantamentos, os resultados finais relativamente ao número de arestas que se encontram em cada vértice são também bastante semelhantes, sendo estes maioritariamente trivalentes. A ligeira diferença entre os resultados das imagens IPN e Kolibri e o levantamento de campo prende-se sobretudo com a detecção de cunhas menos estreitas e ortogonais (talvez de ordem secundária de formação) nesta última rede. Desta forma a pequena subida da vizinhança no levantamento de campo, em relação aos levantamentos por DR, está associada à maior identificação de cunhas e uma pequena subida na valência dos seus vértices.

Na tentativa de compreender um pouco melhor a origem de algumas das diferenças detectadas entre os resultados obtidos entre a imagem Kolibri (onde foram detectadas menos cunhas) e a imagem IPN (que tem uma resolução espacial mais baixa), foi construído um perfil espectral sobre uma cunha (Fig. 20). Apesar de a reflectância ser mais elevada na imagem Kolibri, a depressão na imagem (ou no perfil) relativa à zona da cunha é claramente mais marcada na imagem do IPN. Isto traduz-se num maior contraste na zona da cunha, o que se pode atribuir à existência da banda NIR na imagem IPN, já que a água (ou humidade) que se acumula nestas depressões fornece uma maior variação de reflectância nesta banda, ou seja, apresenta maiores intervalos de reflectância que se traduzem em maior contraste visual.

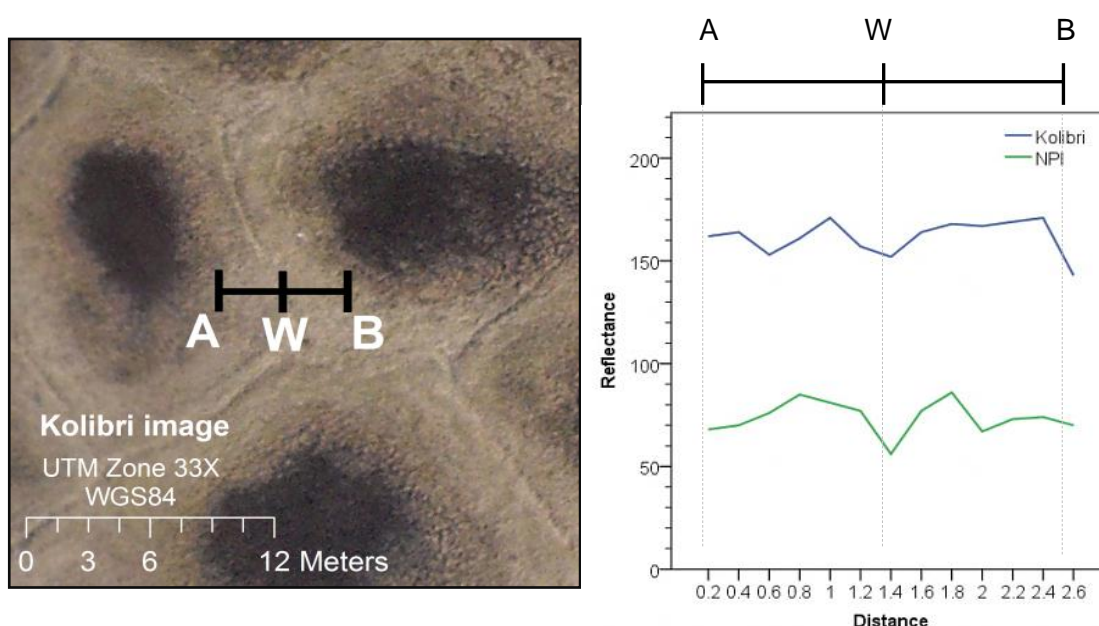


Figura 20: (a) Perfil AB em imagem Kolibri (b) Reflectância das imagens IPN (a verde) e Kolibri (a azul).

Adicionalmente, lembre-se que a imagem Kolibri foi captada no fim de Junho e a do IPN no fim de Julho, ambas no ano de 2009, e que há normalmente nesta região mais água líquida disponível em Julho do que em Junho. Apesar de pequena, há alguma diferença na largura do rio entre as imagens IPN (Fig.21a), e Kolibri, onde se regista mais neve e menos água líquida (Fig.21b).

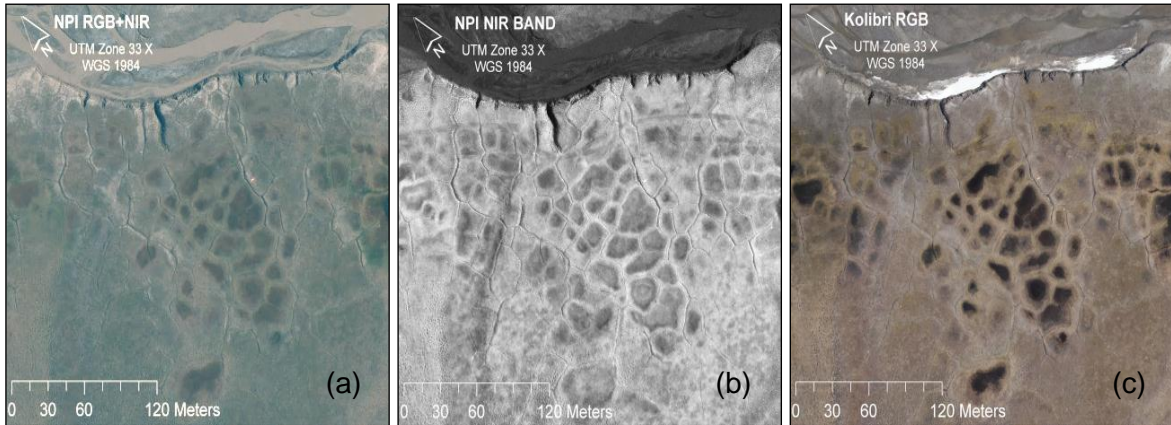


Figura 21: Zona central da rede 102: (a) imagem IPN; (b) Banda NIR da imagem IPN (contrastes típicos da banda 4: água a preto com muito baixa reflectância; sedimentos e vegetação aumentam muito a reflectância nesta banda; (c) Imagem Kolibri.

A primeira conclusão que se tira desta validação é que nem todas as cunhas são visíveis por detecção remota; algumas porque a sua espessura se encontra abaixo do limite de detecção que é possível obter nas imagens de DR, outras porque a depressão à superfície é muito ténue e não tem expressão nas imagens, e também porque simplesmente estão por vezes cobertas por vegetação. Conclui-se também que, dentro da gama utilizada de imagens de muita elevada resolução, não se obtêm melhores resultados com uma melhor definição do pixel, ou seja os 6 cm/pixel das imagens Kolibri não permitem obter melhores resultados do que os 20 cm/pixel das imagens IPN. Isto porque a hipotética desvantagem de se ter uma pior resolução espacial, foi compensada pela existência de uma banda NIR. Importa por fim ressaltar que a topologia não é afectada da mesma forma que a geometria, e uma vez que o objectivo último desta tese é também relacionar características do terreno com indicadores topológicos, espera-se ter uma maior garantia na obtenção de descritores que caracterizem diferentes tipologias de redes. Porém tendo em conta as restrições logísticas e as dificuldades de acesso e estudo de alguns locais, a DR é imperativa nestes casos.

Em conclusão, considera-se que a utilização das imagens IPN para cartografar todas as redes poligonais de Adventdalen é válida; apresenta desvantagens, mas estas são largamente contrariadas pela facilidade de uso e relativa fidelidade do mapeamento.

6. PARÂMETROS MEDIDOS NAS 17 REDES

Foi criada uma geodatabase com o intuito de organizar geograficamente todos os dados relativos às redes poligonais de Adventdalen. Nesta encontram-se também os ortofotomapas do NPI em dois catálogos de imagens, ficheiros derivados do DTM, dados numéricos em diversas tabelas e diversos temas vectoriais como vértices e centróides dos

polígonos. Nesta geodatabase os temas de digitalização dos polígonos encontram-se organizados da forma indicada no esquema da Fig.22.

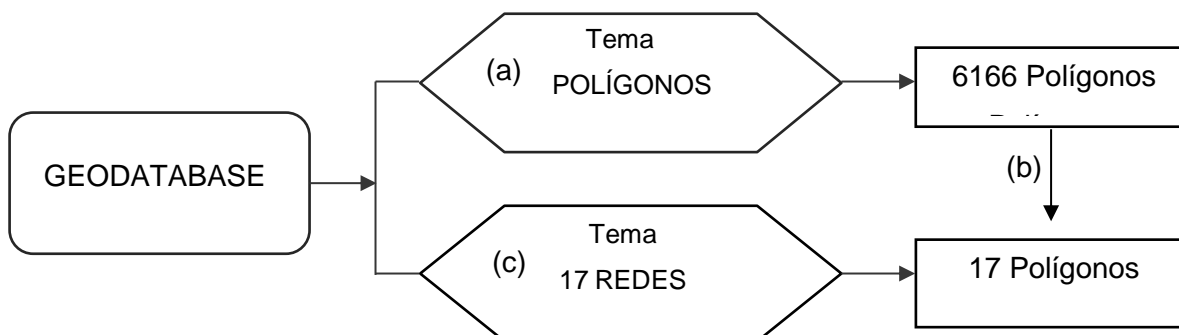


Figura 22: Esquema de organização de dados analisados e armazenados numa geodatabase: (a) representa o tema de polígonos digitalizados (para as redes seleccionadas), (b) representa o processo de sumarização das estatísticas (geralmente médias) aplicado a cada parâmetro, (c) representa outro tema onde cada rede é representada por 1 polígono e os seus atributos são resultantes da sumarização dos parâmetros medidos em (a).

No tema ‘polígonos’, os parâmetros, essencialmente topológicos e de forma, são medidos individualmente. No tema ‘redes’, os valores são tratados normalmente em termos médios, essencialmente porque os diversos parâmetros extraídos do MDT têm um limite de detecção abaixo do desejável. Ou seja, deixa de ter significado confrontar dados polígono a polígono quando a maior parte dos polígonos está precisamente abaixo do tamanho do *pixel* do MDT, com uma área de 400 m² (20mx20m).

Os parâmetros medidos nas 17 redes estão descritos na Tabela 6 (por polígono) e na Tabela 7 (por rede).

Tabela 6: Parâmetros medidos por polígono e breve descrição da sua obtenção.

Parâmetros por polígono	Descrição
Área (Metros quadrados)	Cálculo automático no ArcGIS © ESRI
Perímetro (Metros)	Cálculo automático no ArcGIS © ESRI
Eixo maior (Metros)	A partir do mínimo rectângulo envolvente
Eixo menor (Metros)	A partir do mínimo rectângulo envolvente
Eixo médio (Metros)	Média dos eixos
<i>Elongness</i> (alongamento)*	$Elong. = \frac{\text{Comprimentado eixo menor}}{\text{Comprimentado eixo maior}}$
Centróides	Cálculo automático no ArcGIS©
Azimute (eixo maior)	Cálculo automático no ArcGIS©
<i>Compactness</i>	$Comp. = \frac{\text{Perímetro do círculo}}{\text{Perímetro do Polígono}} = \frac{2 \times \sqrt{\text{Polygon Area} \times \pi}}{P \text{ polygon}}$
Circularidade	$Circ. = \frac{4 \times \pi \times \text{área do polígono}}{\text{Perímetro}^2}$

Parâmetros por polígono	Descrição
Nº de Vértices	Cálculo não automático no ArcGIS®, foi criada uma rotina para obter a valência dos vértices. A sua descrição é extensa e não se enquadra no âmbito desta tese. A vizinhança foi facilmente obtida através da valência e do nº de polígonos.
Vértices Trivalentes	
Vértices Tetravalentes	
Vértices Pentavalentes	
% Vértices Trivalentes	
% Vértices Tetravalentes	
% Vértices Pentavalentes	
Nº de Vizinhos	
Número de faces por polígono	Uma face partilha dois vértices, o cálculo do número de faces por polígonos é feito no ArcGIS® através de algumas junções de tabelas e intercepções de temas.
Comprimento médio das faces por polígono	
STD do comprimento das faces por polígono	

* (Sonka, 1993) – a partir do mínimo rectângulo envolvente.

Tabela 7: Parâmetros medidos por rede, sumarizados através do tema dos polígonos digitalizados.

Agrupamento	Parâmetros medidos por rede
Parâmetros de forma	Área total das redes
	Nº de polígonos por rede
	Área (média, min., max., STD, variância)
	Perímetro (média,min.,max.,STD, variância)
	Eixo médio (média,min.,max.,STD, variância)
	Alongamento (média,min.,max.,STD, variância)
	Circularidade (média,min.,max.,STD, variância)
Parâmetros Topológicos (polígonos das redes sem 2 camadas exteriores)	Área total das redes
	Nº de polígonos por rede
	Nº de vértices por rede
	Média de vértices trivalentes
	Média de vértices tetravalentes
	Média de vértices pentavalentes
	% Média de vértices trivalentes
	% Média de vértices tetravalentes
	% Média de vértices pentavalentes
	Média do Nº de vizinhos por rede
	Rácio das médias de vértices tetra/trivalentes
Ratio Nº de vértices por rede/Nº de polígonos rede *	
Medidas de regularidade e densidade das redes	Densidade (Nº de Polígonos/Km ²)
	NNI aplicado aos centróides
	NNI aplicado aos vértices
	Densidade Kernel aplicada aos centróides
	Densidade Kernel aos vértices
	VMR aplicado aos vértices
	Variabilidade de 14 classes de áreas definidas para os polígonos
Parâmetros extraídos do MDT,	Altitude (média, intervalo, STD)

Agrupamento	Parâmetros medidos por rede
adquirido ao IPN (20m/pixel)	Declive (média, intervalo, STD)
	Orientação de encostas % (N, NE, E,SE,S,SW,W, NW)
	Distancia Euclidiana média às linhas de água de 1ª ordem (DELA1)
	Distancia Euclidiana média às linhas de água de 2ª ordem (DELA2)
	Distancia Euclidiana média às linhas de água de 3ª ordem (DELA3)
	Distancia Euclidiana média às linhas de água de 4ª ordem (DELA4)
	Curvatura (concauidade/convexidade) intensidade (média, STD)
	Curvatura intensidade (intervalo entre Max. e Min.)
	% de células convexas da curvatura
	% de células concavas da curvatura
	Intensidade média do valor das células convexas
	Intensidade média do valor das células concavas
	Geologia e Geomorfologia
% de ocupação de unidades geomorfológicas por rede	

Os parâmetros geométricos, topológicos e extraídos do MDT são apresentados nos pontos que se seguem. Os restantes parâmetros serão introduzidos posteriormente juntamente com alguns conceitos teóricos relacionados com os respectivos temas.

6.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E TOPOLÓGICOS

Dos parâmetros geométricos apresentam-se os principais, medidos para cada rede listada na Tabela 8. Uma forma de ilustrar as discrepâncias na distribuição das áreas é também representar a sua distribuição através de histogramas, pelo que foram escolhidas duas redes (81 e 94), que ocorrem sobre uma zona plana do vale, essencialmente em sedimentos não consolidados e na ordem dos 7 a 9 metros a.s.l. (Fig. 23). Em contraste com estas representa-se a distribuição das áreas dos polígonos de duas redes que ocorrem em vertentes, a 26 e a 42, com altitudes máximas de 120 e 175 metros, respectivamente (Fig. 24).

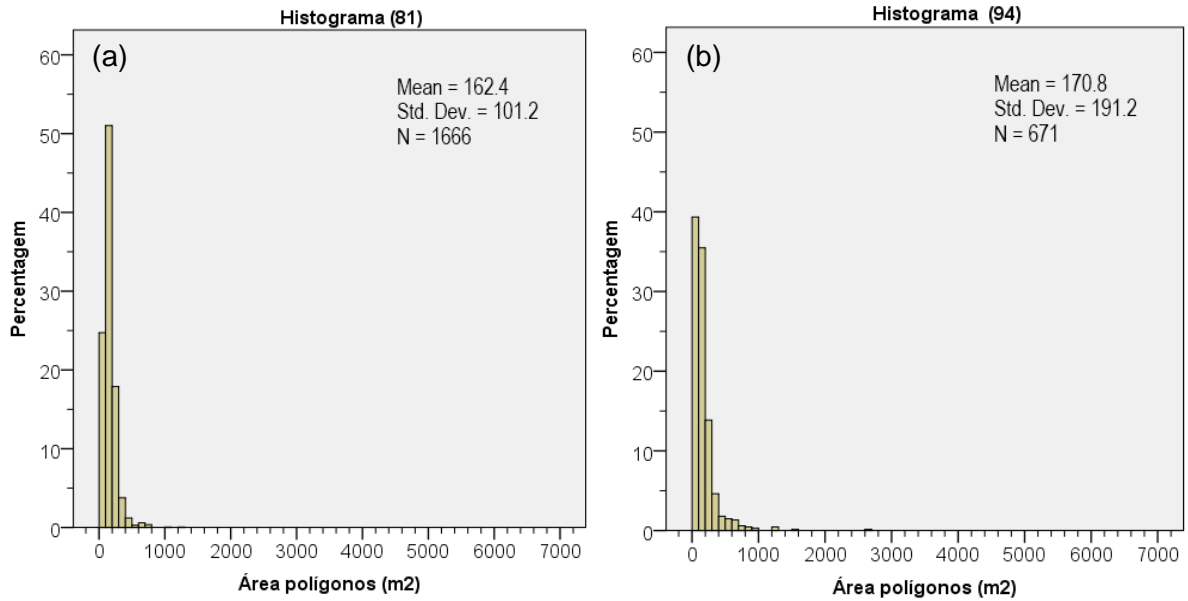


Figura 23: Histogramas de áreas dos polígonos, em redes que ocorrem em zonas planas, (a) rede 81, (b) rede 94.

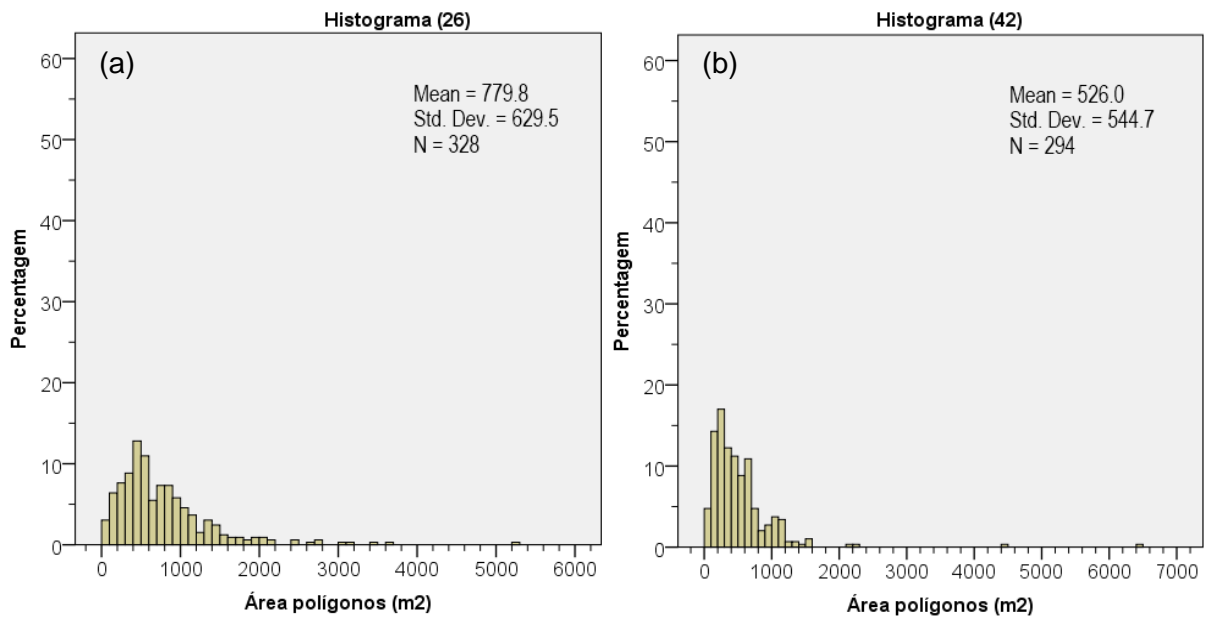


Figura 24: Histogramas de áreas dos polígonos, em redes que ocorrem em vertentes, (a) rede 26, (b) rede 42.

Tabela 8: Principais parâmetros geométricos de cada rede.

ID de Rede		0	1	15	26	27	30	40	42	46	47	55	81	83	93	94	102	115
Área total (m²)		264199	28882	178501	255784	99109	59782	112765	154645	139684	130645	129784	270529	49157	20572	114631	88612	87118
N. Polígonos		821	95	264	328	216	116	215	294	197	357	215	1666	262	95	671	253	161
Área (m ²)	Min.	15.8	43.6	29.1	43.2	10.6	28.0	34.6	26.5	46.7	13.7	53.0	9.1	23.3	41.4	10.2	27.9	17.2
	Max.	3145.9	1839.1	5636.9	5259.2	3110.6	17665.9	2026.6	6422.1	2796.6	4085.9	2346.8	1282.8	853.2	709.8	2611.4	1806.4	2283.4
	Média	321.8	304.0	676.1	779.8	458.8	515.4	524.5	526.0	709.1	366.0	603.6	162.4	187.6	216.5	170.8	350.2	541.1
	STD	285.1	285.7	774.1	629.5	360.3	1726.2	373.9	544.7	483.2	396.3	416.1	101.2	130.3	120.6	191.2	258.8	421.9
Eixo médio (m)	Min.	5.4	7.9	6.2	8.5	4.4	6.7	8.7	7.7	8.6	4.8	9.4	3.5	5.2	9.1	4.5	6.2	5.7
	Max.	71.6	54.0	95.7	100.9	67.9	163.0	58.7	99.2	67.1	83.0	59.8	46.6	36.7	31.8	65.0	50.8	63.6
	Média	20.3	19.9	28.8	32.3	24.4	21.5	26.6	25.8	31.0	21.0	28.1	14.7	15.6	17.1	14.5	21.7	26.7
	STD	8.0	8.6	14.6	12.6	9.2	17.3	9.6	10.5	10.7	10.2	9.9	4.3	5.3	4.6	6.6	7.5	10.3
Perímetro (m)	Min.	18.2	27.1	22.3	29.3	14.7	23.1	30.2	25.0	29.4	17.8	34.9	13.0	20.4	30.7	14.5	21.3	18.4
	Max.	249.6	188.7	326.7	348.1	225.6	549.0	195.2	359.9	233.3	320.1	197.6	156.9	121.1	107.3	220.6	171.5	211.3
	Média	70.0	68.8	98.1	109.2	83.3	73.1	90.5	88.2	106.3	72.1	96.0	51.2	54.6	59.7	50.1	73.8	91.0
	STD	27.2	29.8	50.1	43.3	30.8	58.1	33.1	36.8	36.6	35.3	33.6	14.7	17.9	15.9	22.6	25.6	34.9
Alongamento	Min.	0.31	0.31	0.28	0.30	0.35	0.25	0.29	0.33	0.21	0.25	0.28	0.19	0.24	0.32	0.28	0.37	0.30
	Max.	1.00	0.95	0.98	0.99	0.99	0.96	0.98	0.98	1.00	0.97	0.96	1.00	1.00	0.93	0.99	0.98	0.95
	Média	0.71	0.66	0.69	0.67	0.70	0.69	0.70	0.69	0.67	0.68	0.68	0.71	0.69	0.67	0.71	0.72	0.68
	STD	0.14	0.16	0.15	0.14	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14	0.15	0.14	0.15	0.16	0.14	0.14	0.14	0.13
Circularidade	Min.	0.41	0.45	0.31	0.39	0.46	0.39	0.40	0.47	0.39	0.27	0.41	0.23	0.37	0.47	0.41	0.39	0.46
	Max.	0.91	0.88	0.89	0.89	0.90	0.87	0.89	0.89	0.87	0.89	0.88	0.91	0.89	0.83	0.88	0.89	0.89
	Média	0.73	0.69	0.73	0.73	0.74	0.73	0.72	0.73	0.71	0.73	0.74	0.72	0.72	0.71	0.73	0.74	0.72
	STD	0.08	0.10	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.09	0.09

Cada barra ou classe tem uma dimensão ou *binning* de 100 m². Nas redes de zonas planas (81 e 94) a distribuição das áreas apresenta uma grande proporção abaixo dos 200 m², sendo que as próprias médias não ultrapassam este valor em ambos os casos. Nas redes de vertente (26 e 42) a distribuição das áreas é muito dispersa (mais assimétrica) e estas são consideravelmente maiores, com médias de 629.5 e 544.7 m², para a rede 26 e 42 respectivamente.

Em zonas planas do vale de Adventdalen há evidências da existência de cunhas activas (Matsuoka, 1999; Christiansen, 2005). Em zonas de vertente com declives mais acentuados, as condições de drenagem deverão estar mais facilitadas, podendo haver menos infiltração de água nas cunhas e menor desenvolvimento destas.

Tabela 9: Principais parâmetros topológicos de cada rede.

ID Rede	N. de Polígonos	N. de vizinhos			Vértices	Valencia		
		Média	Min.	Max.	Número	% Tri.	%Tetra.	% Penta.
0	433	6.73	4	14	822	74.94	24.57	0.49
1	25	6.64	5	9	58	70.69	29.31	---
15	43	6.02	4	8	134	88.06	11.94	---
26	108	6.29	3	10	265	88.68	11.32	---
27	56	6.27	4	9	147	84.35	15.65	---
30	35	6.66	5	9	70	64.29	35.71	---
40	69	6.13	4	10	168	88.69	11.31	---
42	146	6.44	4	11	303	84.82	14.19	0.99
46	58	6.53	3	11	141	83.69	15.6	0.71
47	77	6.27	4	9	201	82.59	17.41	---
55	40	6.18	3	8	108	85.19	14.81	---
81	1,132	6.98	3	12	1,875	68	31.57	0.43
83	44	6.75	4	10	97	63.92	34.02	2.06
93	21	6.62	5	9	46	69.57	30.43	---
94	415	6.78	3	11	737	75.98	24.02	---
102	108	6.25	3	9	249	89.16	10.84	---
115	37	6.03	4	11	100	89	11	---

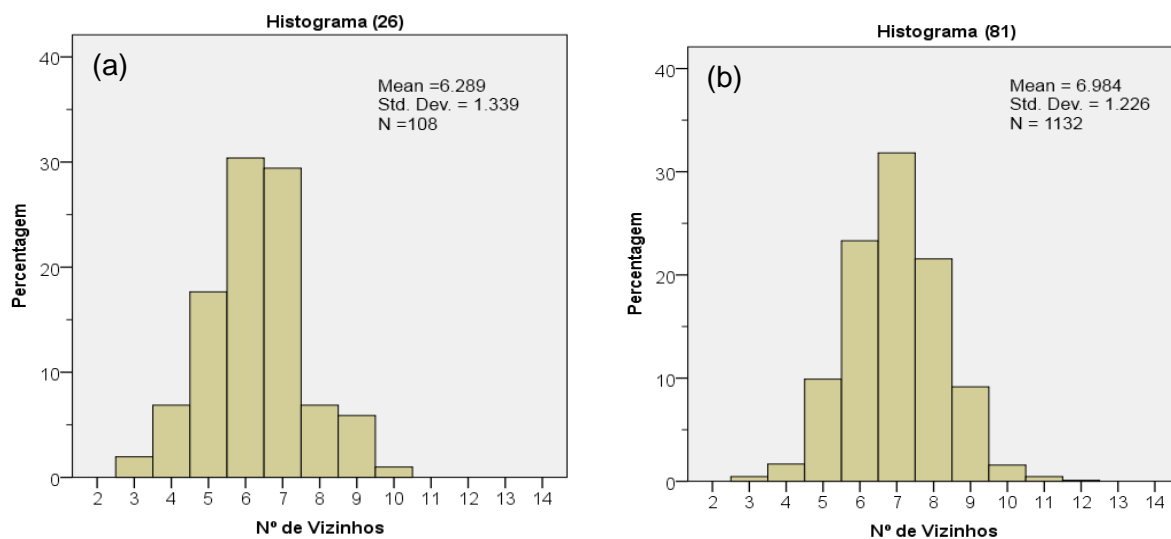


Figura 25: Histogramas do número de vizinhos dos polígonos (a) rede de vertente (26), (b) rede de zona plana (81).

O facto de o número de vizinhos ser maior na rede de zona plana é consequência de uma maior subdivisão dos polígonos, independentemente dos seus tamanhos. A rede 81 tem 32% de vértices tetravalentes, enquanto a rede 26 apenas apresenta 11% de vértices com esta valência. Uma exibe uma tendência com ligações maioritariamente hexagonais (a 26), enquanto a outra rede (a 81), na zona plana, apresenta mais ligações ortogonais e vértices tetravalentes que por sua vez aumentam a vizinhança média da rede (ver esquema da Fig. 26).

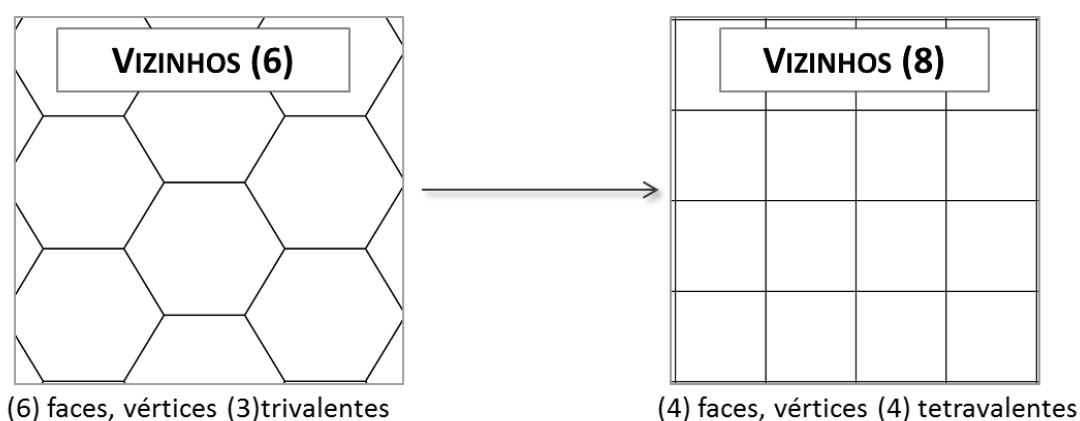


Figura 26: Exemplo de uma transição entre uma rede completamente hexagonal e uma rede completamente ortogonal, nesta última perde-se o contacto de uma face, contudo a valência dos vértices aumenta, aumentando também a vizinhança do polígono (quadrado).

6.2 PARÂMETROS DERIVADOS DO MDT

Tabela 10: Principais parâmetros extraídos do MDT para cada rede.

ID de Rede	Altitude (Metros)					Declive (Graus)					Orientação de encostas (%de área de ocupação)							
	Min	Max	Intervalo	Média	STD	Min	Max	Intervalo	Média	STD	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
0	15	28	13	18	2	0.1	4.0	3.9	0.8	0.7	0.2	0.0	0.8	4.3	12.0	41.9	30.6	10.2
1	9	11	2	10	1	0.1	2.2	2.1	0.7	0.4	3.9	3.4	6.9	6.3	20.0	28.9	22.2	8.5
15	66	77	11	72	2	0.1	4.2	4.1	1.5	0.8	6.0	0.8	0.4	2.3	12.3	34.9	25.4	18.0
26	79	120	41	92	8	0.1	9.7	9.6	2.5	1.4	0.2	0.2	0.3	1.1	30.9	58.1	8.8	0.5
27	99	114	15	106	4	0.3	5.4	5.2	2.0	0.7	1.9	0.0	0.4	0.1	4.8	27.0	50.9	14.8
30	80	96	16	91	4	0.4	10.8	10.4	3.8	2.3	19.6	0.0	0.0	0.0	0.0	20.9	44.4	15.0
40	102	117	14	111	3	0.3	8.7	8.4	2.0	1.2	0.3	0.3	0.0	0.0	1.5	82.2	14.7	1.0
42	132	175	43	156	9	0.4	12.2	11.7	4.6	2.0	1.2	0.8	1.4	27.0	58.1	6.8	3.0	1.7
46	113	169	56	143	15	3.6	10.9	7.2	6.7	1.5	1.0	0.0	0.0	0.0	17.6	32.2	16.6	32.5
47	126	160	33	146	8	1.1	20.6	19.5	5.1	3.3	1.6	0.0	0.0	10.1	44.3	17.4	4.4	22.3
55	122	184	63	151	16	4.7	14.8	10.1	7.1	1.5	88.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.9
81	7	10	3	8	0	0.0	3.0	3.0	0.3	0.4	16.4	10.8	7.9	10.0	7.0	14.5	17.2	16.1
83	6	8	2	7	0	0.1	1.8	1.8	0.6	0.4	16.0	2.6	0.8	1.5	12.2	22.4	23.9	20.6
93	6	7	1	7	0	0.0	0.8	0.8	0.4	0.2	13.7	16.1	5.8	3.5	17.4	2.4	3.3	37.7
94	9	23	14	13	3	0.0	5.1	5.0	1.4	1.0	36.2	20.1	7.1	4.4	1.0	3.1	8.6	19.5
102	11	16	5	14	1	0.1	5.5	5.5	1.0	0.9	29.3	46.4	19.2	3.2	0.0	0.0	0.0	2.0
115	86	121	35	101	9	4.6	10.1	5.5	6.8	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.3	4.7	0.0	0.0

Os parâmetros apresentados na tabela 10 são facilmente obtidos num SIG, neste caso através do ArcGIS Desktop®, sendo o declive e a orientação de encostas dados por imagens raster, que se derivam de forma automática a partir do MDT.

O relevo influencia a quantidade de radiação solar recebida na superfície, bem como a forma e quantidade da acumulação de neve. A orientação das encostas, por sua vez, também influencia a quantidade de radiação solar recebida, o que faz com que nesta região de *permafrost* contínuo a camada activa seja normalmente mais fina (isolamento da neve) nas vertentes viradas a norte (French, 2007).

Após a determinação das orientações ocupadas pelas redes, apenas para norte e sul, chegou-se à seguinte conclusão: 33% da área das redes é orientada a norte, enquanto 47% está orientada a sul. Confirmou-se que as vertentes na margem norte do rio Adventdelva (orientadas maioritariamente a sul) têm mais polígonos. Após esta constatação também foi feita a verificação, através de alguns perfis traçados no MDT, de que a margem norte tem maior relevo, isto é, os maiores picos estão situados na margem norte do rio, podendo a margem sul estar sujeita a receber menos radiação solar.

6.2.1. DISTÂNCIA EUCLIDIANA DAS REDES ÀS LINHAS DE ÁGUA

O cálculo da distância das redes às linhas de água de diferentes ordens é feito no sentido de posteriormente ser introduzido na regressão múltipla e perceber se existe alguma influência desta distância sobre a formação das redes, nomeadamente se existe maior influência na proximidade de linhas de água de ordens menores ou de ordens superiores. Isto porque é frequente este tipo de formações ocorrerem junto de planícies aluviais ou perto de corpos de água. O processo de cálculo da distância euclidiana das redes às linhas de água de diferentes ordens é aqui descrito de uma forma sucinta. É necessário dispor da rede de drenagem do vale, obtida a partir de ferramentas hidrológicas incorporadas no ArcGis® aplicadas ao MDT do vale, neste caso, o do IPN. Em primeiro lugar calcula-se a *flow direction* através do MDT, que cria uma imagem que indica a direcção do escoamento de cada célula em relação à sua vizinha, de acordo com o declive mais acentuado.

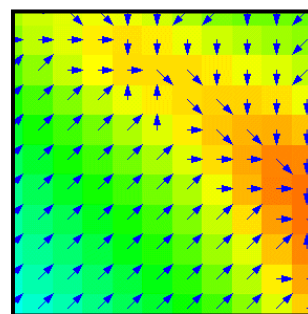


Figura 27: Grelha de “flow direction” (adaptado de Nelson, et al., 1997).

Normalmente os MDT têm *pits*, ou seja, pequenas zonas em que nenhuma das 8 células vizinhas na grelha do MDT tem uma elevação inferior, pelo que é necessário recorrer ao algoritmo *fill pits* (que suprime esse mínimo local, modificando o valor das células vizinhas até ocorrer uma mais baixa) antes de obter a *flow direction* (Garbrecht and Martz, 1995). Na figura 27 ilustra-se de uma forma genérica a direcção de escoamento de uma determinada superfície. O passo seguinte consiste em usar a superfície gerada pela *flow direction* como entrada para determinar a *flow accumulation*. O resultado deste passo é uma imagem do escoamento acumulado em cada célula, cujo atributo é determinado pelo peso de todas as células que para ela fluem. Nesta superfície consegue-se visualizar facilmente os diferentes pesos das linhas de água (Fig. 28). Finalmente, só com mais dois passos conclui-se este procedimento: marca-se primeiro a intersecção de todas as linhas de água “secundárias”, e extraem-se depois as linhas de água da superfície de *flow accumulation* em formato vectorial.

A partir do momento em que se dispõe da hierarquia das diferentes linhas de água é possível calcular a distância euclidiana de cada uma às redes.

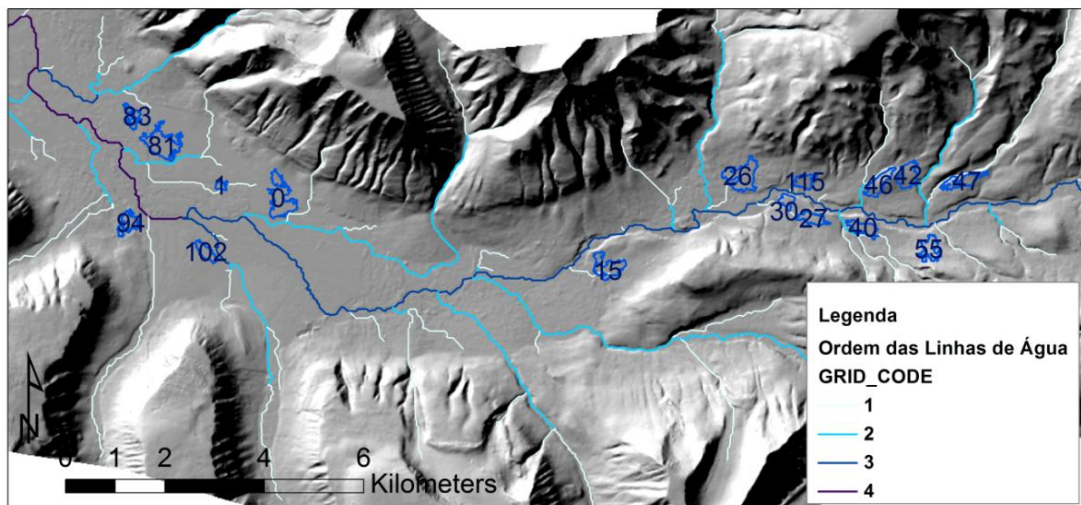


Figura 28: Hierarquia das principais linhas de água de Adventdalen, obtidas através do MDT do IPN, no Arcgis© 10.0, Hydrology Toolbox, sobrepostas ao MDT do INP, ilustrando também a localização das 17 redes.

6.2.3. CURVATURA (A 2ª DERIVADA DO MDT)

A curvatura é calculada célula a célula com base nas suas 8 vizinhas circundantes; o resultado da curvatura é a segunda derivada da superfície do MDT, ou seja é o grau de variação do declive. Um valor de curvatura positivo indica uma célula convexa, e um valor negativo indica uma célula com uma superfície côncava. Se os valores têm intensidades

diferentes então a curvatura é diferente de zero; já uma célula com o valor zero indica uma superfície perfeitamente plana (McCoy, 2004).

A análise da curvatura pode ser de extrema importância em termos de drenagem, (infiltração ou escoamento), apesar do MDT disponível ter uma resolução espacial de 20 metros, já que esta informação é extremamente pertinente quanto ao comportamento do escoamento em diferentes redes, não só por indicar concavidade ou convexidade no terreno mas também por determinar diferentes valores de intensidade para cada célula de 20 metros de lado. A informação calculada não diz apenas se uma célula é côncava ou convexa, diz também quão côncava ou convexa essa célula pode ser. Embora as médias por rede possam diluir o factor de análise local em relação aos polígonos de cada rede, a análise do desvio padrão desta intensidade, por rede, revela mais informação essencialmente nas vertentes onde a assimetria das redes é mais aparente.

Segundo French (2007) o movimento da água no *permafrost* é restringido pelo solo sazonalmente gelado; no entanto, o mesmo autor considera que esta presunção é apenas parcialmente verdadeira, uma vez que não é incomum a ocorrência de diversas zonas onde pode ocorrer infiltração de água para o subsolo.

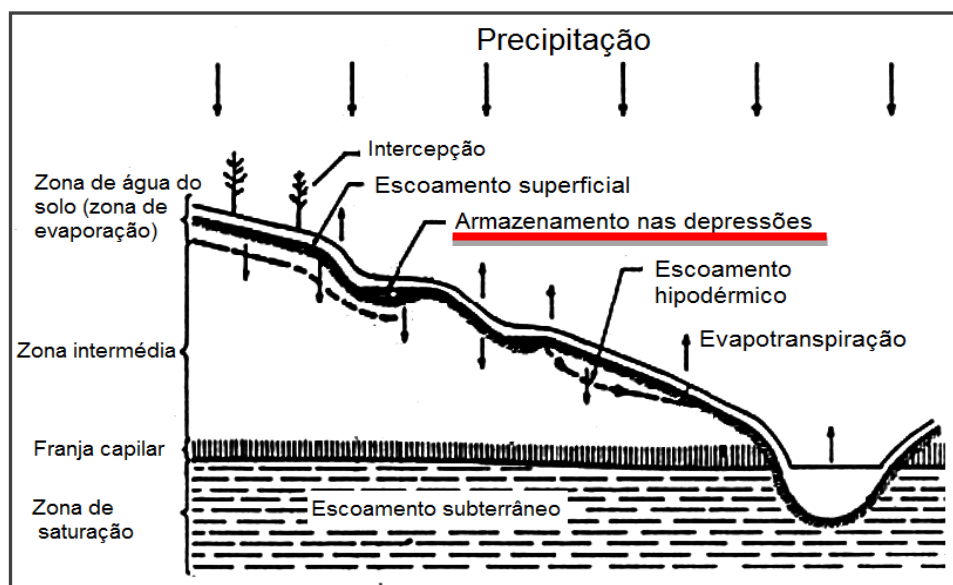


Figura 29: Processo de escoamento (adaptado de Quintela, 1992).

A precipitação sobre uma determinada área divide-se em várias parcelas, cuja proporção varia ao longo da duração do evento. No início, a água pode ser interceptada pela vegetação (não sendo este o caso em Adventdalen) ou por obstáculos que a impeçam de atingir o solo. Se a precipitação prossegue, a água atinge a superfície terrestre, de onde se evapora, se infiltra ou permanece retida em depressões (Quintela, 1992). Apresenta-se como exemplo para testar os resultados da curvatura relativamente à existência de uma

depressão a rede 47, representada na figura 30 sobre o MDT e com curvas de nível sobrepostas. A rede apresenta uma região (sinalizada pela elipse encarnada) com polígonos consideravelmente mais pequenos que os restantes e morfologias semelhantes às encontradas em redes que ocorrem nas zonas planas do vale. A maior parte desta rede é paralela ao sentido de maior declive do terreno (NE-SW), no entanto a região dentro da elipse inverte esse sentido e embora o próprio declive seja maior (curvas de nível mais juntas), esta zona com declive SE-NW encontra-se ladeada por regiões mais elevadas, fazendo uma depressão. Já no sentido NE-SW (o de maior declive na vertente) os polígonos desenvolvem-se lateralmente, sensivelmente no sentido do declive da vertente.

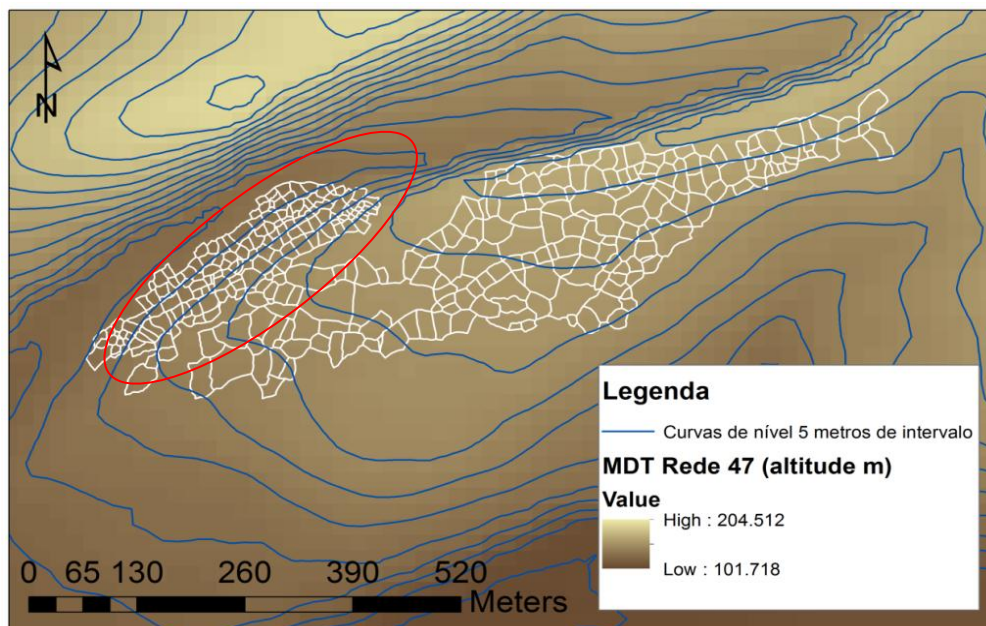


Figura 30: Rede 47, sobre o MDT proveniente do NPI com as curvas de nível, com uma depressão (elipse encarnada).

A rede 47, apesar de ser uma rede de vertente apresenta polígonos com uma morfologia e áreas (especialmente na zona da depressão) consideravelmente diferentes dos polígonos das restantes redes localizadas em vertentes. Geologicamente, a rede 47 encontra-se numa formação de materiais consolidados (ANEXO I) ao contrário do que sucede nas zonas planas, onde os depósitos essencialmente fluviais e fluvioglaciários constituem o material não consolidado. O exemplo desta rede deixa a suspeita de que se as condições de infiltração de água nas cunhas continuarem a ser intensas, mesmo em sedimentos consolidados, estas poderão continuar o seu desenvolvimento.

No sentido de testar o efeito local dos resultados da curvatura, foram desenhadas duas mascaras grosseiras sobre a rede de vertente (47), em duas zonas com polígonos de tamanhos distintos (zonas 1 e 2 na Fig. 31). A partir de cada uma destas máscaras foi calculada a curvatura média.

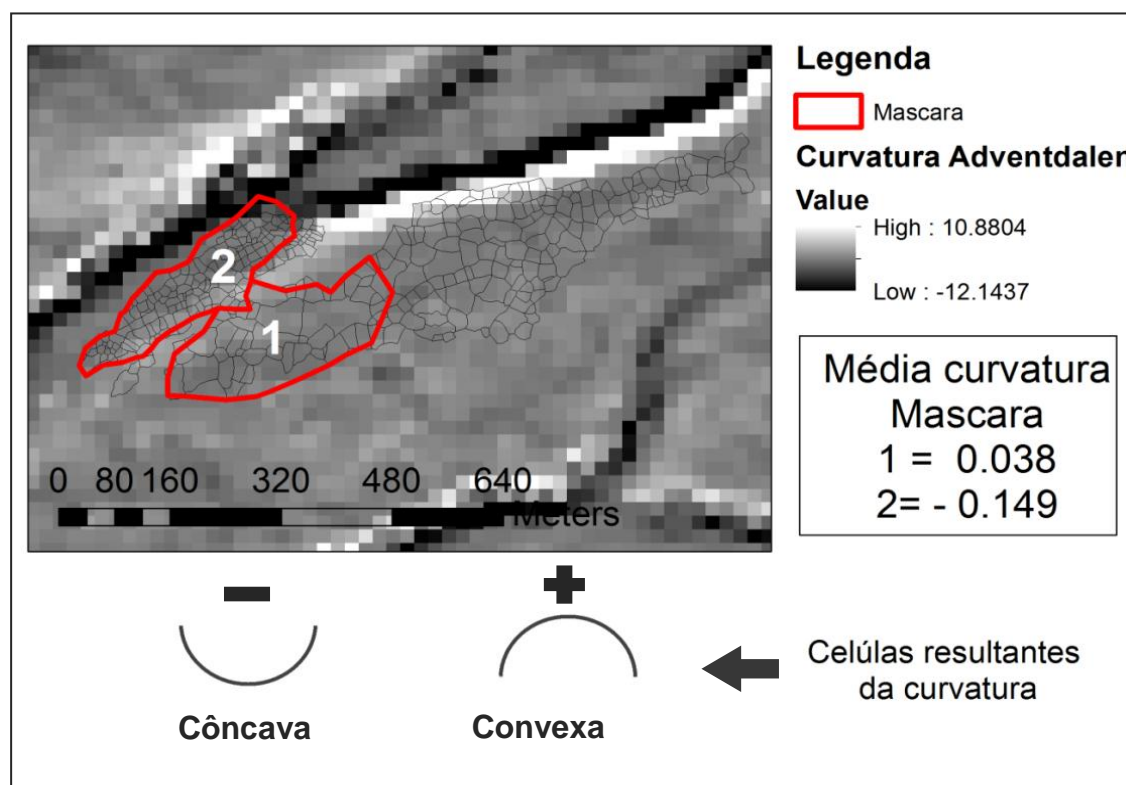


Figura 31: Mapa de curvatura em duas zonas de polígonos de tamanhos diferentes (máscara 1, polígonos maiores; máscara 2, polígonos menores) em que valores negativos indicam células côncavas e valores positivos em células convexas.

Os valores do mapa da curvatura na zona onde os polígonos são menores indicam que ali existe uma depressão (Máscara 2, células côncavas = valores negativos), o que pode ter permitido a continuação de uma subdivisão mais intensa do que nos polígonos vizinhos, onde as células maioritariamente convexas estão instaladas sobre terreno provavelmente bem drenado (Máscara 1, células convexas com valores positivos da curvatura). Desta forma, a zona 2 apresenta uma média de curvatura negativa, o que indica ser uma zona de maior acumulação ou infiltração de água, que irá contribuir para um crescimento assíncrono das cunhas nos dois locais desta mesma rede. Importa ainda referir que as máscaras se encontram sobre as mesmas unidades, tanto geológicas como geomorfológicas (ver localização nos ANEXOS I e II).

7. MEDIÇÃO DA REGULARIDADE DAS REDES

A análise estatística de informação espacialmente referenciada tem sido reconhecida como um importante componente de processamento de dados geográficos. Com a chegada dos SIG tem havido uma necessidade renovada de se desenvolverem métodos

estatísticos compatíveis que incorporem as suas metodologias (Brundson, 1995, Gatrell *et al.*, 1996).

Os métodos para analisar padrões espaciais têm sido utilizados numa variedade de disciplinas: ecologia animal, em comunidades de plantas, em florestas, entre muitos outros. Esta variedade de áreas de aplicação levou a alguma sobreposição de metodologias e filosofias (Getis, 1991; Dale *et al.* 2002; Perry *et al.* 2002). Recentemente, um método estatístico designado por análise de padrões pontuais ou SPPA (Statistical Point Pattern Analysis) (Illian *et al.*, 2008) foi introduzido como uma forma de observar variações qualitativas em terrenos poligonais, tanto na Terra como em Marte, a partir do estudo dos diferentes arranjos das intersecções das cunhas, ou seja, dos vértices (Haltigin *et al.* 2010).

7.1 ANÁLISE DE PADRÕES PONTUAIS

A distribuição de Poisson é fundamental na estatística de padrões pontuais. Há muitas situações em que uma distribuição de Poisson serve como um modelo de pontos “aleatoriamente” distribuídos no espaço mas, adicionalmente, pode ser utilizada como referência ou hipótese nula para modelos que exibam agregação ou dispersão (Illian *et al.*, 2008).

A hipótese de aleatoriedade completa para um padrão espacial de pontos, afirma que:

- (i) O número de eventos numa região planar (R) com área $|A|$ segue uma distribuição de Poisson com $\lambda |A|$ (eventos constantes ao longo da área) constante;
- (ii) dados n eventos X_i numa região A, que são uma amostra aleatória, independente de uma distribuição uniforme em A. A auto-coerência de (i) e (ii) não é imediatamente óbvia (Diggle, 2003). Um λ constante é a intensidade, ou número médio de eventos por área.

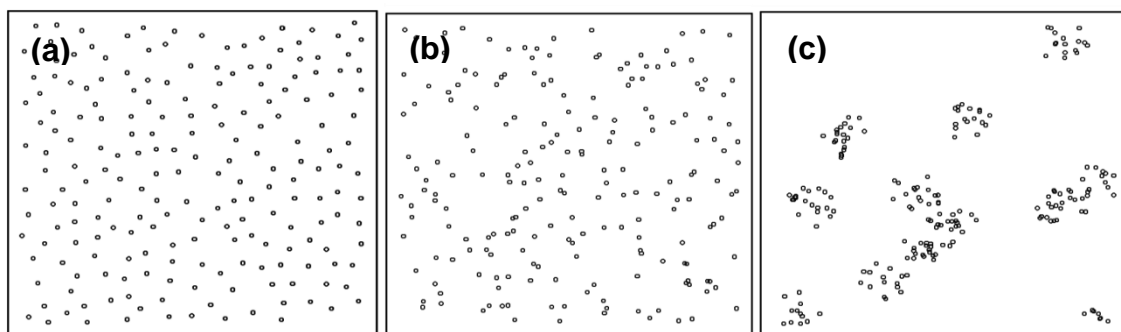


Figura 32: Padrões pontuais: (a) Disperso, (b) aleatório, (c) Agregado, (adaptado de Dorai-Raj, 2001).

Logo, a hipótese de aleatoriedade espacial completa ou CSR (*complete spatial randomness*) implica que a intensidade dos eventos não varia na área considerada, implicando também que não há interações entre eventos (Diggle, 2003).

De um ponto de vista estatístico, um padrão de pontos no espaço pode ser visto como a realização de um processo espacial estocástico. Matematicamente, pode ser expresso de várias formas sendo, por exemplo, uma forma útil de descrever eventos que ocorrem em sub-regiões de áreas A (as redes poligonais), pertencentes a uma região de estudo maior R (o vale de Adventdalen), de acordo com um conjunto de variáveis: $y(A)$, $A \in R$, onde $Y(A)$ é o número de eventos que ocorre na área A (Gatrell *et al.*, 1996).

Uma forma de útil de caracterizar o comportamento de processos espaciais estocásticos pode ser através das propriedades de primeira e segunda ordem. De uma forma muito genérica as propriedades de primeira ordem descrevem a forma como os valores esperados (média) do processo variam no espaço, enquanto as propriedades de segunda ordem descrevem a covariância (ou correlação) entre valores do processo em diferentes regiões no espaço (Gatrell *et al.*, 1996).

Podemos dizer que um processo é estacionário relativamente às propriedades de primeira ordem se a sua intensidade é constante em R , (ex: o número de vértices igual em todas as redes). Adicionalmente, em termos de propriedades de segunda ordem (pares de pontos), para o processo ser estacionário a valência dos vértices teria que ser igual.

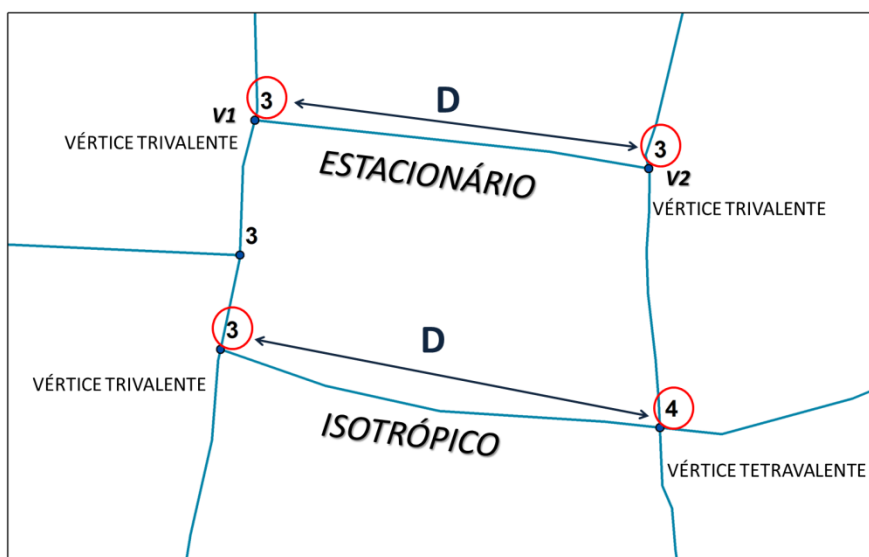


Figura 33: Exemplo de um processo estacionário (igual valência de vértices) e outro isotrópico (com diferentes intensidades entre pontos) relativamente a propriedades de segunda ordem.

Isto implica que a intensidade de propriedades de segunda ordem em processos estacionários depende apenas do vector entre pontos (distância e direcção) e não das

suas localizações absolutas. O processo é dito isotrópico se esta dependência é função apenas do comprimento do vector e não da sua orientação (Gatrell *et al.* 1996; Illian *et al.* 2008).

Para as redes em estudo foi calculada a intensidade λ segundo Diggle (2003), para propriedades de primeira ordem e, como expectável, esta não é igual ao longo de R, pelo que a hipótese de uma distribuição CSR é rejeitada. Importa agora perceber se a distribuição dos vértices tende para uma distribuição espacial de agregação ou de dispersão. Os gráficos na figura 34 ilustram a intensidade λ dos vértices em cada uma das 17 redes: à esquerda, em função da densidade das redes, à direita, em função das áreas médias dos polígonos das respectivas redes. A curva resultante deste último gráfico, é uma função inversa muito semelhante à que surge trocando o eixo da intensidade pela densidade kernel, ou mesmo pela densidade por km^2 (esta questão será abordada no ponto 7.1.3).

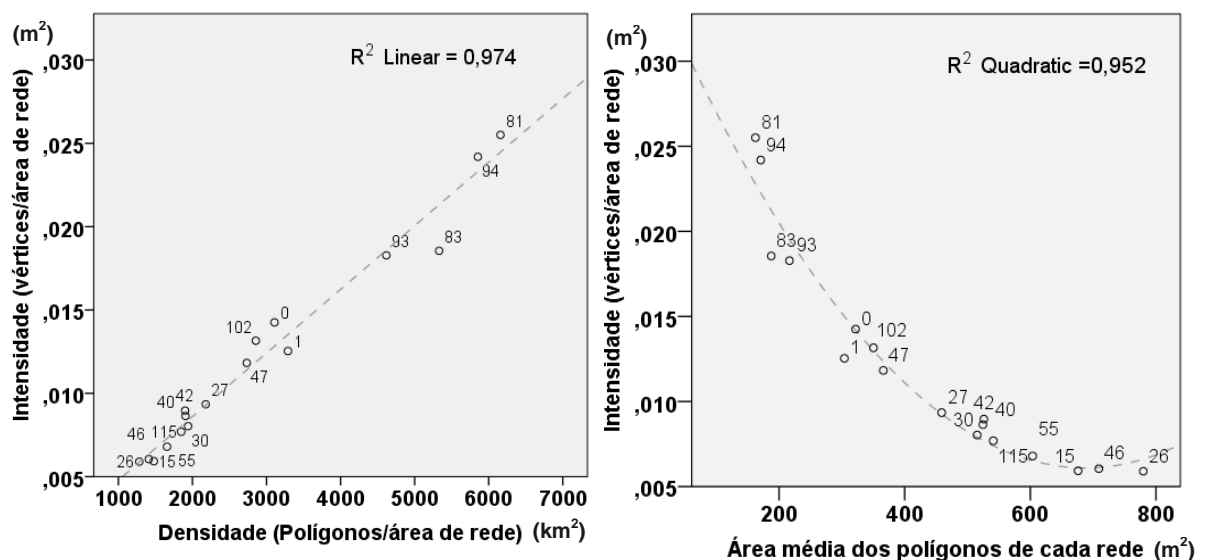


Figura 34: Gráfico de dispersão de pontos: (λ) intensidade dos vértices por área das redes (segundo Diggle, 2003): à esquerda, em função da densidade das redes (n° de polígonos por km^2); à direita, em função das áreas médias dos polígonos das respectivas redes.

7.1.1 ÍNDICE DE DISPERSÃO VMR

O método de análise de padrões pontuais mais simples, antigo e mais frequentemente citado em textos de ecologia é baseado em contagens de eventos ou indivíduos em unidades como quadrantes (Dale *et al.*, 2002) Neste método, a frequência da distribuição das contagens de eventos em subáreas (redes) não necessita da informação de x e y (Perry *et al.*, 2002). Das contagens de eventos por quadrículas podem ser derivadas

estatísticas para as subáreas (redes) como média, variância e rácio da variância com a média, conhecido como índice de dispersão ou VMR – Variance Mean Ratio (Fischer *et al.*, 1922)

O índice VMR pode ser representado pelo rácio (Dale *et al.*, 2002):

$$VMR = \frac{S^2}{\bar{X}} \quad (1)$$

Sendo (\bar{X}) a média de eventos (vértices) por quadrante numa subárea (rede), e a variância (S^2) do número de eventos por quadrante em cada rede calculada desta forma (Dale *et al.*, 2002):

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{N-1} \quad (2)$$

em que (x_i) é o número de vértices em cada quadrícula, e (N) o número de quadrículas em cada rede.

A área ideal das quadrículas de cada grelha não deve ser igual em todas as redes e depende da área de estudo (rede) bem como do número de casos (vértices), obedecendo à seguinte equação:

$$L = \sqrt{2 \cdot \frac{A}{n}} \quad (3)$$

em que (L) é comprimento do lado da quadrícula (A) na área de estudo e (n) o nº de vértices (Mitchell, 2005).

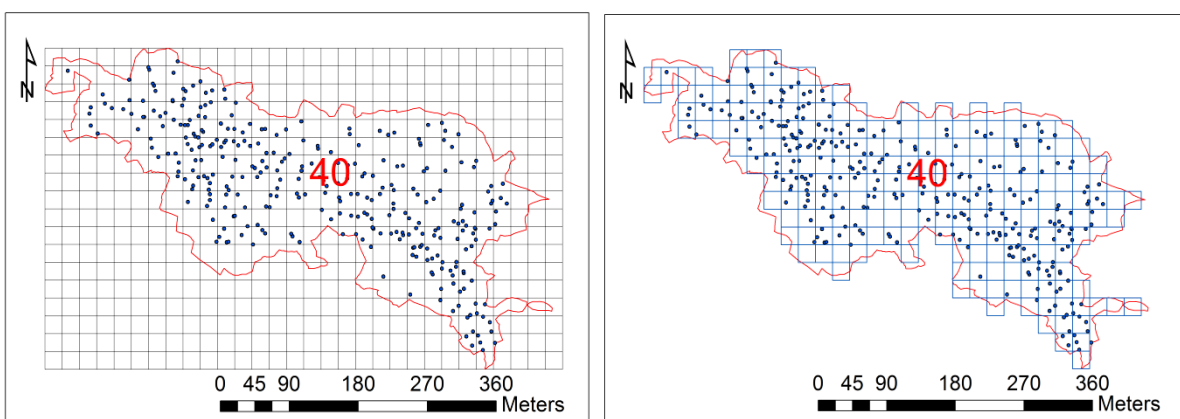


Figura 35: Quadrículas utilizadas para obter o índice de dispersão ou VMR, em que o tamanho da quadrícula seleccionada depende do número de eventos e da área de cada rede, tendo sido gerada uma grelha diferente para cada rede: à esquerda a grelha é inicialmente gerada para todo o enquadramento da rede, à direita eliminam-se as quadrículas que não estão dentro do limite da rede.

As grelhas foram geradas com recurso às ferramentas de *Geospatial Modelling Environment for Arcgis*© 10.0, versão GME 0.7.2.0 RC2 (GUI). A contagem dos vértices por quadrícula em cada uma das redes é efectuada de forma automática, obtendo-se também a média e a variância e, posteriormente, o índice de dispersão VMR.

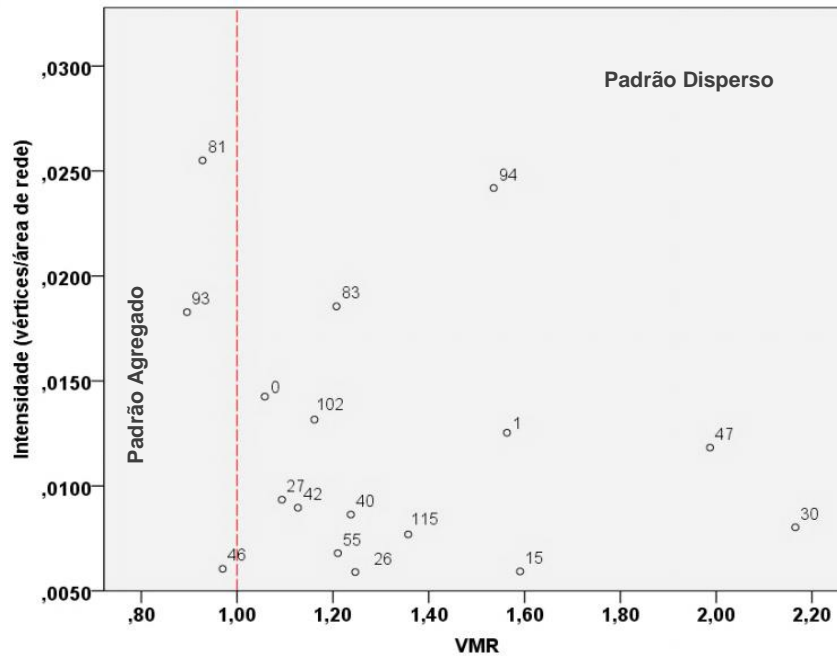


Figura 36: Gráfico do índice de dispersão VMR em função da intensidade (λ) dos vértices nas respectivas áreas das redes. A linha vermelha separa a dispersão da agregação.

Segundo este índice, as redes 81 e 93 apresentam um padrão agregado, ambas ocorrem numa zona plana, de sedimentos fluviais pré-recentes. As restantes redes são consideradas dispersas com diferentes intensidades. A rede 46, todavia, encontra-se demasiado perto de um VMR de valor 1, o que corresponde a uma distribuição aleatória. Tendo em conta que não foram feitos testes de significância para este padrão de distribuição, não é possível atribuir um intervalo de confiança, que assegure que esta rede tenha de facto um padrão agregado. Porém um teste estatístico de significância da dispersão será feito para o índice NNI, no ponto 7.1.2.

Tabela 11: Valores do índice de dispersão VMR para cada rede, número de vértices e área das quadrículas obtida segundo Mitchell (2005).

VMR = 1: Padrão aleatório (distribuição de Poisson)
VMR > 0 e < 1: Padrão agregado
VMR > 1: Padrão disperso

ID de Rede	Nº de vértices	Área quadrícula (m ²)	VMR
0	820	320	1.058
1	83	365	1.563
15	248	734	1.591
26	349	740	1.247
27	211	471	1.094
30	105	562	2.165
40	224	506	1.237
42	315	493	1.127
46	193	734	0.970
47	352	372	1.987
55	195	650	1.210
81	1453	185	0.928
83	198	250	1.207
93	80	250	0.895
94	597	190	1.536
102	262	331	1.161
115	155	571	1.357

7.1.2 ÍNDICE DE NNI

As distâncias entre vizinhos mais próximos, NND (*Nearest Neighbour Distance*), nem sempre são comutativas; tomemos o exemplo do ponto P com o ponto Q como vizinho mais próximo na figura 37. PQ seria portanto a distância associada a P, no entanto o vizinho mais próximo de Q, não é P (Perry *et al.*, 2002).

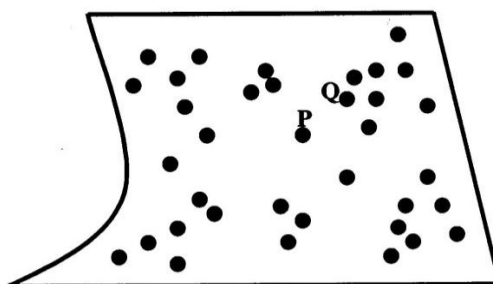


Figura 37: Exemplo de distância de entre vizinhos mais próximos, não comutativa. (Adaptado de Perry *et al.*, 2002).

No cálculo do índice NNI através do *Arcgis*® 10.0, calcula-se a distância entre cada ponto e o seu vizinho mais próximo e depois a média destas distâncias. O NNI mede a similaridade da distância média observada com a distância média de uma distribuição aleatória hipotética (Mitchell 2005).

Para obter a distância entre cada ponto ao vizinho mais próximo calcula-se a distância de cada ponto a todos os outros na área considerada, e depois procura-se o mínimo da distância mais próxima.

A soma da distância entre pares de vizinhos mais próximos, dividida pelo número de pontos no conjunto considerado, permite obter a distância média:

$$\bar{d}_o = \frac{\sum_i C_i}{n} \quad (4)$$

sendo, \bar{d}_o , a distância média para distribuição observada dos pontos, C_i a distância de cada ponto ao seu vizinho e n é o número de pontos.

Usando a equação (4), a distância média para uma distribuição completamente agregada é zero (todos os pontos estão no mesmo local, pelo que as distâncias NND são zero). Para uma distribuição completamente dispersa a distância média é o inverso da raiz quadrada do número de pontos dividido pela área de estudo (Mitchell 2005):

$$\bar{d}_e = \frac{1}{\sqrt{n/A}} \quad (5)$$

sendo, \bar{d}_e , a distância média esperada para uma distribuição completamente dispersa, n , o número de pontos e A , a área de estudo.

A distância média para uma distribuição aleatória situa-se a meio dos valores de uma distribuição completamente agregada (distância igual a 0) e uma completamente dispersa (distância igual a 1). Assim, o numerador na divisão com a raiz quadrada do número de pontos sobre a área, deve ser 0.5 e não 1.

$$\bar{d}_e = \frac{0.5}{\sqrt{n/A}} \quad (6)$$

Em seguida descreve-se a forma de se calcular o valor do índice NNI.

Se a distância média dos pontos em questão é menor que a distância média de uma distribuição aleatória, pode-se concluir que a distância observada é mais agregada do que aleatória. Se a distância é maior, então a distribuição é mais dispersa.

Para calcular o índice NNI subtrai-se a distância média esperada à distância média observada (Mitchell 2005), sendo representado por d :

$$d = \bar{d}_o - \bar{d}_e \quad (7)$$

e tendo o seguinte significado:

- Se as médias observadas e esperadas são iguais, a diferença é 0 e a distribuição é aleatória.
- Se a média esperada é maior que a média observada, a diferença é menor que 0 e a distribuição observada é agregada.
- Se a média esperada é menor que a média observada, a diferença é maior que 0, e a distribuição observada é dispersa.

Uma forma alternativa de representar o índice é calcular o rácio entre as duas distâncias médias (Mitchell 2005), sendo o índice NNI representado por r :

$$r = \frac{\bar{d}_o}{\bar{d}_e} \quad (8)$$

cujo significado é o seguinte:

- Se as médias são as mesmas, o rácio é 1 e a distribuição observada pode ser considerada aleatória.
- Se a média esperada é maior que a observada, o rácio é menor que 1 e a distribuição observada é agregada. Quanto mais perto de 0, mais agregado é o padrão.
- Se a média esperada é menor que a média observada, o rácio é maior que 1 e a distribuição observada é dispersa.

O índice foi calculado para a distribuição dos vértices como pontos e dos centróides dos polígonos como pontos, primeiro porque o resultado da distribuição dos vértices é sempre agregado, segundo porque era importante perceber a distribuição dos próprios polígonos em termos de áreas. Haltingin *et al.* (2010) afirmam que a distância (NND) entre dois vértices pode ser utilizada como um *proxy* para obter o comprimento das faces dos polígonos. Um *proxy* deixa um largo espectro em aberto; o comprimento das faces foi uma medida calculada neste trabalho e pode ser facilmente obtida num SIG. No entanto, é preciso ter algum cuidado nesta interpretação, pois nem sempre o vizinho mais próximo representa a ligação entre cunhas, especialmente em polígonos alongados. A figura 38 ilustra um exemplo prático em Adventdalen, onde o vizinho mais próximo de um determinado ponto não é unido a este por uma aresta. Nesta situação, não se pode deixar de pôr a hipótese de existir uma cunha que ligue estes dois vértices mas que simplesmente não é visível na imagem.

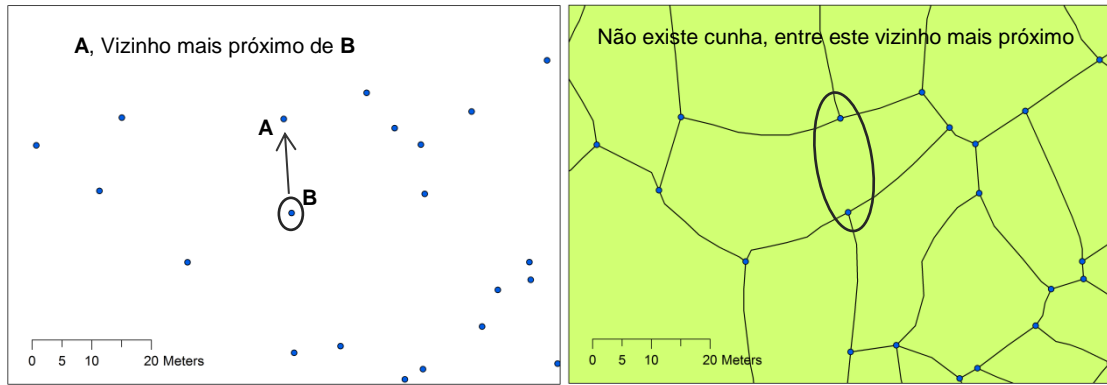


Figura 38: Exemplo de um polígono alongado em que o vizinho mais próximo de um vértice não tem uma cunha de gelo a fazer ligação entre os dois vértices; à esquerda só são visíveis os vértices, à direita os vértices estão sobrepostos aos polígonos identificados na imagem de DR.

Para testar os resultados do NNI, a hipótese nula é que os pontos são aleatoriamente distribuídos. Uma distribuição aleatória é neste caso uma distribuição normal das distâncias dos vizinhos mais próximos. Para decidir se rejeitamos a hipótese nula e concluir que há um padrão que não é aleatório, calcula-se o índice-Z ou (Z-Score), que permite concluir se existe um padrão que não é aleatório. O teste do índice-Z divide a diferença dos valores observados e esperados pelo erro padrão SE :

$$Z = \frac{\bar{d}_o - \bar{d}_e}{SE} \quad (9)$$

Tabela 12: Índice dos vizinhos mais próximos NNI, calculado para os padrões pontuais dos vértices e dos centróides dos polígonos.

ID Rede	NNI Vértices					NNI Centróides				
	\bar{d}_o	\bar{d}_e	NNI R	Índice-Z	Valor-P	\bar{d}_o	\bar{d}_e	NNI R	Índice-Z	Valor-P
0	7.8	10.3	0.755	-16.05	0	13.8	28.4	0.487	-28.1	0
1	6.9	7.6	0.907	-1.96	0.05021	12.7	27.6	0.46	-10.07	0
15	10.3	14.0	0.734	-9.82	0	19.1	41.1	0.464	-16.66	0
26	10.8	14.9	0.723	-11.73	0	21.1	44.2	0.476	-18.12	0
27	8.6	10.8	0.792	-6.96	0	16.5	33.9	0.488	-14.39	0
30	7.9	9.5	0.830	-3.99	0.00006	14.0	35.9	0.389	-12.57	0
40	8.9	11.2	0.794	-7.00	0	17.8	36.2	0.49	-14.27	0
42	9.1	11.0	0.829	-6.89	0	17.0	36.3	0.469	-17.4	0
46	10.7	13.3	0.806	-6.10	0	20.2	42.1	0.478	-14	0
47	7.5	10.6	0.706	-12.51	0	14.2	30.3	0.469	-19.18	0
55	9.9	12.6	0.787	-6.84	0	19.2	38.9	0.493	-14.2	0

ID Rede	NNI Vértices					NNI Centróides				
	\bar{d}_o	\bar{d}_e	NNI R	Índice-Z	Valor-P	\bar{d}_o	\bar{d}_e	NNI R	Índice-Z	Valor-P
81	5.7	7.1	0.802	-18.20	0	9.9	6.4	1.554	43.32	0
83	6.7	8.4	0.794	-6.77	0	10.7	21.7	0.492	-15.72	0
93	6.6	7.2	0.915	-1.76	0.07876	11.2	7.4	1.528	9.85	0
94	5.1	6.8	0.750	-15.01	0	9.5	20.6	0.459	-26.83	0
102	7.0	8.6	0.815	-7.02	0	14.6	29.6	0.494	-15.39	0
115	9.0	11.5	0.785	-6.05	0	17.4	36.8	0.473	-12.79	0

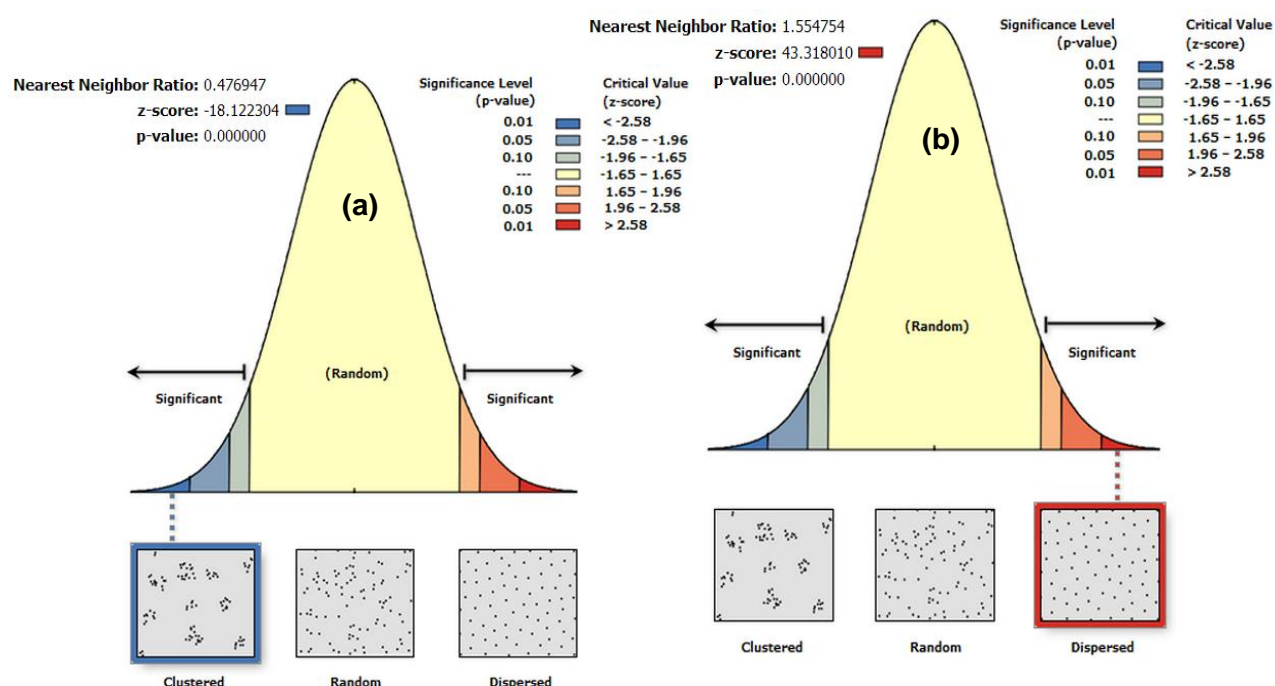


Figura 39: Gráficos de significância no cálculo do NNI, para os centróides das redes 26 e 81 (formato Arcgis© 10.0): (a) A rede 26 com um índice-Z de -18.12 tem menos de 1% de probabilidade de este padrão agregado ser resultado de um processo aleatório; (b) A rede 81 com um índice-Z de 43.32 tem menos de 1% de probabilidade de este padrão disperso ser resultado de um processo aleatório.

Formalmente, se s representa o vector local em algum ponto do espaço de R e s_1, \dots, s_n , são os vectores locais de n eventos observados, então a intensidade $\lambda(s)$ em s é estimada como:

$$\hat{\lambda}_t(s) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{t^2} k\left(\frac{s-s_i}{t}\right) \quad (10)$$

Onde $K(\)$ representa a função de peso kernel que, por conveniência, está expressa na forma padrão, isto é, centrada na origem e tendo um volume total de 1 abaixo da curva, centrado em S e “esticado” de acordo com o parâmetro $t > 0$, referido como *bandwidth*. O valor de t é escolhido de acordo com o grau de suavização que se pretende obter na superfície estimada (Gatrell *et al.*, 1996). O valor de t , raio ou *bandwidth*, é um valor-chave no resultado da superfície estimada, pois controla a variância da densidade da função K (Brundson, 1995). Valores exagerados de t vão levar a que K tenha uma grande variância, enquanto valores demasiado pequenos têm o efeito oposto. As implicações são: para um t inaceitavelmente grande, a função estimada torna-se não descritiva e não responde às mudanças de densidade observadas; já para um t inaceitavelmente pequeno, o efeito é o oposto e a função vai aparecer apenas com uma série de picos centrados nos dados observados (Brundson, 1995).

A densidade kernel foi estimada no *Arcgis*® 10.0, a partir de diferentes padrões pontuais, isto é, a partir dos vértices e centróides dos polígonos. Para os centróides foram também utilizados diferentes raios de procura para a função kernel. O SIG calcula uma superfície de probabilidade da distribuição de dados (geralmente na forma de pontos) e usa uma máscara circular de procura que aplica a cada célula da imagem (McCoy J., 2004).

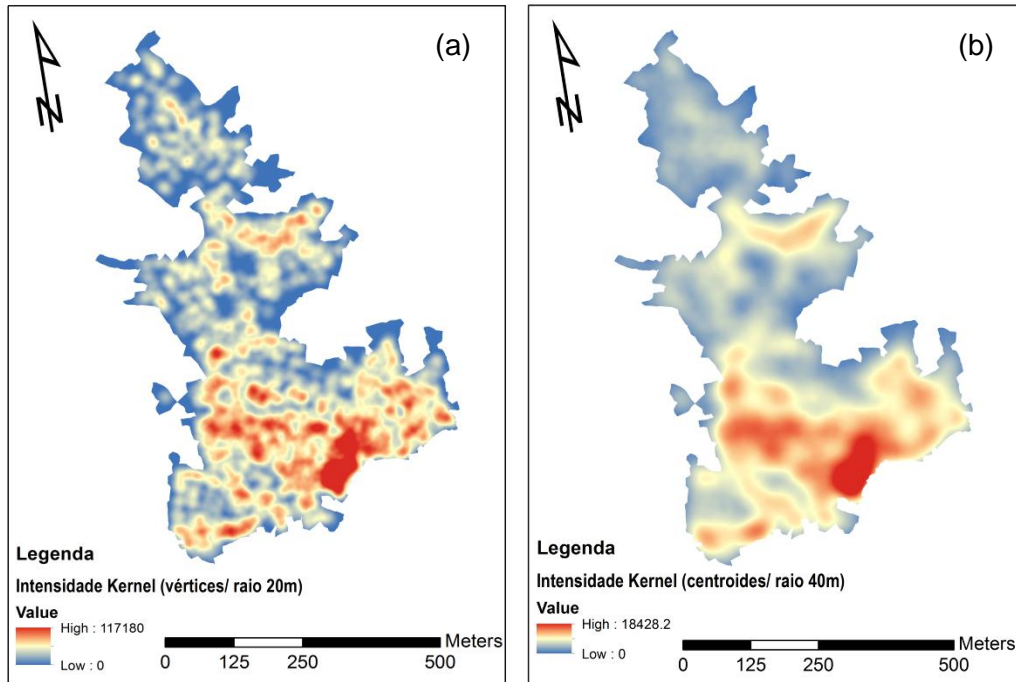


Figura 42: Superfície da estimação de intensidade kernel na rede 0. (a) Estimação feita a partir dos vértices dos polígonos com um raio de procura de 20 metros, (b) Estimação feita a partir dos centróides dos polígonos com um raio de procura de 40 metros.

Para a estimação kernel a partir dos vértices, foi utilizado um raio de 20 metros, para a estimação kernel a partir dos centróides foram utilizados 3 raios: 40 metros, 22 metros (por ser a média do eixo médio de todos os polígonos) e um valor intermédio entre os 40 e os 22 (31 metros). Destes 3 raios, a superfície kernel estimada para os centróides com um raio de 40 metros mostrou ter melhor correlação, tanto com a intensidade dos vértices como com a densidade dos polígonos. Embora as diferenças entre a intensidade kernel estimada a partir dos vértices e a intensidade kernel estimada a partir dos centróides pareçam ser consideráveis (Fig. 42), vai haver uma diluição pela média, destacando-se apenas as diferenças entre redes.

Tabela 13: Correlações de Pearson, entre as diferentes estimações de densidades kernel (diferente raio e diferente fonte de padrão pontual), com a densidade dos polígonos e a intensidade dos vértices.

Correlações de Pearson*	Densidade (polígonos/km ²)	Vértices	Centróides			Intensidade λ (vértices/área m ²)
		Kernel (20m)	Kernel (40m)	Kernel (22m)	Kernel (31m)	
Densidade (polígonos/km ²)	1,000	0,978	0,991	0,930	0,918	0,987
Kernel Vértices (20m)	0,978	1,000	0,996	0,940	0,946	0,995
Kernel Centróides (40)	0,991	0,996	1,000	0,939	0,936	0,996
Kernel Centróides (22)	0,930	0,940	0,939	1,000	0,993	0,930
Kernel Centróides (31)	0,918	0,946	0,936	,993	1,000	0,933
Intensidade λ (vértices/área m ²)	0,987	0,995	0,996	0,930	0,933	1,000

*Sig. (1-tailed) =0,000 para todos as 17 redes.

A partir dos dados da tabela 13 e das correlações das diferentes estimativas de intensidade kernel com a densidade (polígonos) e intensidade (vértices) pode-se avaliar a melhor estimativa de intensidade kernel calculada.

A estimativa da densidade kernel a partir dos centróides deveria idealmente ter uma correlação melhor com a densidade dos polígonos; por outro lado, a partir dos vértices deveria ter correlação melhor com a intensidade dos vértices por área. Sintetizando as principais correlações por ordem decrescente, é a superfície obtida a partir dos centróides com um raio de 40 metros que apresenta o melhor resultado:

- i. I. Kernel Centróides (40m) [Corr. Pearson], Intensidade dos vértices = **0.996**
- ii. I. Kernel Vértices (20m) [Corr. Pearson], Intensidade dos vértices = **0.995**
- iii. I. Kernel Centróides (40m) [Corr. Pearson], Densidade dos polígonos = **0.991**
- iv. I. Kernel Vértices (20m) [Corr. Pearson], Densidade dos polígonos = **0.978**

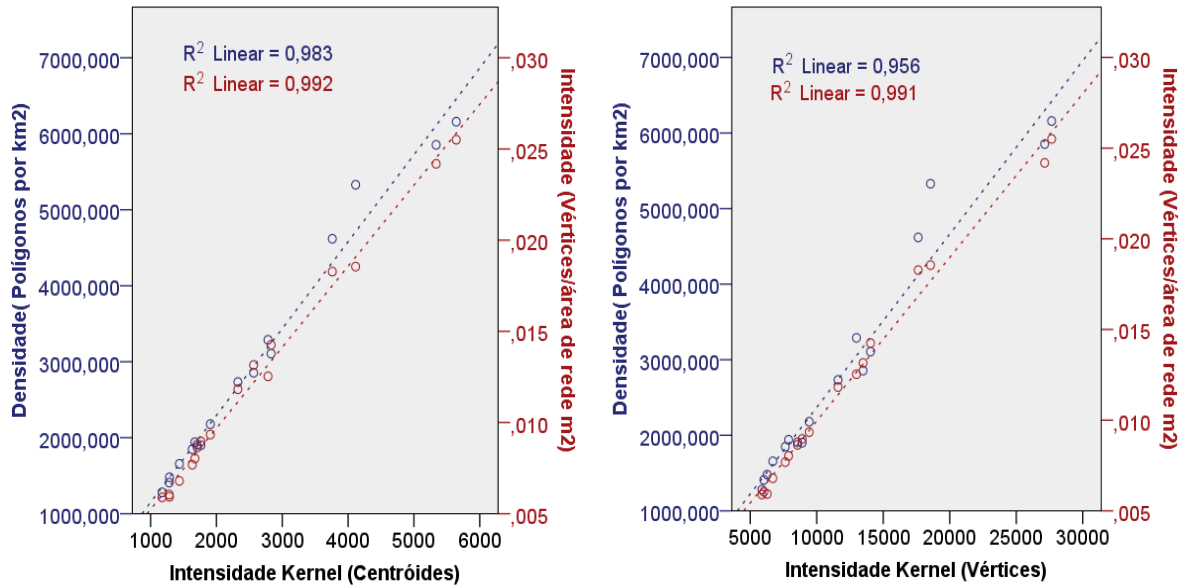


Figura 43: Gráficos da intensidade kernel em função da densidade dos polígonos e da intensidade dos vértices. À esquerda a intensidade kernel é calculada a partir dos centróides dos polígonos, à direita a partir dos vértices.

Por outro lado, foi efectuado um ajuste linear entre os quatro parâmetros anteriores, e embora a estimativa Kernel a partir dos centróides com um de raio de 40 metros continue a ter melhores resultados em função da densidade dos polígonos e também da intensidade dos vértices, a ordem dos valores de ajuste linear (R^2) é ligeiramente diferente. Mais uma vez, sintetizando os ajustes de R^2 por ordem decrescente, obteve-se:

- i. I. Kernel Centróides (40m) [R^2] em função de: Intensidade dos vértices = **0.992**
- ii. I. Kernel Vértices (20m) [R^2] em função de: Intensidade dos vértices = **0.991**
- iii. I. Kernel Centróides (40m) [R^2] em função de: Densidade dos polígonos = **0.983**
- iv. I. Kernel Vértices (20m) [R^2] em função de: Densidade dos polígonos = **0.956**

7.2 ASSIMETRIA ATRAVÉS DA VARIEDADE DE CLASSES DE ÁREAS DE POLÍGONOS

O propósito de estudar as redes através da técnica de padrões pontuais, é de perceber se a distribuição espacial do desenho das redes, que claramente não é igual ao longo do vale, permite eventualmente associar diferenças nestes padrões a causas no terreno ou outras características de índole geológica ou geomorfológica. Contudo, as metodologias aplicadas até agora têm sido as mais elementares e pouco dizem concretamente em relação à simetria ou assimetria, ou seja, em relação à variedade das áreas de polígonos adjacentes, limitando-se a classificar redes em agregadas ou dispersas.

Para este procedimento é necessário calcular a variedade de uma determinada propriedade dos polígonos numa determinada vizinhança (análise local).

A variedade é muito utilizada em ecologia, tanto em ocupação de solo, como em biodiversidade para obter a variedade de espécies, ou mesmo, identificar locais sem variedade (McCoy, 2004). Para o caso das áreas dos polígonos, a variedade de áreas vai ser baixa se os polígonos adjacentes pertencerem à mesma classe de tamanho, e será elevada na situação oposta.

Neste caso de Adventdalen foram utilizadas as áreas, divididas em 14 classes de tamanho. Admite-se que este número de classes é adequado, visto proporcionar elevadas correlações com outros parâmetros, como será demonstrado em seguida, ainda neste capítulo.

A separação das áreas nas 14 classes foi obtida através da técnica *Jenks natural breaks*, que identifica os pontos de quebra, escolhendo os intervalos de classes que melhor agrupam valores semelhantes e maximizam as diferenças entre classes. Os polígonos são assim divididos em classes de tamanho em que as fronteiras são colocadas onde há interrupções relativamente grandes nos valores dos dados (McCoy, 2004).

Esta otimização determina o melhor arranjo de valores entre classes, através de iterações que comparam a diferença da soma dos quadrados entre os valores observados dentro de cada classe. A melhor separação identifica as quebras (*breaks*) na ordem da distribuição de valores que minimiza a diferença da soma dos quadrados dentro de cada classe, ou seja minimiza o desvio de cada classe da sua própria média, enquanto maximiza o desvio das médias das outras classes, reduzindo assim a variância dentro das classes e maximizando-a entre classes (Jenks, 1967).

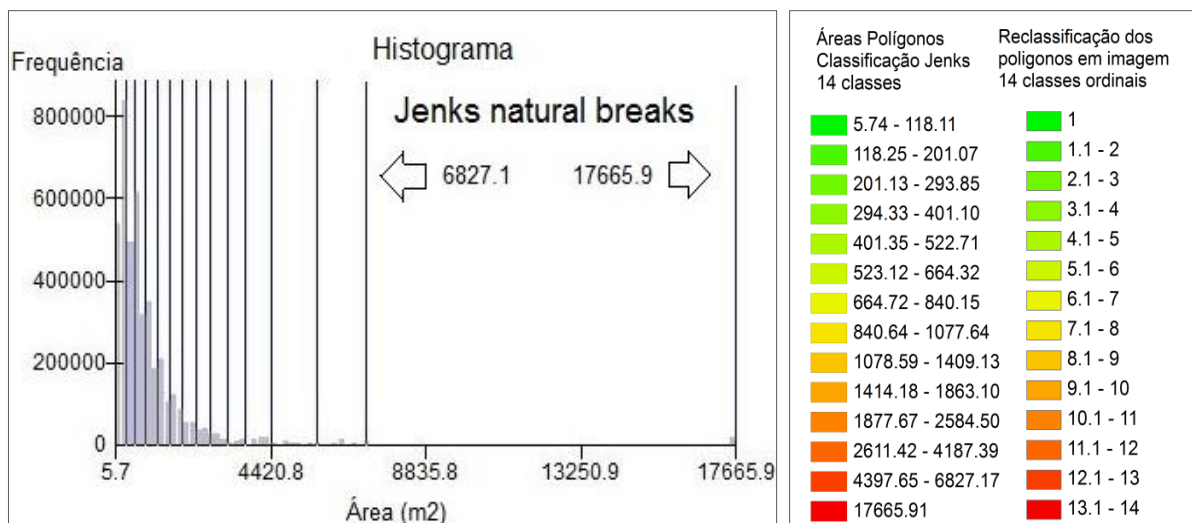


Figura 44: Natural breaks de Jenks aplicados às áreas dos polígonos, à esquerda histograma da classificação no Arcgis© 10.0 (Natural breaks de Jenks indicados por barras verticais posicionadas no eixo do X), à direita valores dos intervalos de cada classe em metros, que passaram, através de uma reclassificação, para uma escala de 1 a 14.

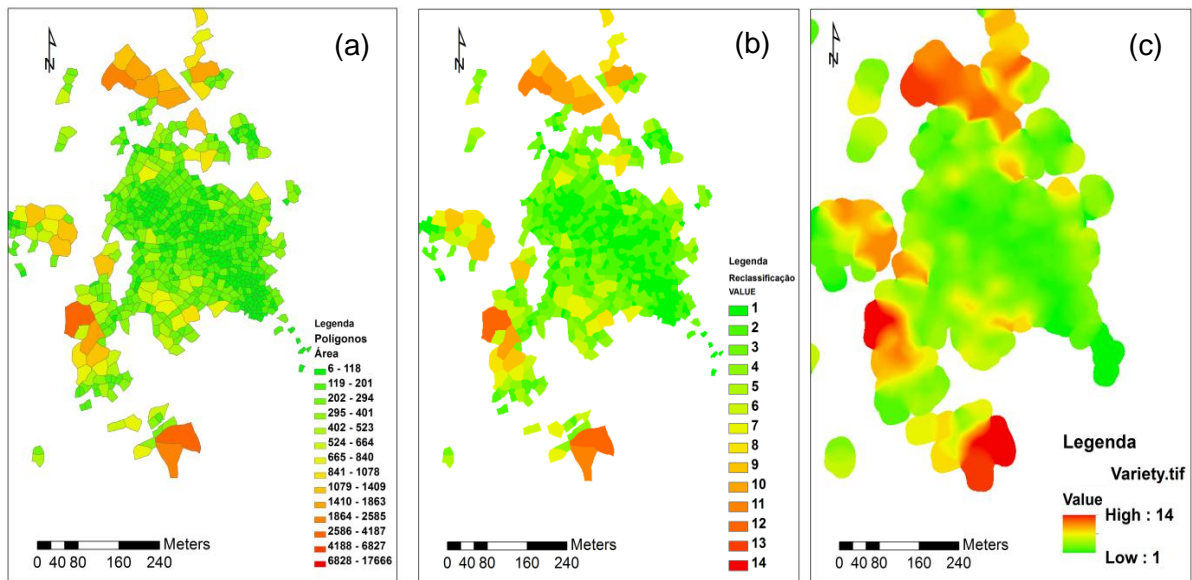


Figura 45: (a) Polígonos com classificação das áreas em 14 classes segundo a optimização de Jenks (b) imagem transformada dos polígonos vectoriais e reclassificada para 14 classes, numeradas de 1 a 14 com ordem crescente de tamanhos (c) Mapa de variedades das classes de áreas.

O *input* neste procedimento (variedade aplicada às áreas dos polígonos), implica que cada polígono tem o mesmo valor em toda a sua superfície, independentemente do tamanho das células ou pixels da imagem, ou seja, se o seu vizinho pertencer à mesma classe de área determinada pelos intervalos de Jenks, os dois vão ter a mesma cor no mapa final de variedades (Fig.45c).

Finalmente, para cada rede ser tratada como uma entidade, efectua-se o mesmo procedimento na construção dos outros mapas (declive, curvatura, etc.), aplicando-se uma estatística de zona ao tema (redes) para obter a média e outras estatísticas. Note-se que todas as redes representadas por pontos nos gráficos são representativas do tema redes (Fig. 22), que se referem sempre aos seus valores médios para os dados em questão. O procedimento para a reprodução deste mapeamento de variedades encontra-se descrito de uma forma esquemática no ANEXO IV.

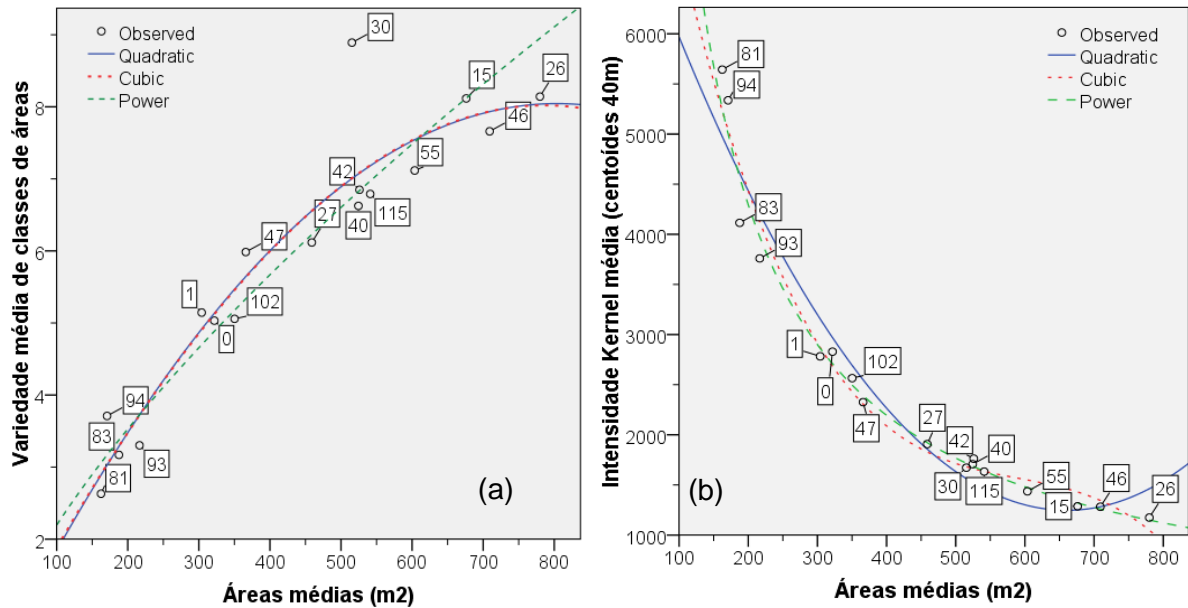


Figura 46: (a) Gráfico da variedade média das classes de áreas dos polígonos das redes, em função das áreas médias dos polígonos das redes, (b) gráfico da intensidade kernel média a partir dos centróides em função das áreas médias dos polígonos das redes.

Tabela 14: Sumário dos modelos não lineares ajustados aos dados no gráfico (a) da figura 46.

Variável dependente: Variedade média das classes de áreas de cada rede

Equação	Sumário do modelo (a)					Parâmetros estimados			
	R quadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Quadrática	0,903	65,142	2	14	0,000	-0,051	0,020	-1,254E-005	
Cubica	0,903	40,338	3	13	0,000	0,068	0,019	-1,010E-005	-1,755E-009
Potência	0,912	155,699	1	15	0,000	0,094	0,684		

A variável independente é: Área média dos polígonos de cada rede

Refira-se que sem a rede 30, o ajuste do R^2 na função quadrática sobe para 0.968, na função cúbica para 0.970, e na potência sobe para 0.945.

Tabela 15: Sumário dos modelos não lineares ajustados aos dados no gráfico (b) da figura 46.

Variável dependente: Intensidade Kernel média (centróides 40m)

Equação	Sumário do modelo (b)					Parâmetros estimados			
	R quadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Quadrática	0,949	129,734	2	14	0,000	7803,652	-19,861	0,015	
Cubica	0,973	158,245	3	13	0,000	10497,730	-42,781	0,070	-3,968E-005
Potência	0,992	1802,187	1	15	0,000	727683,283	-0,969		

A variável independente é: Área média dos polígonos de cada rede

Para o gráfico (a), Figura 46, da variedade das áreas em função das mesmas temos o melhor ajuste para a função potência com a equação:

$$y = 0,0939x^{0,6842}$$

A variedade das áreas médias aumenta na potência de (n) com as áreas médias dos polígonos. O mesmo pode ser dito de outra de outra forma, ou seja, a simetria (oposto de variedade de áreas) aumenta na potência de (n) com a diminuição das áreas dos polígonos.

O gráfico da intensidade kernel em função das áreas ajusta melhor a uma função potência que o modelo da variedade das áreas, com $R^2=0.992$. Enquanto esta última curva mostra diferentes graus de subdivisão (tamanhos) em função da densidade, a variedade destaca muito bem a assimetria da rede 30 (neste caso, assimetria está muito longe da tendência que a curva apresenta com as áreas). A rede 15 também é bastante assimétrica (por atravessar diferentes tipos de substratos), já a rede 47 também apresenta um ligeiro desvio em y, para valores mais elevados de assimetria, por razões topográficas. Os valores de variedade das áreas permitem distinguir redes tendencialmente assimétricas no gráfico (a) da figura 46. Contudo, a tendência geral é a de quanto mais pequenas as áreas, maior é o grau de simetria que as redes apresentam. A relação da simetria com a área também não é linear, porque depende da taxa de decréscimo das áreas dos polígonos (ou subdivisão), ou melhor, do crescimento de cunhas, que também não é linear.

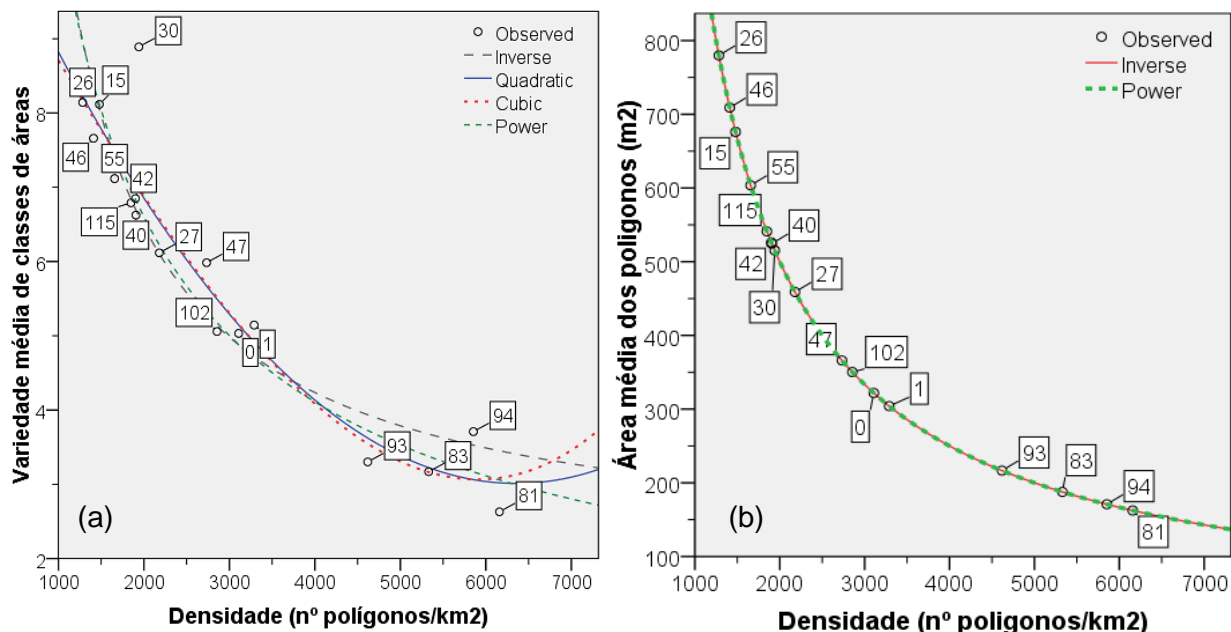


Figura 47: (a) Gráfico da variedade média das áreas dos polígonos das redes, em função da densidade média das redes, (b) gráfico das áreas médias dos polígonos das redes em função da densidade média das redes.

Tabela 16: Sumário dos modelos não lineares ajustados aos dados no gráfico (a) da figura 47.

Variável dependente: Varietade média das classes de áreas de cada rede

Equação	Sumário do modelo (a)					Parâmetros estimados			
	R quadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Inversa	0,851	85,661	1	15	0,000	1,997	8953,267		
Quadrática	0,903	65,329	2	14	0,000	11,194	-,003	2,027E-007	
Cubica	0,904	40,618	3	13	0,000	10,705	-,002	3,567E-008	1,554E-011
Potencia	0,912	155,717	1	15	0,000	1198,460	-,684		

A variável independente é: Densidade (nº de polígonos/km²)

Tabela 17: Sumário dos modelos não lineares ajustados aos dados no gráfico (b) da figura 47.

Variável dependente: Área média dos polígonos de cada rede

Equação	Sumário do modelo (b)					Parâmetros estimados	
	R quadrado	F	df1	df2	Sig.	Constante	b1
Inversa	1,000	44536651323,8	1	15	0,000	-,004	1000006,8
Potencia	1,000	9418904583,14	1	15	0,000	1000138,011	-1,000

A variável independente é: Densidade (nº de polígonos/km²)

Para o gráfico (a) da figura 47, variedade das áreas em função da densidade dos polígonos, temos que o ajuste é ótimo para a função inversa e para a potência com a equação da função potência:

$$y = 1198,4600 x^{-0,6842}$$

Note-se que as primeiras 4 casas decimais da potência desta equação e da anterior para a variedade (Fig.46 a) são exactamente iguais, o sinal é oposto assim como a curva da função pois para valores de densidade alta temos áreas pequenas. Mais uma vez, de uma forma geral, no gráfico da variedade conseguimos destacar a assimetria de várias redes em função do que apresentamos no eixo das abcissas, neste caso a densidade média dos polígonos das redes. O gráfico da área média dos polígonos em função da densidade apresenta uma curva igual à da densidade em função das áreas médias dos polígonos, por ser uma função inversa: $f(x) = f^{-1}(x)$, isto é, se trocarmos os eixos a curva fica igual, só a ordem dos valores é trocada.

O ajuste da densidade em função das áreas é sempre igual a 1, sendo esta questão abordada no ponto 11 com mais pormenor. Consideremos uma unidade de área, seja ela qual for (1 km² ou 1 m²); se a unidade é sucessivamente subdividida até determinado valor que a posiciona na curva com determinada densidade, e não havendo acréscimos de áreas, as áreas são tanto mais baixas quanto mais alta é a densidade. Pode-se aplicar o conceito de proporcionalidade inversa, isto é, se uma variável de um dos lados duplica, a outra reduz-se a metade; de uma forma geral, se a variável independente "x" é multiplicada por um número natural "n", a variável dependente "y" é dividida pelo mesmo número natural "n". Isto é o mesmo que dizer: o produto "y.x" mantém-se constante na função inversa.

Tabela 18: Produto da área média dos polígonos pela densidade das redes, confirmação do conceito de proporcionalidade inversa, o produto "x.y" é constante.

ID Rede	Nº. Polígonos	(x)Área média (m ²)	(y)Densidade (nº polígonos m ²)	Produto (X)(Y)
0	821	321.8	0.003107500	1.000
1	95	304.0	0.003289267	1.000
15	264	676.1	0.001478985	1.000
26	328	779.8	0.001282334	1.000
27	216	458.8	0.002179400	1.000
30	116	515.4	0.001940399	1.000
40	215	524.5	0.001906621	1.000
42	294	526.0	0.001901135	1.000
46	197	709.1	0.001410323	1.000
47	357	366.0	0.002732600	1.000
55	215	603.6	0.001656604	1.000
81	1666	162.4	0.006158305	1.000

ID Rede	Nº. Polígonos	(x)Área média (m ²)	(y)Densidade (nº polígonos m ²)	Produto (X)(Y)
83	262	187.6	0.005329831	1.000
93	95	216.5	0.004617920	1.000
94	671	170.8	0.005853550	1.000
102	253	350.2	0.002855149	1.000
115	161	541.1	0.001848066	1.000

O gráfico (b) da figura 47 (ou a sua função inversa) pode ser representativo da subdivisão relativa das diferentes redes.

Assim, tendo em conta que as áreas médias e a densidade são inversas, no geral o gráfico da variedade média em função da densidade na Figura 47 (a) mostra a mesma informação que o da variedade média em função das áreas, ou seja, de uma forma geral a variedade média é maior em áreas maiores (densidades menores).

A semelhança entre a ordem das redes e as próprias funções (a) e (b) da figura 47 leva a concluir que a simetria também depende, de alguma forma, das áreas. Aumentando também ela com uma potência (n), durante o processo de subdivisão de polígonos, a diferença está, porém, no facto da variedade destacar as redes que se afastam da curva (por exemplo, rede 30) por apresentarem elevados valores de assimetria ou variedade de áreas.

8. INTENSIDADE E REGULARIDADE DAS REDES AJUSTADA A PARÂMETROS DERIVADOS DO MDT

Neste ponto pretende-se ajustar, a partir de regressões lineares múltiplas, apenas uma variável dependente, que será em primeiro lugar a densidade kernel e depois a variedade das áreas, a vários parâmetros extraídos essencialmente do modelo digital de terreno. Neste sentido foram testados vários modelos que conduziram a bons ajustes, mas que no entanto apresentavam valores muito altos de colinearidade entre as variáveis. A colinearidade ou multicolinearidade ocorre quando as correlações entre as variáveis independentes são fortes. Os valores de VIF- *Variance Inflation Factor*, medem a multicolinearidade do modelo; esta aumenta os erros *standard* dos coeficientes. Por sua vez, quando estes são aumentados, significa que coeficientes para algumas variáveis independentes podem ser considerados não significantes (diferentes de 0); por outras palavras, a multicolinearidade pode “enganar” aumentando o VIF de qualquer variável, levando a que variáveis estatisticamente significantes passem a ser insignificantes (Matos, 1995).

Inicialmente, os primeiros modelos de ajuste da variedade das áreas e da intensidade kernel incluíram variáveis independentes como declive médio, intervalo de declive, orientação de encostas a norte ou a sul ou distância euclidiana a linhas de água de várias hierarquias (DELA1, DELA2, DELA3 e 4). Isto gerou modelos com altos valores de colinearidade. De uma forma geral, quantas mais variáveis foram retiradas, mais baixos ficaram os valores de VIF (colinearidade) e de significância. Em baixo apresentam-se alguns modelos conseguidos com os mais baixos valores de colinearidade.

Tabela 19: Resumo do Modelo de ajuste entre, a Intensidade Kernel dos polígonos e os seguintes parâmetros derivados do MDT: Intervalo de Curvatura média, DELA3, Altitude Média.

Resumo do Modelo				
Modelo	R	R Quadrado	R Quadrado Ajustado	Std. Error of the Estimate
1	0,927 ^a	0,860	0,828	578,431058135

a. Preditores: (Constante), Intervalo de Curvatura média, DELA3 (distancia euclidiana das rede à linha de água de ordem 3), Altitude Média.

Tabela 20: Tabela ANOVA do modelo de ajuste entre, a Intensidade Kernel dos polígonos e os seguintes parâmetros derivados do MDT: Intervalo de Curvatura média, DELA3, Altitude Média.

ANOVA ^a						
Modelo		Soma dos Quadrados	gl	Quadrado médio	F	Sig.
1	Regressão	26764460,817	3	8921486,939	26,665	0,000 ^p
	Residual	4349572,357	13	334582,489		
	Total	31114033,175	16			

a. Variável dependente: Intensidade Kernel (centróides dos polígonos)

b. Preditores: (Constante), Intervalo de Curvatura média, DELA3 (distancia euclidiana das rede à linha de água de ordem 3), Altitude Média.

Tabela 21: Tabela de coeficientes e estatísticas de colinearidade do ajuste entre, Intensidade Kernel dos polígonos e os seguintes parâmetros derivados do MDT: Intervalo de Curvatura média, DELA3, Altitude Média.

Coeficientes ^a							
Modelo	Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados	t	Sig.	Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro Std.	Beta			Tolerância	VIF
1	(Constante)	1799,085	449,252		4,005	0,001	
	Altitude Média	-14,386	2,925	-0,601	-4,918	0,000	0,720
	DELA3	2,295	0,494	0,535	4,644	0,000	0,812
	Intervalo Curvatura	329,576	138,274	0,264	2,384	0,033	0,875

a. Variável dependente: Intensidade Kernel (centróides dos polígonos)

O mesmo procedimento foi testado para a variedade das áreas dos polígonos, e por mais parâmetros derivados do MDT que fossem incluídos nunca se conseguiu obter um bom

modelo sem um factor preditor relacionado com as granulometrias. Desta forma este ajuste foi mais fraco.

Tabela 22: Resumo do Modelo de ajuste entre a variedade média das áreas dos polígonos (14 classes) e seguintes parâmetros derivados do MDT: DELA3, Valor médio de células côncavas de cada rede.

Modelo	R	R Quadrado	R Quadrado Ajustado	Erro Std. da Estimativa
1	0,844 ^a	0,713	0,672	1,085481694

a. Preditores: (Constante), DELA3 (distancia euclidiana das rede à linha de água de ordem 3), Valor médio de células côncavas de cada rede.

Tabela 23: Tabela ANOVA do modelo de ajuste entre a variedade média das áreas dos polígonos (14 classes) e seguintes parâmetros derivados do MDT: DELA3, Valor médio de células côncavas de cada rede.

Modelo	Soma dos Quadrados	gl	Quadrado médio	F	Sig.
1					
Regressão	40,974	2	20,487	17,387	0,000 ^p
Residual	16,496	14	1,178		
Total	57,470	16			

a. Variável dependente: Variedade média das classes de áreas dos polígonos (14 classes)

b. Preditores: (Constante), DELA3 (distancia euclidiana das rede à linha de água de ordem 3), Valor médio de células côncavas de cada rede.

Tabela 24: Tabela de coeficientes e estatísticas de colinearidade do ajuste entre variedade média das áreas dos polígonos (14 classes) e os seguintes parâmetros derivados do MDT: DELA3, Valor médio de células côncavas de cada rede.

Modelo	Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados	t	Sig.	Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro Std.	Beta			Tolerância	VIF
1							
(Constante)	4,708	1,059		4,444	0,001		
C.côncavas	-30,271	8,011	-0,608	-3,779	0,002	0,793	1,262
DELA3	-0,002	0,001	-0,372	-2,310	0,037	0,793	1,262

a. Variável dependente: variedade média das classes de áreas dos polígonos (14 classes)

Para a variedade das áreas, a introdução dos parâmetros do modelo anterior (altitude média e intervalo de curvatura) inflacionavam de tal forma a colinearidade que passavam a ter a significância acima de 0.5.

Supostamente, a concavidade das células e a proximidade à linha de água principal (ordem 3) terão maior impacto na variedade das áreas do que na intensidade dos polígonos (tamanhos). De qualquer forma só 67% deste modelo explica a variedade das áreas, o que claramente indica que estão a faltar parâmetros não derivados do modelo digital de terreno.

Outro parâmetro medido nas redes que resultou numa forma de medir a assimetria foi o desvio padrão do comprimento das faces dos polígonos de cada rede. Simplificando os

polígonos e obtendo rectas entre os vértices, calculou-se o seu comprimento e as estatísticas (média, mínimos, máximos e desvio padrão), para cada rede. O resultado do desvio padrão do comprimento das faces é semelhante à assimetria obtida pela variedade das classes de áreas. Um ajuste de um modelo com os mesmos preditores, DELA3 (distância euclidiana das rede à linha de água de ordem 3) e valor médio de células côncavas de cada rede ao desvio padrão do comprimento das faces, resultou num R quadrado ligeiramente melhor.

Tabela 25: Resumo do Modelo de ajuste entre, o desvio padrão do comprimento das faces dos polígonos e seguintes parâmetros derivados do MDT: DELA3, Valor médio de células côncavas de cada rede.

Resumo do Modelo				
Modelo	R	R Quadrado	R Quadrado Ajustado	Erro Std. da Estimativa
1	0,882 ^a	0,778	0,746	1,85515483

a. Preditores: (Constante), DELA3 (distancia euclidiana das rede à linha de água de ordem 3), Valor médio de células côncavas de cada rede.

Tabela 26: Tabela ANOVA do modelo de ajuste entre, o desvio padrão do comprimento das faces dos polígonos e seguintes parâmetros derivados do MDT: DELA3, Valor médio de células côncavas de cada rede.

ANOVA ^a						
Modelo		Soma dos Quadrados	gl	Quadrado médio	F	Sig.
1	Regressão	168,962	2	84,481	24,547	0,000 ^b
	Residual	48,182	14	3,442		
	Total	217,145	16			

a Variável dependente: Desvio padrão do comprimento das faces dos polígonos

b. Preditores: (Constante), DELA3 (distancia euclidiana das rede à linha de água de ordem 3), Valor médio de células côncavas de cada rede.

Tabela 27: Tabela de coeficientes e estatísticas de colinearidade do ajuste entre, o desvio padrão do comprimento das faces dos polígonos e os seguintes parâmetros derivados do MDT: DELA3, Valor médio de células côncavas de cada rede.

Coeficientes ^a								
Modelo		Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados	t	Sig.	Estatísticas de colinearidade	
		B	Erro Std.	Beta			Tolerância	VIF
1	(Constant)	12,718	1,811		7,024	0,000		
	DELA3	-0,005	0,002	-0,416	-2,941	0,011	0,793	1,262
	C.côncavas	-59,183	13,691	-0,611	-4,323	0,001	0,793	1,262

a. Variável dependente: Desvio padrão do comprimento das faces dos polígonos

9. A GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA DAS REDES

O primeiro estudo de simulação de fendas de contracção térmica em ambiente laboratorial controlado foi iniciado por Harris & Murton (2003), com o intuito de determinar o efeito de diferentes granulometrias nos mecanismos de formação das cunhas de gelo. Trabalhos seguintes de Harris & Murton (2005) revelaram que o grau de deformação observado em cunhas simuladas é determinado por factores que controlam a consolidação durante a fusão, sendo a deformação progressivamente maior em sedimentos mais finos. Também Haltigin *et al.* (2010) notam correlações entre padrões de distribuição dos vértices e o substrato, particularmente uma correlação negativa entre granulometria do solo e a regularidade das redes (substratos siltosos e arenosos apresentam padrões mais pequenos e regulares que granulometrias mais grosseiras).

Em termos geológicos, grande parte dos polígonos de Adventdalen assenta sobre a zona plana do vale preenchida essencialmente por depósitos do Quaternário, essencialmente depósitos não consolidados que incluem depósitos marinhos costeiros (rede 94); estes podem conter argila, silte, areias e cascalho (Major & Nagy, 1972). O material marinho inclui tanto o material que foi depositado pelas marés no presente, como o material que foi depositado a níveis mais elevados até ao limite marinho de então. Estes materiais podem variar bastante nas suas granulometrias, dependendo da actividade das ondas (Sørbel *et al.*, 2001). Grande parte da zona plana do vale está também preenchida por depósitos fluviais e fluvioglaciários. O material fluvial inclui material recente e pré-recente, existe numa extensa planície com cascalho do rio, areia e silte; também são frequentes cones e leques aluviais, sendo que os cones resultam de linhas de água intermitentes que cortam o declive mais acentuado das montanhas (Major & Nagy, 1972). Os depósitos glaciares incluem características proeminentes neste vale; as moreias, tanto laterais como terminais, rodeiam as zonas de recuo dos glaciares (Major & Nagy, 1972). O material fluvioglaciário é primariamente composto por material *sorted* (ordenado/ separado) de areias e cascalho, o que o torna visivelmente similar ao material fluvial (Sørbel *et al.*, 2001).

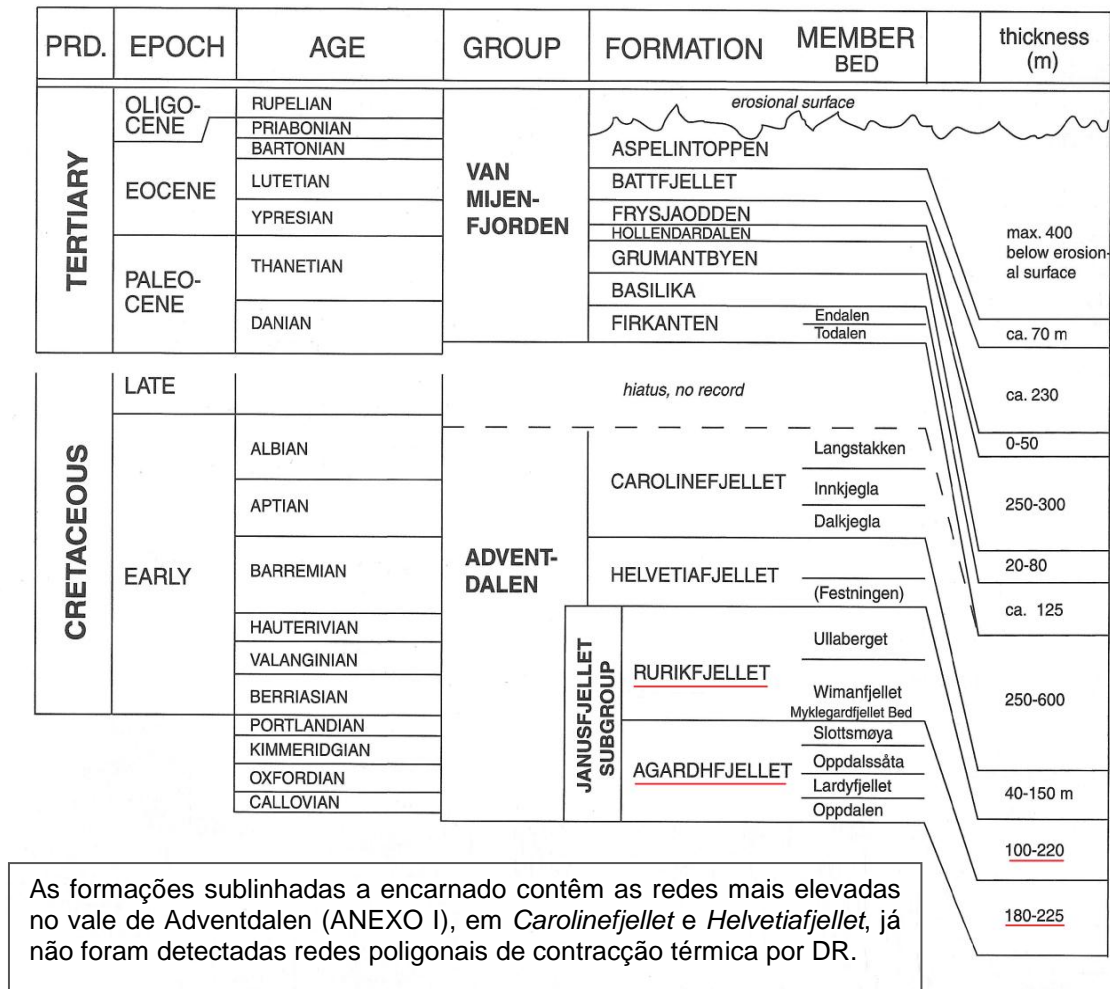


Figura 48: Tabela litoestratigráfica de Svalbard, cortada para a área de interesse, grupos anteriores ao de Adventdalen foram retirados (adaptado de Dallmann et al., 2001).

As redes que não ocorrem em materiais não consolidados do Quaternário distribuem-se em duas formações geológicas principais: a rede 15 num terraço com declive médio na formação mais baixa, *Rurikfjellet*, e as restantes, todas em vertentes, na formação mais elevada, *Agardhfjellet*. Estas duas fazem parte de um subgrupo denominado *Janusfjellet*. É importante referir que este subgrupo é uma sequência marinha de argilito que se encontra no meio de duas formações não marinhas de arenito *Kapp Toscana* (abaixo) e *Helvetiafjellet* (acima). Presume-se que a parte inferior deste subgrupo; *Rurikfjellet*, foi bastante removida por erosão entre o Jurássico e o Cretácico, como resultado de movimentos de uma falha tectónica. Ambas as formações têm argilito, siltito e arenito, e as quantidades de siltito e arenito aumentam com a altitude sendo portanto maiores em *Agardhfjellet* (Major & Nagy, 1972).

Uma vez que se localizam mais redes numa formação com substrato de granulometrias mais grosseiras, importa também verificar a localização da rede de drenagem nestas duas formações geológicas.

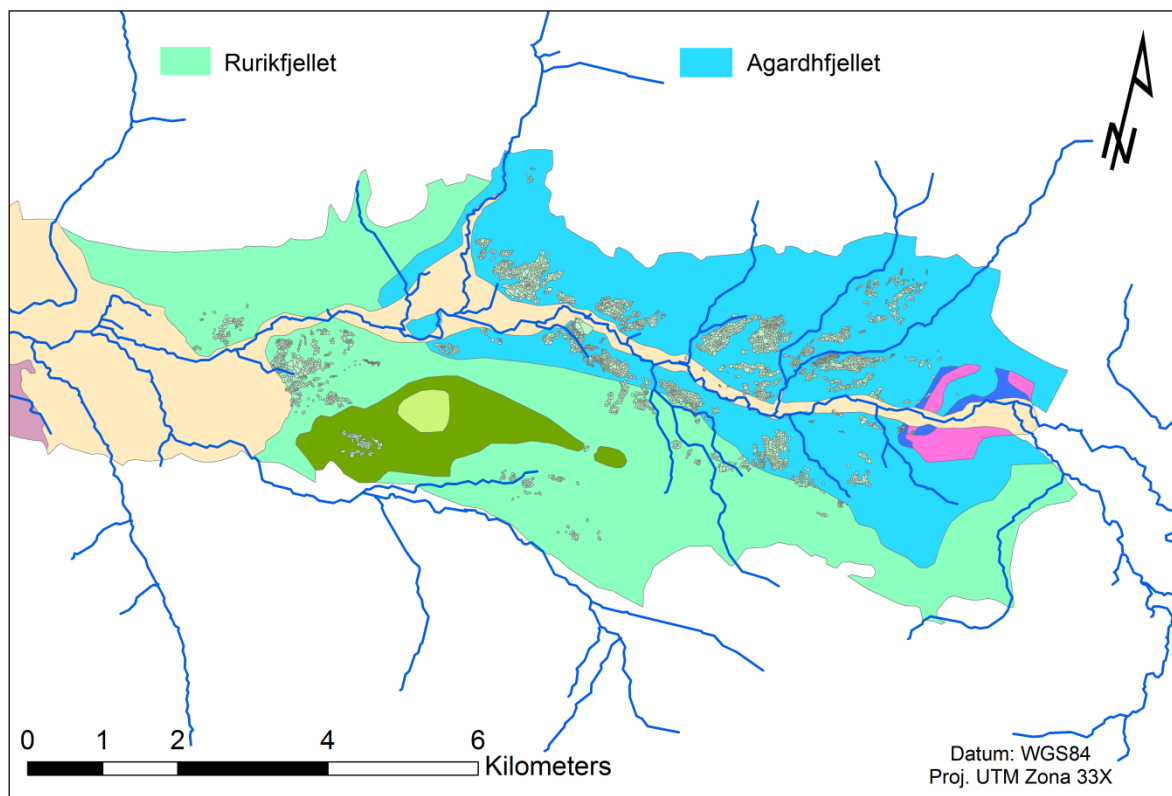


Figura 49: Ilustração da rede de drenagem sobre duas formações geológicas semelhantes: Agardhfjellet e Rurikfjellet, na base está parte do mapa geológico (ANEXO I), em sobreposição estão todos os polígonos digitalizados e a rede de drenagem do vale.

Na Figura 49 estão todos os polígonos digitalizados, para possibilitar uma comparação visual da densidade da ocupação de polígonos entre estas duas formações geológicas. A formação *Agardhfjellet*, aparenta ter uma rede de drenagem bem distribuída, enquanto na margem noroeste da formação *Rurikfjellet* parece não existir praticamente nenhuma linha de água. Entre estas duas formações as diferenças de granulometrias do substrato presente poderão não ser muito grandes, mas aparentemente a existência de uma boa rede de drenagem em *Agardhfjellet* sobrepõe-se às granulometrias mais finas de *Rurikfjellet* no que diz respeito ao desenvolvimento das cunhas de gelo.

Observando o mapa geológico (ANEXO I), encontra-se uma série de redes nos depósitos não consolidados, mas existe um grande “vazio” entre estas e as restantes redes a montante; isto é, entre a rede (0) e a rede mais próxima (15) existe um intervalo com uma distância linear de mais de 6 quilómetros sem uma única rede, tudo isto ainda sobre depósitos soltos do Quaternário. Percorrendo mais uns quilómetros para montante

passamos a rede 15 e alguns polígonos dispersos numa formação geológica (*Rurikfjellet*) com fraca rede de drenagem até chegarmos aos terrenos da *Agardhfjellet*, onde voltamos a encontrar uma grande densidade de polígonos em torno das linhas de água, ainda que sobre vertentes. Analisando agora o mapa geomorfológico (ANEXO II), podemos distinguir na mesma unidade do Quarternário os depósitos recentes dos pré-recentes. Neste mapa é possível observar a extraordinária coincidência que tem o posicionamento da cobertura de depósitos recentes com a zona do grande “vazio” de redes; isto é, os 6 quilómetros bem drenados de depósitos não consolidados não são todos da mesma época, e observa-se que as redes existentes na planície do vale estão preferencialmente sobre os depósitos pré-recentes.

No entanto, perto de *Janssonhaugen* (Fig. 50 b), uma zona mais elevada situada aproximadamente no cento do vale, e que geologicamente faz já parte das formações *Carolinefjellet* e *Helvetiafjellet*, encontramos polígonos extremamente pequenos em material fluvial recente (Fig. 50 c).

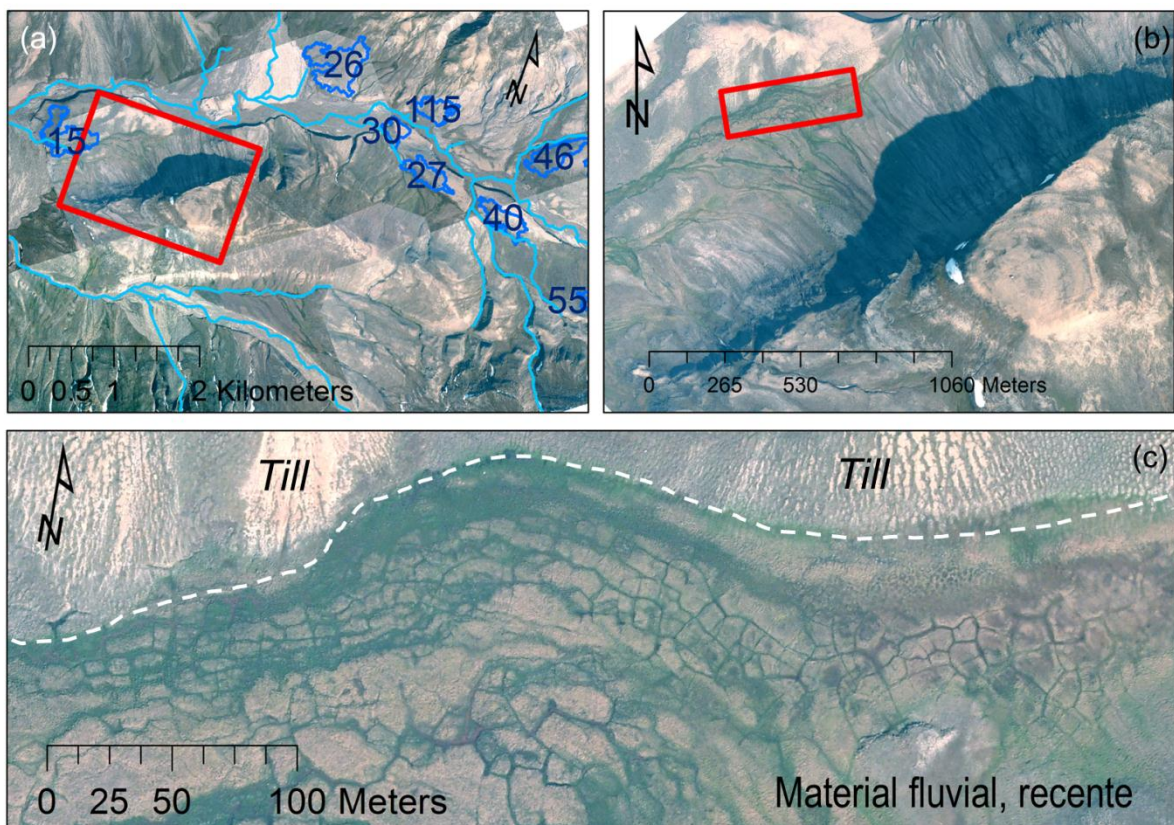


Figura 50: *Janssonhaugen* (a) posicionamento de polígonos em material recente relativamente às restantes redes da zona, e rede de drenagem obtida do MDT o quadrado encarnado é o enquadramento da imagem em (b), (b) pormenor do topo de *Janssonhaugen*, são visíveis linhas de vegetação que acompanham a escorrência da água, o rectângulo encarnado é o enquadramento da imagem em (c), (c) pormenor, da zona de transição de material fluvial recente para a zona de *til*, com um filamento de polígonos muito pequenos, sobre material recente.

Analisando em maior pormenor as características do material fluvial recente, que ocorre entre a rede (0) e a (15), onde não existem redes por mais de seis quilómetros ao longo do rio, verifica-se que existem também grandes leques aluviais (Fig. 51). Enquanto a zona de figura 50 é quase plana e a linha de água devolvida pelo MDT nem chega a formar-se ali, ou seja a capacidade de transporte de material nesta zona deve ser quase nula, existe no entanto bastante humidade ou água presente, que se revela na vegetação e na formação de cunhas. Não obstante, segundo Sørbel *et al.* (2001), uma das distinções entre o material recente e o pré-recente é a quantidade de vegetação que se instala no material pré-recente, o que não acontece geralmente no material fluvial ordenado, perto dos leitos dos rios. Em todo o caso, independentemente da classificação que esta zona teve (Fig 50c) continua a ser possível observar as tonalidades a verde que consistem em vegetação intensa (por anterior observação de campo e correspondentes ortofotomapas, é possível fazer esse reconhecimento por simples fotointerpretação).

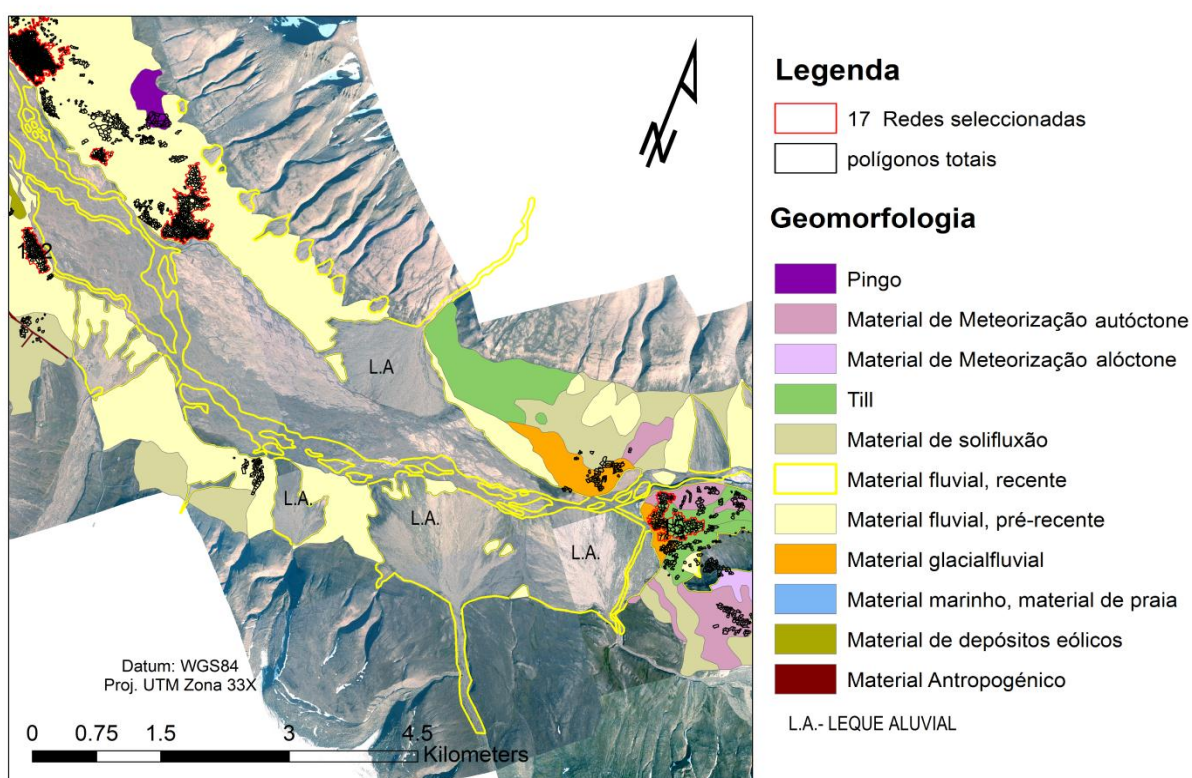


Figura 51: Área de material fluvial recente, desprovida de redes poligonais de contracção térmica, a ilustração tem transparência neste tema para ser observável a presença e dimensão dos leques aluviais nesta zona.

Resumindo estes dois casos ilustrados na figura 50 e 51, se por um lado se poderia atribuir a inexistência de redes no grande intervalo de 6 quilómetros à ocupação por material fluvial recente, o caso da Figura 50c vem contrariar a questão da idade dos materiais. Isto significa que, neste caso (Fig. 50c), temos cunhas a formarem-se muito rapidamente (juntas e em material recente) numa faixa estreita que parece estar

absolutamente dependente dum percurso de água, superficial ou não, enquanto no vale (Fig.51) o mesmo material recente estará em movimento com forte capacidade de transporte, não permitindo a estabilidade necessária à formação de redes nesta zona.

Em Adventdalen encontramos casos de redes bem desenvolvidas (considerando as ligações ortogonais e polígonos pequenos, bem subdivididas) em sedimentos não consolidados em zonas planas e com boas condições de drenagem que favoreceram o desenvolvimento e aceleração do crescimento de cunhas já no Quaternário como a rede 81,83 e 94. Mas também encontramos uma rede numa posição de vertente, sobre uma formação do Triássico Superior que apresenta ligações ortogonais, zonas com polígonos muito pequenos, especialmente numa depressão (Fig.30), mesmo nas zonas de convexidade tem também polígonos pequenos e é bem desenvolvida; trata-se da rede 47, que pode, pelas razões apontadas, ser mesmo a mais antiga das 17 estudadas.

Em termos geomorfológicos, algumas redes atravessam diferentes unidades, o que impossibilitou o tratamento destes dados através de estatísticas mais elementares por rede como médias, máximos e desvios padrão. Para isolar unidades geomorfológicas, seria necessário “partir” redes que deixavam de ter o número de polígonos mínimo estipulado no início desta tese. Desta forma, foram calculadas as áreas que cada formação ocupa em cada rede e as percentagens de ocupação tanto das unidades geológicas como das geomorfológicas, e cujos resultados se apresentam numa tabela do ANEXO III.

Porém, em termos da geometria dos polígonos não se observam diferenças consideráveis nas transições entre unidades geomorfológicas, com excepção da rede 15, que merece ser analisada com mais detalhe.

Esta rede encontra-se sensivelmente a meio do vale, sobre um terraço, sem um declive exagerado, isto é, já faz parte de uma grande formação geológica e não pertence aos depósitos do Quaternário. Todavia, ainda não se encontra nas vertentes de maior declive, o que convenientemente ajuda a isolar os factores granulométricos das influências topográficas.

Na figura 52 observa-se que a rede ocupa três unidades geomorfológicas distintas: 9.3% de material de meteorização autóctone, 27.0% de material fluvioglaciário e 63.5% de *till*.

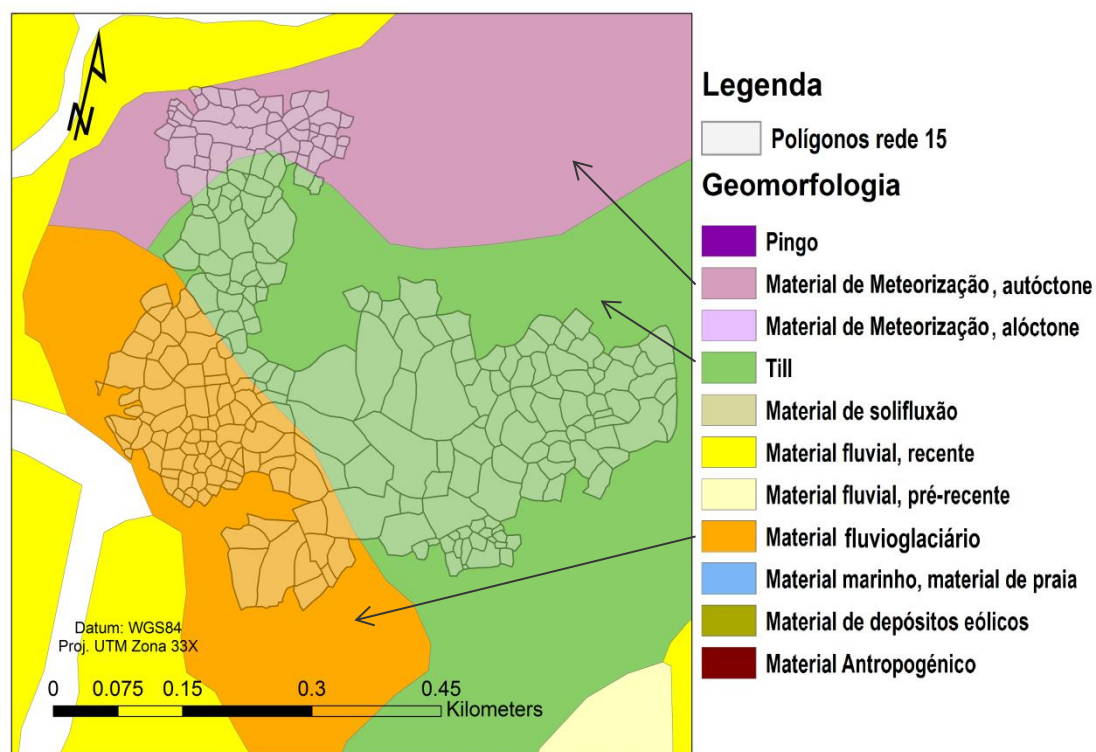


Figura 52: Rede 15 sobre diferentes unidades geomorfológicas, aparenta ter também uma transição na geometria dos polígonos.

O material de meteorização, por ser autóctone, ocorre *in situ*, e é constituído geralmente por sedimentos não afectados pelo declive, dependendo a sua composição do substrato da região. Neste caso, são argilito e siltito. O material fluvioglaciário neste mapa refere-se a depósitos resultantes da fusão de glaciares antigos (Sørbel *et al.* 2001). Como referido, este consiste essencialmente em material ordenado de areias e gravilha. O *till* consiste em material transportado e depositado ou por grandes calotes de gelo mais antigas, ou por glaciares activos; mas, sendo o material não ordenado, pode conter desde rochas e blocos de vários tamanhos juntamente com material mais fino (Sørbel *et al.* 2001). A capacidade de transporte que um glaciar pode ter é muito grande e o material é diverso. No que se refere às características sedimentares gerais dos *tills*, independentemente da génese, eles são *diamictons*, ou seja, sedimentos não calibrados ou mal calibrados, não consolidados, com uma granulometria muito variada (Vieira, 2004). Efectivamente a região ocupada por *till* aparenta ter uma transição nas áreas dos polígonos que são consideravelmente maiores na zona central; contudo, no canto inferior direito desta unidade, e também mais a oeste, a mesma apresenta polígonos bastante pequenos, o que poderá estar de acordo com as características do *till* relativamente à variedade de granulometrias. Das três unidades geomorfológicas, a que apresenta menos assimetria geométrica em termos de

áreas dos polígonos é a de meteorização autóctone de argilito e siltito. Não obstante a unidade de *till* ser representativa do efeito da variedade de granulometrias, não se devem descurar outros factores, nomeadamente a formação de uma linha de água na zona de material fluvioglaciário, onde ocorrem os polígonos mais pequenos.

10. VALÊNCIA DOS VÉRTICES COMO INDICADOR DE REGULARIDADE

Lewis (1928, 1931) estudou células vegetais de onde deduziu a formula empírica em que a média das áreas $\langle A_i \rangle$ de células (ou polígonos) com i vizinhos aumenta linearmente com o número de polígonos com i vizinhos, uma relação matematicamente expressa por:

$$\langle A_i \rangle = \langle A \rangle [1 + \lambda (i - 6)] \quad (11)$$

Onde, $\langle A \rangle$ é a média das áreas de todos os polígonos na rede e λ uma constante.

A aplicabilidade da lei foi verificada por Saraiva *et al.* (2009) em redes poligonais marcianas. O que esta lei empírica diz, na prática, é que polígonos com mais vizinhos tendem a ser maiores e polígonos pequenos tendem a ter menos vizinhos (Saraiva *et al.* 2009).

Este facto não se verifica para todas as redes de Adventdalen; ou seja, verifica-se para redes com grande percentagem de vértices trivalentes (como as células vegetais) mas não para as redes com maiores percentagens de vértices tetravalentes, onde os polígonos em diagonal não partilham propriamente a mesma face, mas o mesmo vértice. Um polígono hexagonal tem 6 faces e vértices trivalentes (6:3), e rodeado por vizinhos hexagonais tem 6 vizinhos. Um polígono quadrado tem 4 faces e cercado por polígonos iguais tem 4 vértices tetravalentes (4:4), no entanto, contando os polígonos nas diagonais, a vizinhança é igual a 8 (Fig. 26).

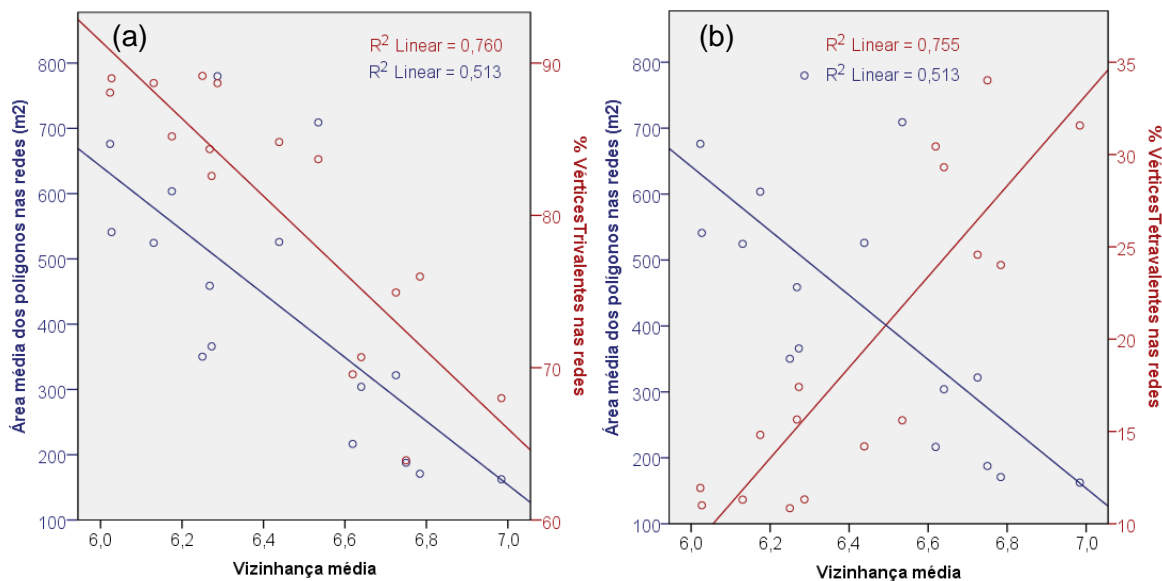


Figura 53: (a) Gráfico de duplo eixo, a azul, a área média dos polígonos de cada rede em função da vizinhança média dos polígonos, a encarnado a percentagem de vértices trivalentes em função da vizinhança; (b) Gráfico de duplo eixo, a azul, a área média dos polígonos de cada rede em função da vizinhança média dos polígonos, a encarnado a percentagem de vértices tetravalentes em função da vizinhança.

Nas redes de Adventdalen, verifica-se que existe uma relação (ou tendência) directamente proporcional entre a média da vizinhança dos polígonos e vértices trivalentes; já para os vértices tetravalentes esta relação é inversamente proporcional (Fig. 53). Redes com polígonos de áreas mais pequenas apresentam maiores vizinhanças, ao contrário do que sucede nas células vegetais de Lewis.

Uma rede com cerca de 90% de vértices trivalentes tem uma vizinhança média perto de 6 e deverá exibir uma tendência hexagonal, mas quando essa percentagem desce é porque está a aumentar a quantidade de vértices tetravalentes. Considerando o total das redes, e que a percentagem de vértices trivalentes é maior em polígonos maiores, pode-se assumir que o incremento do número de vértices tetravalentes deverá estar a reflectir uma subdivisão (ou actividade da rede), criando-se polígonos de áreas menores e vértices com maior valência, reflectindo-se também num aumento da vizinhança média da rede.

Yong (1995), estudou relações topológicas derivadas da equação de Euler aplicáveis a redes de várias estruturas de natureza biológica e não biológica. Entre as variadíssimas redes que estudou concluiu que um fenómeno comum envolve sempre restrições geométricas e topológicas na formação de vértices trivalentes e tetravalentes. Adicionalmente, a maior parte das redes estudadas têm maioritariamente um predomínio de vértices trivalentes, mesmo onde não há fenómenos de tensão envolvidos. As verificações experimentais do seu trabalho indicam que se a evolução de um processo é

relativamente uniforme (o que não será o caso das redes de contracção térmica), os vértices trivalentes podem resultar somente de restrições geométricas em vez de serem resultado de processos biológicos e/ou físicos. Isto porque só um número limitado de vértices tri- ou tetravalentes podem surgir numa rede. Matematicamente falando, por mais complexa que a rede de superfície possa parecer, existe sempre uma relação simétrica entre a valência dos vértices e o número de polígonos, uma troca recíproca de transformação entre vértices e polígonos. Por exemplo, pode ocorrer a transformação do domínio da rede hexagonal (faces, 6: valência, 3) para uma rede com domínio da tipologia (faces, 4: valência, 4) (Yong, 1995). Adicionalmente, Yong (1995), afirma que os seus estudos indicam que o rácio na valência dos vértices relativamente aos polígonos pode ser indicador do papel de alguns processos biológicos ou físicos.

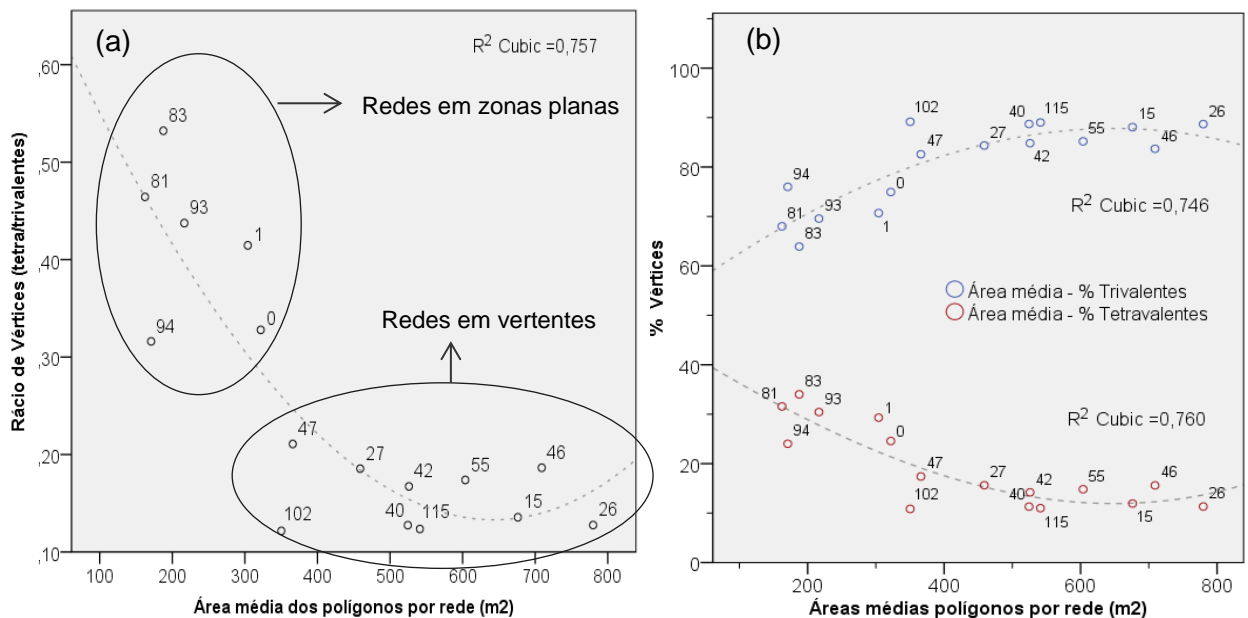


Figura 54: (a) Rácio de vértices (tetra-valentes/trivalentes) em função das áreas médias dos polígonos das redes, (b) percentagem de vértices em função das áreas médias dos polígonos. A valência está representada por diferentes grupos: a azul vértices trivalentes, a encarnado tetra-valentes.

Para além da ocorrência natural de maior valência em polígonos de áreas mais pequenas, uma das características que se consegue distinguir no gráfico (a) da figura 54, é o posicionamento das redes ou o seu agrupamento relativamente ao declive. Este poderá ser um indicador dos processos físicos a que Yong (1995) se refere relativamente à análise deste rácio.

11 DENSIDADE E SUBDIVISÃO

Decidiu-se realizar dois testes relativamente à função da distribuição da densidade de redes em função das áreas médias. O primeiro teste pretende averiguar se há alguma diferença na curva variando o parâmetro de forma dos “polígonos” representados por grelhas de quadrados e hexágonos de áreas iguais. No segundo teste utiliza-se a mesma forma (quadrado) e faz-se variar a intensidade da progressão geométrica com que as áreas decrescem. Na figura 55, apresentam-se os esquemas utilizados no primeiro teste.

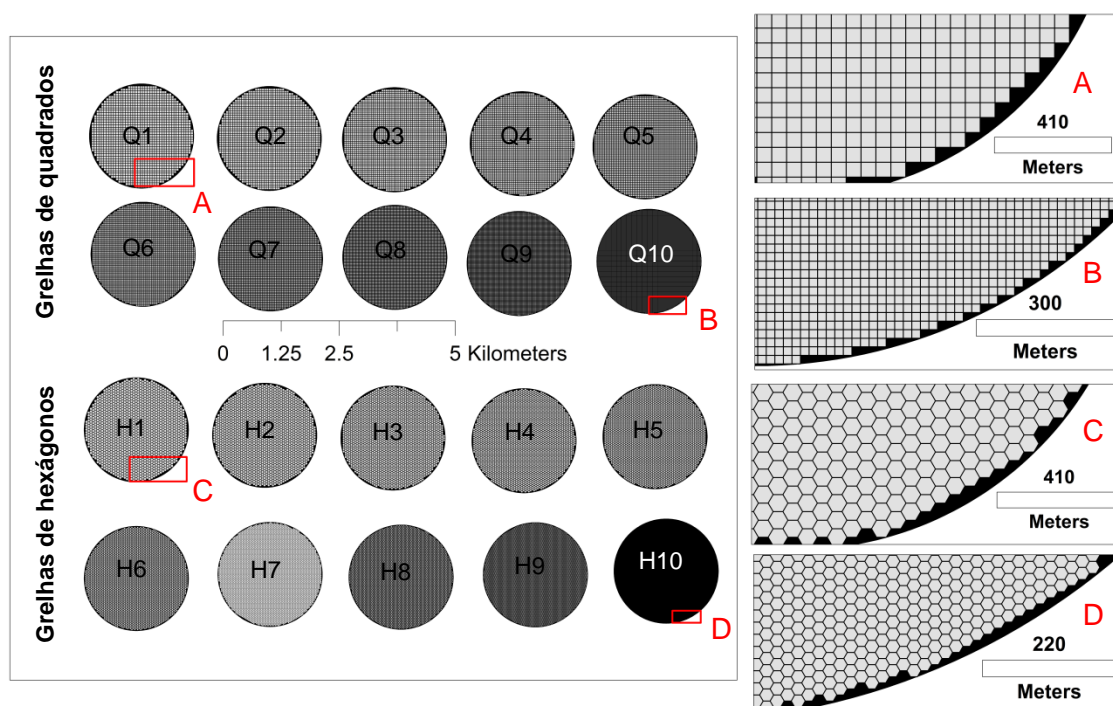


Figura 55: Geração de grelhas: (esquerda) dois conjuntos de 10 grelhas com formas quadradas e formas hexagonais; as áreas das diferentes formas são iguais dentro da mesma grelha e decrescem com o mesmo valor da primeira grelha até à última; (direita) imagens de pormenor: (A) grelha gerada com quadrados de maior área; (B) grelha gerada com quadrados de menor área; (C) grelha gerada com hexágonos de maior área; (D) grelha gerada com hexágonos de menor área, (escalas de unidades métricas com projecção UTM).

Tendo em conta que não existem espaços intersticiais nas redes poligonais, não é utilizada a área do círculo onde foram criadas grelhas. O polígono não é a uma entidade, é uma expressão superficial da existência das cunhas, o real objecto de estudo; a área que se considera na função é a área total dos hexágonos e a área total dos quadrados, ou seja o total da área hipotética onde teria ocorrido a subdivisão por contracção térmica.

Tabela 28: Valores das áreas dos quadrados iguais à dos hexágonos criados nas grelas da figura 45. As áreas decrescem de tamanho em igual proporção: nas grelas de quadrados e Hexágonos. A área total dos hexágonos formados dentro de um círculo é diferente da área total dos quadrados formados dentro de um círculo de igual área. O número de quadrados e hexágonos por grelha também é diferente, mas a densidade é a mesma. (Nº H. e Nº Q., corresponde ao número de hexágonos e quadrados respectivamente, por grelha).

Grelhas	Área (m ²) hexágonos	Área (m ²) quadrados	Área total H. km ²	Área total Q. km ²	Nº H.	Nº Q.	Densidade H.	Densidade Q.
1	2716	2716	3.791335	3.761452	1396	1385	368.21	368.21
2	2342	2342	3.800632	3.774873	1623	1612	427.03	427.03
3	1995	1995	3.815057	3.797099	1912	1903	501.17	501.17
4	1677	1677	3.841148	3.802586	2291	2268	596.44	596.44
5	1386	1386	3.842382	3.827140	2773	2762	721.69	721.69
6	1122	1122	3.864316	3.844114	3443	3425	890.97	890.97
7	887	887	3.872699	3.861171	4367	4354	1127.64	1127.64
8	679	679	3.895216	3.876884	5737	5710	1472.83	1472.83
9	499	499	3.907340	3.895368	7833	7809	2004.69	2004.69
10	346	346	3.923441	3.912703	11326	11295	2886.75	2886.75

Para o segundo teste foram formados 2 conjuntos de grelas com quadrados e rectângulos com progressões de subdivisões distintas (Fig.56).

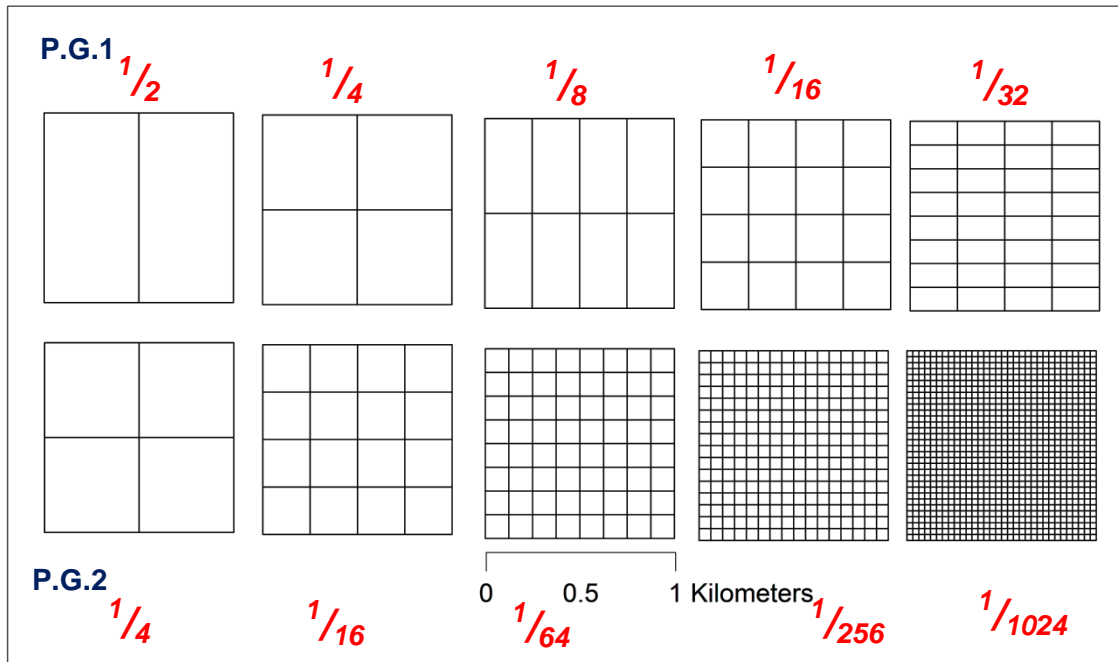


Figura 56: Grelhas geradas com 1 km², para averiguar as diferenças (entre P.G.1 E P.G.2) na curva gráfica da densidade em função da área da quadrícula à medida que as diferentes progressões geométricas fazem decrescer a área das quadrículas na proporção indicada pelas respectivas fracções, P.G.1 - Progressão geométrica 1: (1/2ⁿ), P.G.2 - Progressão geométrica 2: (1/4ⁿ).

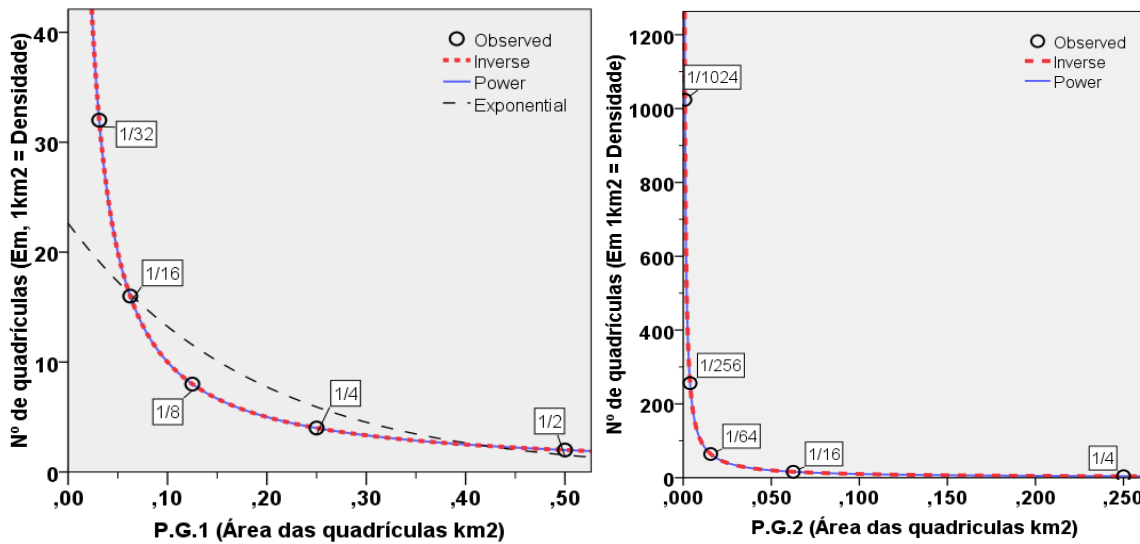


Figura 57: Resultado gráfico das progressões geométricas de divisão das grelhas na figura 54: (esquerda) densidade em função das áreas para a progressão 1: (1/2ⁿ); (direita) densidade em função das áreas para a progressão 2: (1/4ⁿ).

Tabela 29: Ajustamento de um modelo não linear aos dados para a P.G.1 - Progressão geométrica 1: $(1/2^n)$

Variável dependente: P.G.1 nº de quadrículas/densidade

Equação	Sumário do modelo					Parâmetros Estimados	
	R quadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Inversa	1,000	.	1	3	.	5,000E-012	1,000
Potência	1,000	.	1	3	.	1,000	-1,000
Exponencial	0,871	20,250	1	3	0,020	22,627	-5,366

A variável independente é:P.G.1 (Área das quadrículas km²)

Tabela 30: Ajustamento de um modelo não linear aos dados em SPSS© 20.0, para a (P.G.2) - Progressão geométrica 2: $(1/4^n)$.

Variável dependente: P.G.2 nº de quadrículas/densidade

Equação	Sumário do modelo					Parâmetros Estimados	
	R quadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Inversa	1,000	.	1	3	.	,000	1,000
Potência	1,000	.	1	3	.	1,000	-1,000

A variável independente é:P.G.2 (Área das quadrículas km²)

Ambas as progressões se ajustam perfeitamente com a função inversa e com a potência, porém a progressão $(1/4^n)$ representa literalmente ambas as funções na forma mais simples, sendo as respectivas equações simplesmente:

$$\text{Inversa: } y = 0 + \frac{1}{x} ;$$

$$\text{Potência: } y = 1 * x^{-1}.$$

A soma dos termos parciais destas progressões geométricas, correspondem ambas a séries infinitas e convergentes.

Tomemos o exemplo (Craw, 2000):

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} \dots = 1 , \text{ ou igualmente, } \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} = 1$$

Em ambas as progressões temos que os polígonos se podem dividir indefinidamente com o crescimento hipotético das cunhas. Segundo a teoria mais aceite da formação de redes poligonais de contracção térmica (Lachenbruch, 1963), consideremos então um plano de 1 km² onde há geração de cunhas até estas formarem um padrão poligonal relativamente simétrico. Supõe-se, segundo a mesma teoria, que existirão polígonos de 1^a, 2^a, 3^a e i-

enésima ordem, devendo a curva da função anterior informar-nos sobre a intensidade de subdivisão dos polígonos, ou seja, de formação de cunhas. Não querendo com isto dizer que a rede com maior densidade é necessariamente a mais antiga, pois isso depende de outras variáveis da reologia dos solos, amplitudes térmicas, etc. (Plug & Werner, 2008). Esta função dá-nos uma informação relativamente limitada, pois apenas diz respeito às redes que entram na própria função, contudo descreve bem a subdivisão relativa das redes.

Um comportamento idêntico foi observado em várias redes poligonais de Marte (Saraiva *et al.* 2009). A densidade é confrontada com o comprimento médio do eixo maior dos polígonos; neste caso o ajuste foi obtido com a função potência inversa.

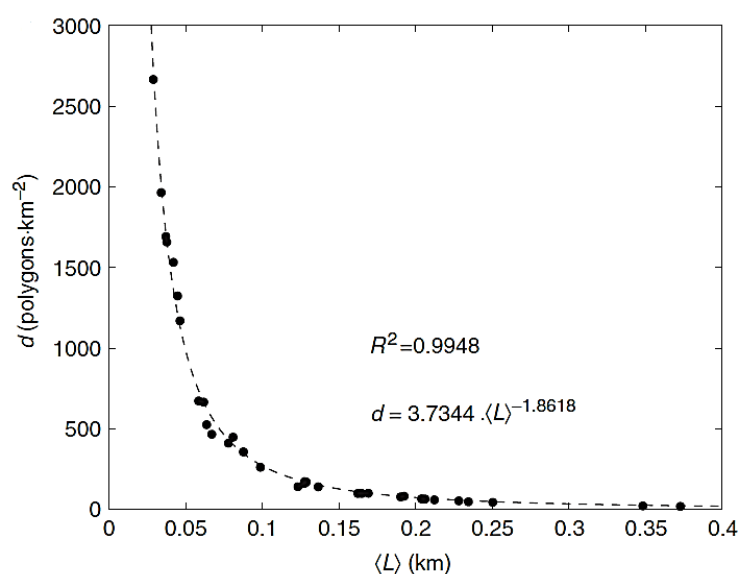
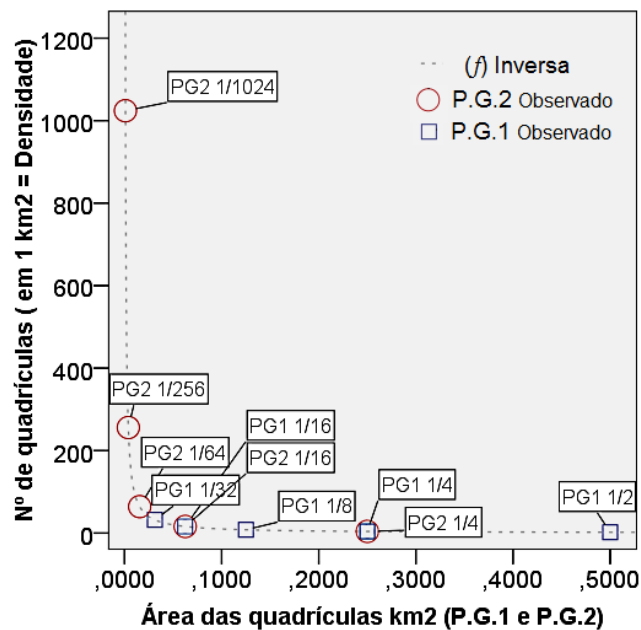


Figura 58: Densidade de polígonos d , em função do eixo maior médio $\langle L \rangle$ em km em redes poligonais de Marte (retirado de Saraiva *et al.*, 2009).

A utilidade desta função inversa poderá permitir, por exemplo, identificar redes de diferentes tipos de solos separando-as consoante a zona e/ou solo, e perceber se surgem sobre a curva com um rácio mais pequeno ou maior para cada conjunto identificado. Por exemplo, colocando a P.G.1 e a P.G.2 no mesmo gráfico, verifica-se que a curva da densidade em função da área é a mesma, porém a distribuição das grelhas (redes) é diferente (Fig. 59).



favorecimento; por exemplo, na Figura 60, as redes mais subdivididas (polígonos mais pequenos), ocorrem em zonas planas e materiais soltos pré-recentes.

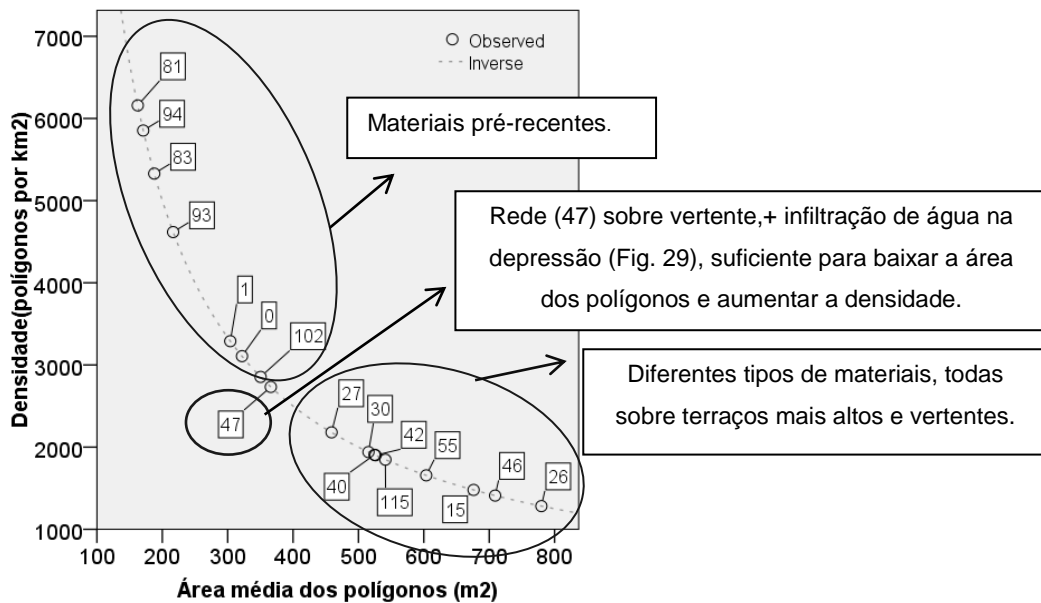


Figura 60: Gráfico da densidade das 17 redes em função as áreas médias dos polígonos de cada rede, incluindo uma breve descrição dos grandes grupos das redes que se encontram ao longo da curva.

Enquanto isso, redes em formações consolidadas realmente mais antigas apresentam menor nível de subdivisão e situam-se em vertentes. Segundo a teoria da contracção poligonal, em que é assumido que os polígonos resultam da subdivisão de cumes, uma rede incipiente poderá ter o aspecto da que se apresenta na figura 61.

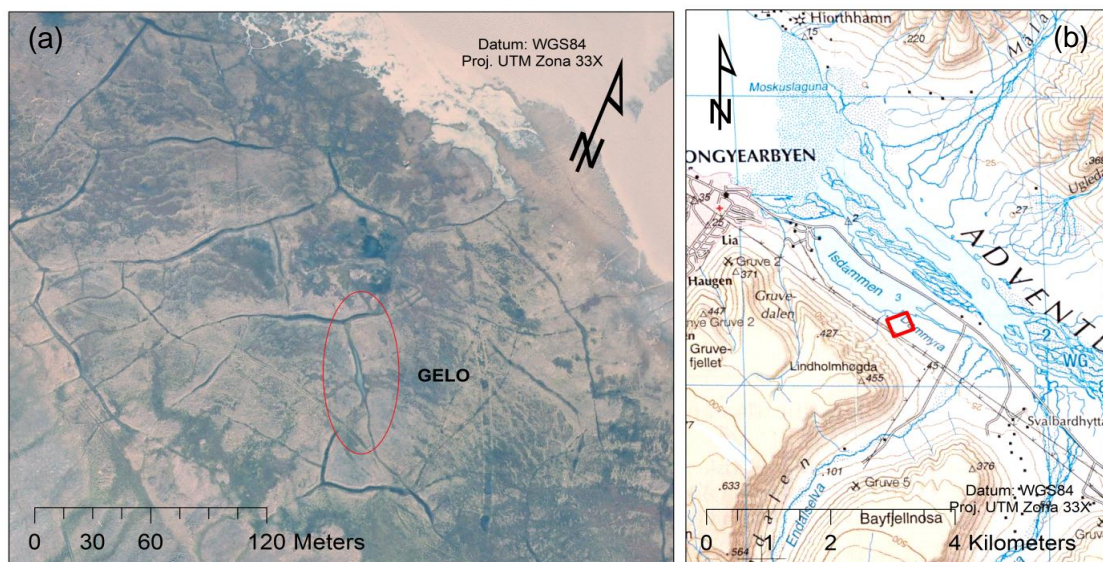


Figura 61: (a) Potencial rede em formação, perto de um lago com cumes de desenho aleatório sobre material recente, (b) localização da rede no início do vale sinalizada com um quadrado encarnado, (mapa topográfico de Adventdalen).

12. SOBRE A SIMETRIA EM REDES POLIGONAIS DE CONTRACÇÃO TÉRMICA.

A formação e evolução dos padrões das redes poligonais podem ser complexas, uma vez que o aparecimento de novas cunhas depende, entre outros factores, também da localização das que já existem (Plug & Werner, 2001).

A figura 62 é um exemplo da regularidade numa rede de uma zona plana fluvial, pertencente à rede 81.

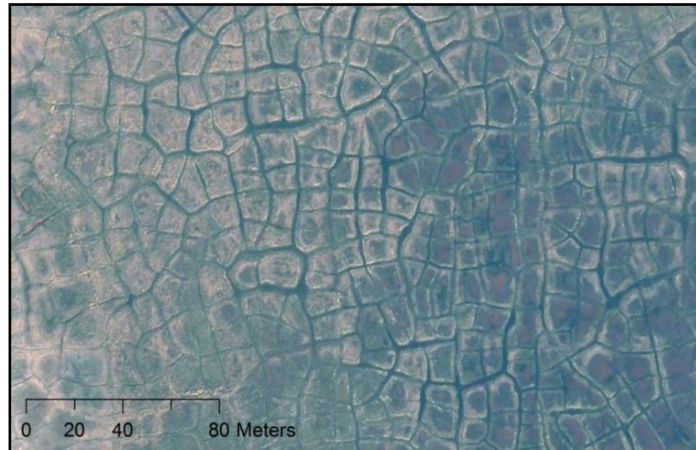


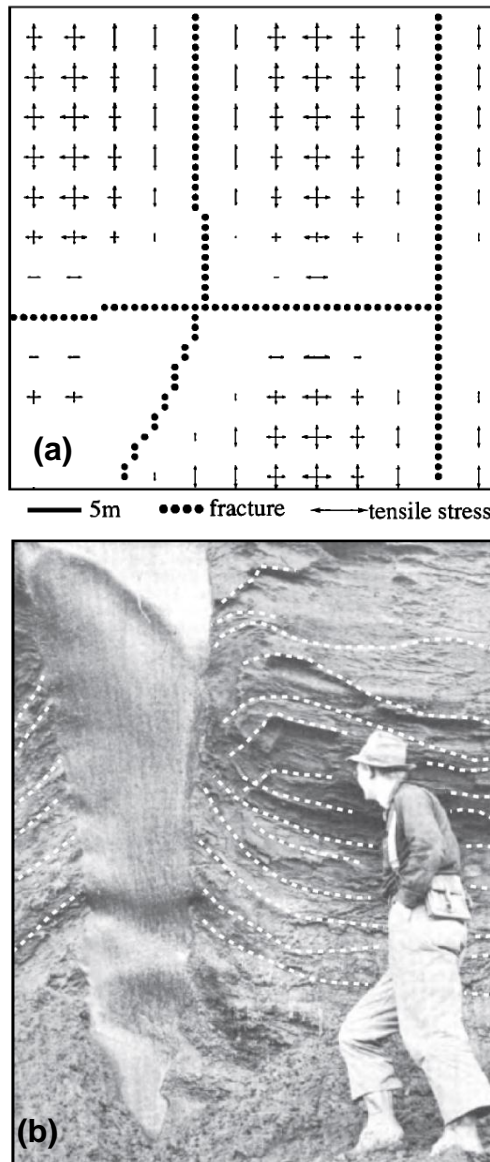
Figura 62: exemplo de regularidade encontrada numa rede em Adventdalen.

As redes de contracção térmica atingem níveis de simetria característicos que outro tipo de padrões na Natureza não atinge, mas o que poderá estar relacionado com as cunhas de gelo que interfira nesta simetria crescente? Haltigin et al. (2010) consideram ter provado a simetria crescente ao longo do tempo, ao distinguirem as cunhas mais largas (considerando-as mais antigas) das mais finas (considerando-as mais recentes) e, desta forma, concluindo que a simetria vai sendo crescente ao longo do tempo. Os resultados de Haltigin *et al.* (2012) estão de acordo com os dados aqui apresentados em 7.2., ou seja, se a variedade das áreas dos polígonos (oposto de simetria) é maior para redes com polígonos maiores, pode-se concluir que quanto mais pequenas as áreas dos polígonos, mais simétricos estes são, independentemente da idade da rede (Fig. 46 a). Mais se acrescenta que essa simetria não é linear com o decréscimo das áreas, aumentando na potência (n). Importa portanto ressaltar que a simetria é crescente com a diminuição das áreas (cunhas mais juntas) não sendo sempre uma função directa do “tempo”. A diminuição das áreas é que pode ser função da velocidade do desenvolvimento das cunhas, dependendo portanto sempre do tempo, mas também das granulometrias finas, gradientes de temperatura, quantidade de gelo no solo e outros factores envolvidos no favorecimento do seu desenvolvimento.

Relativamente à questão da simetria e subdivisão (que se pensa assumida, pois os polígonos não crescem, as cunhas sim) alguns autores dão alguma atenção ao termo libertação de tensão (Lachenbruch, 1963; Plug & Werner, 2001, 2008). Uma cunha de gelo contrai de facto a muito baixas temperaturas, mas também expande o seu volume provavelmente durante a maior parte do ano. Neste sentido, pouca atenção tem sido dada ao espaço ocupado pela cunha durante o seu crescimento e ao seu efeito no solo que lhe é adjacente. Segundo Mackay (2000), o crescimento gradual do gelo na cunha provoca o deslocamento lateral e para cima do solo. Essa secção de solo estará provavelmente mais compactada que o centro do polígono.

A hipótese que aqui se propõe é a da existência de uma proporcionalidade entre a quantidade dessa expansão e a compactação do solo envolvente das cunhas. Nesse caso, faz todo o sentido não existirem cunhas paralelas, paralelas e juntas. De facto, o deslocamento lateral a que Mackay (2000) se refere deve oferecer maior resistência à expansão, crescimento ou abertura de uma nova cunha.

Existem muitos padrões poligonais na Natureza; por exemplo, os padrões de dessiccação nas argilas são semelhantes a algumas redes poligonais mais caóticas que surgem nas vertentes de Adventdalen, mas padrões perfeitamente simétricos (muito subdivididos) estão sempre associados a zonas de permafrost contínuo ou descontínuo. Poderá a expansão das cunhas, associada à compactação do solo envolvente, estar a limitar o posicionamento e percurso de uma nova cunha? Supondo que sim, em certa medida, essa limitação será tanto maior quanto mais próximas estiverem as cunhas (menores as áreas dos polígonos), o que pode contribuir para a não linearidade desta relação (simetria/áreas).



D Distância entre o solo que está a ser compactado em sentido oposto à abertura da nova cunha, até à nova cunha. Setas representam vectores com direcção e sentido da compactação do solo (de intensidade desconhecida) quando as cunhas crescem lateralmente.

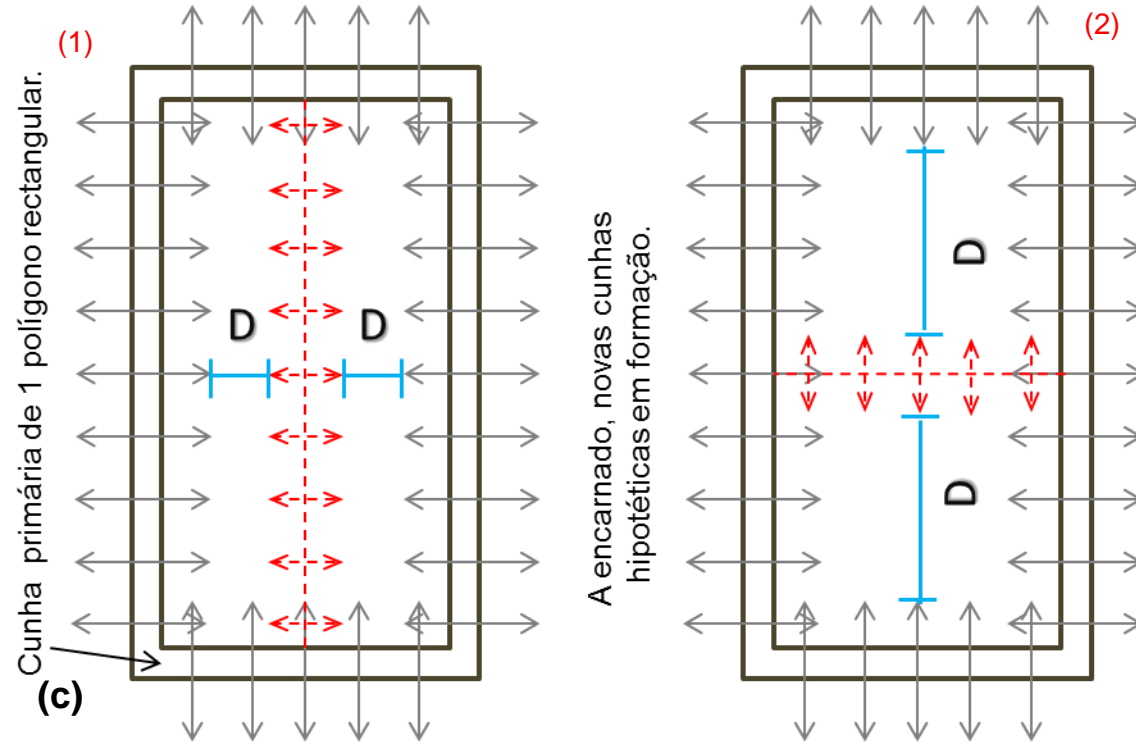


Figura 63: (a) Modelo de tensão de tracção em torno das fracturas, o comprimento das setas representa a intensidade (adaptado de Plug & Werner, 2001), (b) Cunha de gelo exposta, visível deformação dos estratos envolventes (adaptado de Pêwé, 1963), (c) modelo de formação de cunhas hipotéticas na subdivisão de um polígono rectangular.

Na figura 63 (a), apresenta-se um esquema de um modelo de tracção em torno de uma cunha de gelo (Plug & Werner, 2001). Não obstante, trocando os sinais, por exemplo, poderíamos obter antes a compactação do solo transmitida pelo alargamento das cunhas e a sua distribuição no terreno, obviamente não de uma forma tão linear. Esta será uma hipótese para começar a investigar a simetria de cunhas muito próximas.

Tomemos o exemplo da figura 63 (c); propõe-se que o crescimento de uma nova cunha no interior de um polígono de uma rede, está dependente, entre todos os outros factores, do maior afastamento dos vectores normais às cunhas envolventes (primárias) e de sentido oposto ao crescimento da nova cunha (ilustrado com um D).

Na figura 63 (c), segundo a hipótese proposta, a subdivisão hipotética (2) é a mais provável de ocorrer, contudo é necessário saber como e porquê. A figura 64 com um detalhe da rede 81 ilustra essa situação, em que as cunhas secundárias seguem aparentemente o percurso de menor resistência, sendo também o que minimiza a assimetria.



Figura 64: Exemplo da tendência de aumento da simetria numa rede em Adventdalen, onde cunhas secundárias seguem dividem os polígonos antecedentes paralelamente ao seu eixo mais curto.

Em casos mais complexos, como os de polígonos assimétricos, para se saber a direcção do alargamento das cunhas será necessário introduzir o estudo dos ângulos. É algo não efectuado neste trabalho, mas que se pretende incluir em trabalho futuro.

Uma cunha não-primária, mesmo nos polígonos mais assimétricos, deve formar-se dentro do polígono (ou no seio de várias cunhas envolventes) na zona intermédia, ou seja, a mais distante dos vectores normais às cunhas primárias, que representam a direcção, sentido e intensidade da compactação do solo em torno das cunhas primárias.

Quanto mais pequenos forem os polígonos, isto é, quanto mais próximas estiverem as cunhas, maior deverá ser este efeito. Por outro lado, em redes com polígonos grandes, ou com cunhas relativamente afastadas, os factores dominantes na determinação do seu desenho poderão ser maioritariamente topográficos ou estar relacionados com variações térmicas, com o solo ou mesmo o nível de humidade ou radiação recebida.

A influência da compactação do solo, provocada por cunhas adjacentes, no destino ou percurso da cunha em formação, só se fará sentir realmente quando as áreas forem mais pequenas e as cunhas estejam muito próximas. Logo, se a subdivisão for uma função de potência (n), semelhante a uma progressão geométrica, naturalmente a simetria (causada por este efeito) terá um comportamento igualmente de potência (n). Daí que se manifeste visualmente nas redes de contracção térmica, essencialmente em polígonos de áreas bastante pequenas.

French (2007, Fig. 6), debate a questão das ligações ortogonais e hexagonais, começando por mencionar que os trabalhos de Lachenbruch (1962, 1966), indicam que uma rede com tendência hexagonal evoluirá para uma rede com tendência a ter ligações ortogonais. Mais tarde French (2007, pág. 121), acaba por questionar estas conclusões e relembra que as redes de Beacon Valley (Antártida) são provavelmente as mais antigas na Terra em ambiente frio, e exibem uma tendência hexagonal. Porém, trata-se de cunhas de areia, logo poderá não se aplicar a hipótese de simetria/assimetria aqui apresentada e verificada em cunhas de gelo próximas.

13. CONCLUSÕES

Tendo em conta que o tema é complexo e que envolve demasiadas variáveis, este é um assunto de fácil dispersão. Não obstante, o objectivo principal de tentar progredir na compreensão de alguns dos mecanismos envolvidos na evolução de redes poligonais, onde as ligações hexagonais surgem associadas à predominância de vértices trivalentes e as ligações ortogonais associadas à predominância de vértices tetravalentes, foi conseguido.

O que ocorre com mais frequência em Adventdalen em termos de redes é um processo intermédio entre dois casos extremos, ilustrados na Figura 26. As redes que estão a passar por este processo intermédio apresentam padrões mais aleatórios, e os padrões mais aleatórios estão invariavelmente associadas a áreas maiores (polígonos) e valências menores (vértices), razão pela qual foi necessário investir numa abordagem topológica e geométrica quantitativa das redes.

Vários parâmetros foram obtidos a partir dos polígonos digitalizados, beneficiando da sua organização numa geodatabase. Considera-se que tanto os parâmetros geométricos como os topológicos permitiram avanços na compreensão da evolução das redes poligonais.

No entanto, algumas medidas efectuadas à escala do polígono individual, de interesse muito local, como por exemplo o alongamento e *compactness*, só poderão ser exploradas devidamente quando se tiver um MDT de melhor resolução horizontal do que o que foi utilizado (20 m/pixel).

Relativamente aos efeitos da topografia e substrato na geometria dos polígonos, alguns casos foram isolados em relação ao outro parâmetro. A rede 15 foi isolada em termos de efeitos do substrato por não apresentar grande declive; os resultados não são novos, já que granulometrias mais grosseiras e desordenadas geram polígonos maiores e assimétricos. Na rede 47 isolou-se o factor topográfico, uma vez que esta assenta sobre o mesmo substrato. A geometria dos polígonos nesta rede varia bastante quanto às áreas. Mais especificamente, numa zona de depressão, onde as áreas são muito menores, este efeito indirecto da topografia pode estar relacionado com o efeito directo da mesma na drenagem e uma maior infiltração de água nas cunhas naquela zona.

Em termos de idade das redes, e de acordo com Ulrich *et al.* (2011), os polígonos mais pequenos, tanto em Marte como na Terra, são os mais recentes e mais recentemente activos, bem como formados em material de granulometria fina e rico em gelo. No entanto, é importante que algumas distinções fiquem claras, pois os polígonos pequenos são os mais

recentes apenas dentro da mesma rede. Os polígonos pequenos estão presentes certamente numa rede bem desenvolvida (pois esta já se subdividiu) apenas por uma de duas razões: ou porque esta é realmente antiga, ou porque se desenvolveu a uma velocidade maior, aí sim dependendo do material e de todas condições favoráveis ao aceleração do crescimento das cunhas. Isto significa que uma rede realmente nova terá cunhas afastadas, aleatórias ou mesmo incompletas (Fig.61 a).

Em Adventdalen encontramos os dois casos de redes bem desenvolvidas, tanto recentes como antigas; uma (recente) em sedimentos não consolidados, zona plana e com boas condições de drenagem, que favoreceram o desenvolvimento e aceleração do crescimento de cunhas - rede 81, já no Quarternário; a outra, a rede 47, apresenta-se numa formação do Triássico Superior e apresenta ligações ortogonais, mesmo nas zonas de convexidade, tem também polígonos muito pequenos e é bem desenvolvida e encontra-se numa vertente, podendo mesmo ser a mais antiga das 17 estudadas. Relembre-se que, segundo Malmström *et al.* (1973), que encontrou uma relação directa entre a abertura da cunha à superfície e a largura da cunha de gelo, as cunhas mais antigas e bem desenvolvidas encontram-se nos terraços mais elevados.

Algumas dúvidas foram levantadas nas Figuras 50 (c) e 51 quanto à possível existência de redes formadas em material fluvial recente. Podem não se ter desenvolvido redes, mas existem cunhas suficientes para formar um filamento de polígonos (Fig. 50 c); já no centro do vale, uma grande área de material fluvial recente é desprovida de polígonos. Compreender as condições vigentes onde as estruturas (redes) não ocorrem, quando ocorrem metros ao lado, pode ser tão importante como estudar o local onde ocorrem, pelo menos no sentido de nos indicar o que é desfavorável ao seu desenvolvimento. Neste caso, tendo em conta as duas situações encontradas (Figuras 50 c e 51), é de supor que o excesso de drenagem superficial e transporte de material associado no centro do vale não permite de alguma forma a estabilidade necessária á formação das redes que, a avaliar pela figura 51, podem ter uma formação relativamente rápida. No entanto, as redes estão sempre associadas a corpos de água; por exemplo, observações de campo permitiram verificar que redes alagadas tinham polígonos mais pequenos (rede 94 com mais água e 102 com menos água, ambas na mesma margem, observações realizadas no mesmo ano, com diferenças tão consideráveis que as cunhas da rede 94 formavam pequenos lagos que obrigaram ao uso de galochas). Todas as redes ao longo do vale são desenvolvidas perto de linhas de água mas nunca atravessadas pelas mesmas, podendo haver uma forte relação com o escoamento sub-superficial ou hipodérmico, que tenha fortes implicações na saturação do solo das redes. Se de facto o escoamento hipodérmico tiver um papel mais influente que a

própria drenagem superficial, nestas estruturas, esse facto pode fazer sentido também em Marte.

Também Ulrich *et al.* (2011) encontraram em Adventdalen, na sua área de estudo AD4, polígonos irregulares com ligações não ortogonais em altitudes maiores mas na zona inferior do declive da mesma área de estudo encontraram polígonos com ligações maioritariamente ortogonais. O que pode estar relacionado, não com o efeito directo da topografia, mas com o efeito que esta tem na drenagem. Os resultados de Ulrich *et al.* (2011), obtidos através das estatísticas multivariadas aplicadas às redes de Adventdalen, revelam que as diferenças geomorfométricas dos polígonos estão sobretudo relacionadas com condições topográficas. Concluíram que “algo” relacionado com a topografia deve variar (gelo no solo, humidade condutividade térmica, cobertura de vegetação e neve). Ficaram no entanto surpreendidos quando os mesmos resultados indicaram que o ângulo de declive e as orientações de encostas têm um papel menor no conjunto dos seus polígonos. O mesmo se verificou com as regressões lineares múltiplas apresentadas no ponto 8 desta tese: ao introduzir-se variáveis relacionadas com o declive e mesmo com a orientação de encostas, a colinearidade dos modelos aumentava bastante, ao ponto de inflacionar a significância das variáveis predicatorias. Porém, Ulrich *et al.* (2011), não mediram a curvatura nem determinaram a rede de drenagem, duas variáveis dependentes da topografia e que revelaram ter grande influência na variedade das áreas dos polígonos aqui estudados.

Relativamente à subdivisão das redes, a partir do momento em que esta é uma certeza (a densidade em função das áreas é uma função decrescente), isto é, os polígonos nunca vão crescer, podemos assumir que as relações topológicas e geométricas numa mesma rede são sempre indissociáveis. Quer isto dizer que quando se divide um polígono em dois ou mais polígonos, as áreas vão diminuir, e aumentar números (de polígonos) e ligações (valências). Se a topologia muda, a geometria também é obrigada a mudar: em número, em forma e em área. A área dos polígonos diminui, o número aumenta, resta compreender porque é que a geometria tende a uniformizar-se durante este processo.

As redes de contracção térmica não têm um comportamento como as de dessecação, por exemplo, que formam um padrão mais caótico em que há um comportamento sazonal, há diminuição de tamanhos e há tendência para a simetria.

No gráfico (a) da figura 46, vemos que a variedade das áreas ou assimetria (para o conjunto destas 17 redes) cresce em função da potência das suas áreas com um elevado ajuste da função potência ($R^2= 0.912$), sendo a potência $n=0.684$. O gráfico (a) da figura 47 mostra que a variedade das áreas ou assimetria (para o conjunto destas 17 redes) decresce em

função da potência da densidade das redes, com um ajuste da função potencia de também de $R^2 = 0.912$, sendo a potência $n = -0.684$.

Segundo os trabalhos desenvolvidos por Christiansen (2005), que monitorizou as temperaturas hora a hora de um polígono *low-centred* (ligeiramente côncavo), tanto na parte superior da cunha (coberta de neve) como na zona de talude ou declive para o centro do polígono, as primeiras fendas surgiram entre o centro e talude do polígono. Supostamente porque a cobertura de neve é menos espessa do que na zona imediatamente acima da cunha. Isto significa que as amplitudes térmicas na zona de declive a dirigir-se para o centro do polígono são maiores, por não existir protecção da neve. Mas uma vez formada uma fenda importa, no sentido do objectivo desta tese, perceber porque percorre um determinado percurso e não outro. A compactação do solo pode ser uma característica chave no desenvolvimento de redes inteiras, isto assumindo que as redes do Quaternário na zona plana do vale se desenvolveram rapidamente em sedimentos essencialmente soltos, não consolidados, logo pouco compactados. Assim, a compactação do solo poderá ser também um factor chave no percurso percorrido em perfil pelas próprias cunhas.

No exemplo da figura 63 (c), vemos o percurso de uma nova cunha: porque se formaria a cunha hipotética de forma a contribuir para assimetria da rede (1) ou de forma a contribuir para a simetria (2)?

Resumindo, a hipótese proposta, que inclui a formação da cunha hipotética (2) como apresentada na figura 63 (c), é a seguinte:

I. Cunhas bastante afastadas que geram polígonos grandes têm tendencialmente formas aleatórias – o desenho (em perfil, percurso) de novas cunhas, deverá está maioritariamente dominado pela dependência de factores reológicos locais, topográficos, etc. A compactação do solo em torno de cunhas antecessoras possivelmente não chega a ter alcance ou influência (geralmente com fraca simetria).

II. Cunhas bastante próximas geram polígonos pequenos, tendencialmente com formas quadradas ou rectangulares quando levemente afectados pela topografia – o desenho (percurso) de cunhas novas deverá está maioritariamente dominado pela dependência da compactação infligida ao solo pelas cunhas antecessoras envolventes. O percurso poderá ser o de menor resistência, tendo em conta a direcção, sentido e intensidade dos vectores normais às cunhas envolventes. (Geralmente com simetria elevada, em que mesmo polígonos mais rectangulares são subdivididos no sentido de minimizar a diferença entre os lados, Fig. 64).

Entre os dois pontos anteriores existirá uma fase intermédia que faz a ligação entre os dois extremos (I. e II.) e poderá gerar as curvas da função potência típicas destas redes (variedade/áreas, Fig. 46 a) e (variedade/densidade, Fig.47 a).

14. Trabalho Futuro

O trabalho no âmbito deste tema prossegue, tendo sido efectuada a recolha de dados quanto às variações da profundidade da camada activa, que serão explorados quanto à sua importância como factor de controlo na formação de cunhas e consequentemente polígonos. Ulrich *et al.* (2011) sintetizam numa tabela um resumo de revisão bibliográfica sobre factores de controlo e respectivos efeitos no crescimento de cunhas e ou orientação de polígonos.

Tabela 31: compilação da literatura de condições climáticas e sub-superficiais em relação a várias propriedades de polígonos de contracção térmica (Adaptado de Ulrich et al., 2011).

Indicador	Factores de Controlo	Efeitos	Referência
Formação de Polígonos	Temperatura do solo e do ar, granulometria	Em lodo, argila e turfa: <-3° C, em areia e cascalho: -8 ° C a -10 ° C	Washburn (1979); Romanovskii (1985); Yershov (2004)
Diâmetro dos Polígonos	Isolamento	Limita a abertura de fendas no gelo	Washburn (1979); French (2007)
	Gradiente de temperatura Reologia do solo congelado	Gradiente grande → Clima mais severo → Polígonos menores Conductividade do calor (granulometria, quantidade de gelo) → granulação fina, alta concentração de gelo → Polígonos menores	Yershov (2004); French (2007) Lachenbruch (1962, 1966)
Forma dos Polígonos	Zonas livres de tensão	Ortogonal → Perto da superfície de arrefecimento → Com maior espaçamento	Romanovskii (1977)
	Homogeneidade do solo Fase de desenvolvimento	Padrões hexagonais - equilíbrio de tensão Fissuração secundária → subdivisão de polígonos → mais regulares e ortogonais	Lachenbruch (1962); French (2007) Lachenbruch (1966); French (2007)
Orientação dos Polígonos	Alívio de tensão	Orientada se livre de tensão nas superfícies verticais (ou seja, anisotropia de força)	Lachenbruch (1962)
Redes de Polígonos	Drenagem	Redes pequenas → declive <27° Redes grandes → declive até 31°	Washburn (1979)
Formação de Cunhas de Gelo ou Areia	Humidade atmosférica e no solo	Aridez elevada → polígonos com cunhas de areia	Péwé (1959); Black (1976); French (2007)
Formação de Polígonos com Cunhas de Gelo	Temperatura do solo, granulometria	Em argila → < -2° C , em cascalho <-6° C	Romanovskii (1985)

De todos os factores de controlo e efeitos indicados na literatura, não é mencionada pelos principais autores envolvidos no tema: a variabilidade da profundidade da fusão da camada activa no plano, isto é, ao longo de alguns metros no plano horizontal, e o efeito desta nos polígonos ou na rede. No entanto, a conclusão estatística dos mesmos autores bem como a conclusão estatística aqui apresentada implica que há um factor que varia com a topografia, mas que não se trata nem do declive nem da orientação de encostas.

O estudo de Gomersall e Hinkel (2001) indica existir pouca variabilidade desta profundidade em pequenas distâncias no plano (em várias direcções) em zonas costeiras planas; já em vertentes, a profundidade da camada activa pode variar no plano em distâncias tão curtas como cerca de 3 metros, quando nas zonas costeiras varia apenas em intervalos de cerca de 100m de distância. Estes resultados também têm muitas semelhanças com a morfologia (simetria/assimetria) dos polígonos mapeados em vertentes e em zonas planas no vale de Adventdalen.

Este factor de controlo pode produzir efeitos no sentido de que uma menor profundidade de fusão poderá acelerar o crescimento de cunhas, logo a subdivisão poligonal, gerando polígonos menores. Enquanto uma profundidade de fusão grande poderá ter o efeito oposto, levando a um crescimento de cunhas lento, e logo a uma subdivisão lenta, permitindo a inalterabilidade de polígonos maiores, isto considerando o mesmo intervalo de tempo e o mesmo tipo de solo. Adicionalmente, como a figura 65 ilustra, uma maior profundidade de fusão implica uma maior distância a ser percorrida pela água que penetra a cunha por infiltração no solo, logo é possível que também exista maior dispersão da água líquida, pelo caminho, até à chegada à cunha propriamente dita. Neste sentido a partir de dados já recolhidos em campo numa rede de Adventdalen, pretendo a partir do mapeamento da profundidade da camada de activa encontrar correlações estatísticas, significantes, com a geometria dos polígonos.

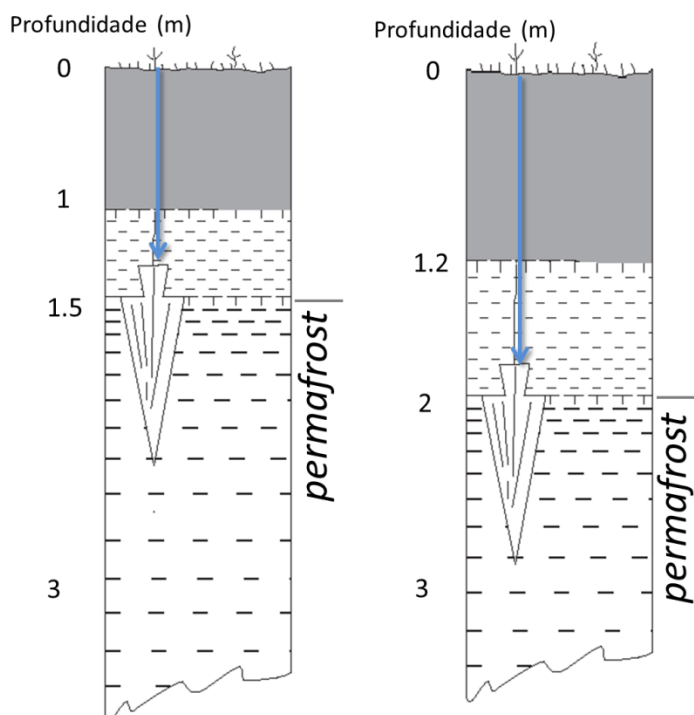


Figura 65: comparação entre diferentes profundidades de fusão, e implicação na infiltração da água, sobre o modelo de três camadas (modificado de Nelson 2004, Shur et al., 2005 e French, 2007).

Um segundo tema a incluir no trabalho futuro e que vem ainda no seguimento do que aqui se apresentou, é o estudo dos ângulos internos dos polígonos.

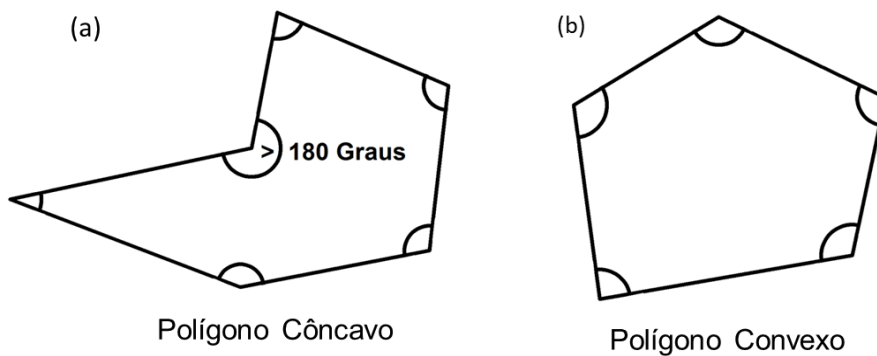


Figura 66: (a) Exemplo de um polígono considerado côncavo, apresenta pelo menos um ângulo interno superior a 180° (b) Exemplo de um polígono considerado convexo, apresenta todos os ângulos internos inferiores a 180° .

Depois de digitalizar mais de 10 000 polígonos, houve uma familiarização com padrões recorrentes. Um deles (polígonos côncavos) tornou-se num alerta durante o próprio processo de digitalização, por estar associado a outra característica. Quando surgem polígonos côncavos nas redes em Adventdalen estes têm invariavelmente uma cunha nova (mais fina) nem sempre bem visível a partir da intersecção que apresenta um ângulo interno superior a 180° ; assim, durante uma ou mais vistorias à digitalização feita, foram encontradas cunhas bastante finas a subdividir polígonos côncavos a partir dessa concavidade; em resultado, passavam assim a existir dois polígonos convexos ao invés de um côncavo.

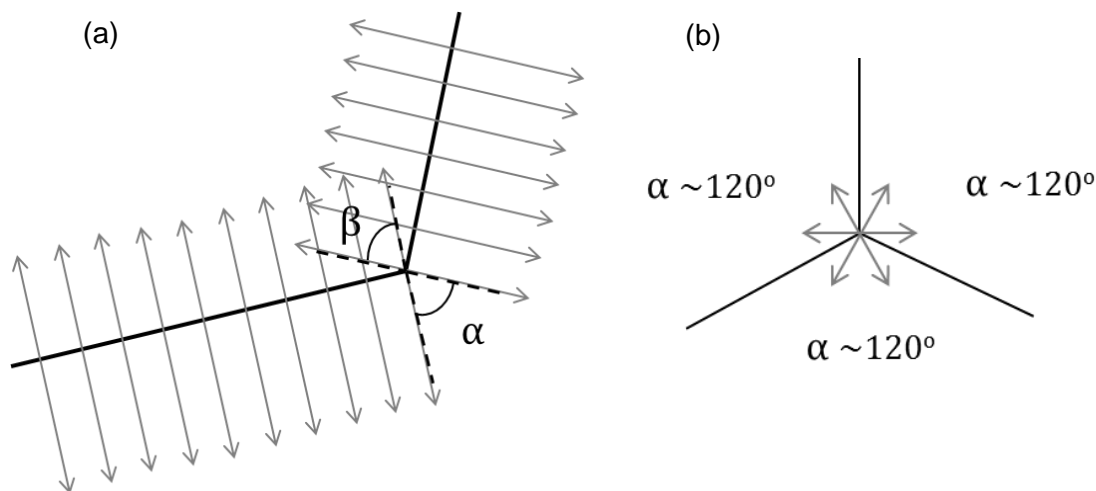


Figura 67: (a) Setas representam o afastamento ou compactação do solo à medida que as cunhas crescessem, são vectores normais às cunhas, a intersecção de um ângulo interno (Fig. 66 a), deixa um espaço em alfa que não é submetido à mesma compactação que ocorre em redor das restantes cunhas, (b) nesta situação ilustram-se cunhas com uma ligação hexagonal perfeita (120°), os vectores normais estão representados apenas no centro da intersecção e mostram que existe um equilíbrio.

A figura 67 ilustra em maior pormenor em (a), a ligação côncava da figura 66 (a). À semelhança da representação que foi feita na figura 63 (c), as setas indicam a direcção e sentido da compactação do solo envolvente como resultado do alargamento das cunhas de gelo. Em 67(a) existe claramente um espaço “aberto” no centro de alfa (ângulo interno também da figura 66 a), de onde podem partir cunhas sem metade da resistência a que estariam expostas no lado oposto, onde se situa o ângulo beta, que terá os mesmos graus, mas mais do dobro da compactação no solo. Na figura 67 (b), a ilustração tem apenas os vectores no centro da intersecção; esta é uma intersecção hexagonal, os vectores (setas) representados são absolutamente normais às cunhas (linhas a preto) e parecem estar em equilíbrio, isto é igualmente distribuídos. Qualquer alteração nos ângulos gerados pelas cunhas (linhas a preto) gera um desequilíbrio onde irá surgir um espaço “alfa” e um espaço “beta”, por mais pequenos que sejam. No âmbito do estudo dos ângulos, para iniciá-lo, pretendo criar uma forma ou rotina de cálculo automático no ArcGIS 10.0[®] de ângulos internos (*toolbox*) para uma rede inteira. A figura 68 ilustra alguns exemplos práticos, de polígonos não convexos, encontrados ao longo do vale de Adventdalen.



Figura 68: Exemplos práticos de polígonos côncavos retirados aleatoriamente de várias redes ao longo do vale, (ortofotomapas de imagens aéreas do IPN).

15. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTER Global Digital Elevation Map <http://asterweb.ipl.nasa.gov/gdem.asp>

Bandeira L., Pina P., Saraiva J., 2010, A Multi-Layer Approach for the Analysis of Neighbourhood Relations of Polygons in Remotely Acquired Images. *Pattern Recognition Letters*, Vol. 31, no. 10, pp. 1175-1183.

Black, R. F., 1976, Periglacial features indicative of permafrost: Ice and soil wedges. *Quaternary Research*, Vol. 6, pp. 3-26.

Brunsdon, C., 1995, Estimating probability surfaces for geographical point data: An adaptive kernel algorithm. *Computers & Geosciences*, Vol.21, No.7, pp. 877-894.

Christiansen H. H., 2005, Thermal regime of ice-wedge cracking in Adventdalen, Svalbard. *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 16, pp. 87-98.

Cramer M. , Stallmann D. , Haala N., 2000, Direct Georeferencing Using Gps/inertial Exterior Orientations For Photogrammetric Applications, in international archives of photogrammetry and remote sensing, Vol. 33 part b3

Craw I., 2000, Advanced Calculus and Analysis, Version 1.3, Department of Mathematical Sciences, University of Aberdeen, DSN: mth200-101982-8.

Dale M.R.T., Dixon P., Fortin M.J., Legendre P., Myers D. E. & Rosenberg M. S., 2002, Conceptual and mathematical relationships among methods for spatial analysis. *Ecography*, Vol. 25, No.5, pp. 558-577.

Dallmann W.K., Kjærnet T., Nøttvedt A., 2001, Geological map of Svalbard 1:100,000 Sheet C9G Adventdalen. Temakart No. 31/32. Norwegian Polar Institute; 4–55.

Diggle P., 2003, *Statistical Analysis of Spatial Point Patterns*. 2nd ed. Arnold, 159 pp., London.

Dorai-Raj S. S., 2001, First- and Second-Order Properties of Spatiotemporal Point Processes in the Space-Time and Frequency Domains, Doctoral Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.

Fisher R.A., Thornton H.G., Mackenzie W.A., 1922, The Accuracy of the Plating Method of Estimating the Density of Bacterial Populations. *Annals of Applied Biology*, Vol. 9 Issues 3-4, pp. 325-359.

French H. M., 2007, *The Periglacial Environment*, Third Edition. J. Wiley and Sons Inc: Chichester, England, 458 pp.

French H.M. and Shur Y., 2010, The principles of cryostratigraphy. *Earth-Science Reviews*, Vol. 101, Issues 3-4, pp. 190-206.

Garbrecht J., and Martz L.W., 1995, TOPAZ: An Automated Digital Landscape Analysis Tool for Topographic Evaluation, Drainage Identification, Watershed Segmentation, and Subcatchment Parameterization: Overview, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS Publication No. NAWQL 95-1, 17 pp.

Gatrell A. C., and Bailey T. C., and Diggle P. J., and Rowlingson B. S., 1996, Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology. Transactions of the Institute of British Geographers, Vol. 21, pp. 256-274.

Geospatial Modelling Environment tools for Arcgis© 10.0, versão: (GME 0.7.2.0 RC2 (GUI)), Copyright (c) 2009-2012 Spatial Ecology LLC

Getis A., 1991, Spatial interaction and spatial autocorrelation: a cross-product approach. Environment and Planning, Vol. 23, pp. 1269–1277.

Gomersall C. E. & K. M. Hinkel, 2001. Estimating the Variability of Active-Layer Thaw Depth in Two Physiographic Regions of Northern Alaska. Geographical Analysis, Vol. 33, Issue 2, pp. 141-155.

Haltigin T., Pollard W., Dutilleul P., 2010, Comparison of ground- and aerial-based approaches for quantifying polygonal terrain network geometry on Earth and Mars via spatial point pattern analysis. Planetary and Space Science, Vol. 58 No. 12 pp. 1636-1649

Haltigin T.W., Pollard W.H., Dutilleul P., Osinski G.R., 2012, Geometric Evolution of Polygonal Terrain Networks in the Canadian High Arctic: Evidence of Increasing Regularity over Time. Permafrost and Periglacial Processes, Vol. 23, Issue 3, pp. 178-186.

Harris C. and Murton J.B., 2003, The experimental simulation of ice-wedge casting Permafrost, Phillips, Springman & Arenson (eds) © Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 582 7

Harris C., Murton J., 2005, Experimental simulation of ice-wedge casting: processes, products and palaeoenvironmental significance. Geological Society, London, Special Publications, No. 242 pp. 131-143

Harry D. G., Gozdzik J.S., 1988. Ice-wedges: Growth, thaw transformation and paleoenvironmental significance. Journal of Quaternary Science, Vol.3, Issue 1, pp. 39-55.

Härtel S., 2011, Formation and dynamics of Holocene ice-wedge polygons in Lower Adventdalen, Svalbard, Master Thesis, University Centre in Svalbard.

Illian J., Penttinen A. , Stoyan H., and Stoyan D., 2008. Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 519-526.

Jenks, George F., 1967, "The Data Model Concept in Statistical Mapping", International Yearbook of Cartography, Vol. 7, pp. 186-190.

Lachenbruch A. H. 1962, Mechanics of thermal contraction cracks and ice-wedge polygons in permafrost, Geological Society of America Special Paper No. 70, pp. 68.

Lachenbruch Arthur H., 1963. Contraction Theory of Ice-Wedge Polygons: A Qualitative Discussion, Permafrost International Conference, Publication No. 1287, pp. 63-70.

Landvik J. Y., Mangerud J., Salvigsen O., 1987, The Late Weichselian and Holocene shoreline displacement on the west-central coast of Svalbard. *Polar Research*, Vol. 5, pp. 29-44.

Landvik J. Y., Salvigsen O., 1985, Glaciation development and interstadial sea-level on central Spitsbergen, Svalbard. *Polar Research*, Vol. 3 pp. 1-10.

Lewis F.T., 1928, The correlation between cell division and the shapes and sizes of prismatic cells in the epidermis of cucumis. *Anat. Rec.* Vol.38, pp. 341–376.

Lewis F.T., 1931, A comparison between the mosaic of polygons in a film of artificial emulsion and the pattern of simple epithelium in surface view (cucumber epidermis and human amnion). *Anat. Rec.* Vol. 50, pp. 235–265.

Lousada M., Cardoso M., Saraiva J., Pina P., Vieira G., Christiansen H. H., 2012, Ice-wedge polygonal networks and depth of active layer thaw, a case study in Svalbard, Norway, Livro de Resumos da IV Conferência Portuguesa das Ciências Polares , IST, Lisboa, Portugal, pp. 43-44.

Mackay J.R., 1986, The first 7 years (1978–1985) of ice-wedge growth, Illisalik experimental drained lake site, western Arctic coast. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 23, Issue 11, pp.1782–1795.

Mackay J.R., 2000, Thermally induced movements in ice-wedge polygons, western arctic coast: a long-term study. *Geographie physique et Quaternaire*, Vol. 54, pp. 41-68.

Major H. and Nagy J., 1972, Geology of the Adventdalen map area, Svalbard. 1: 100,000, sheet C9G Adventdalen, Skrifter NR. 138. Norwegian Polar Institute; 5-56.

Major H., Haremo P., Dallmann W.K., Andresen A., 2001. Geological map of Svalbard. 1: 100,000, sheet C9G Adventdalen (revised after Major 1964), Norsk Polarinstitut. Temakart nr. 31.

Malmström B., Nordström S., Palmér O., 1973, Iskilpolygoner i Adventdalen, Spetsbergen (Ice-wedge polygons in Adventdalen, Spitsbergen). In: Svensson, H., Hellden, U., Malmström, B., Nordström, S., Palmér, O., Åhman, R., Åkerman, J. (Eds.), *Studier i periglacial geomorfologi på Spetsbergen. Rapporter och notiser 15.* Lunds Univerisitet, Naturgeografiska Institution, pp. 4–26 (in Swedish).

Matos M. A., 1995, Manual Operacional para a Regressão Linear, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Matsuoka N., 1999, Monitoring of thermal contraction cracking at an ice-wedge site, central Spitsbergen. *Polar Geoscience* Vol. 12, pp. 258–271.

McCoy J., 2004, ArcGIS 9: Using ArcGIS spatial analyst, ESRI Press, Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA 92373-8100 USA. 233 pp.

Mitchell A., 2005, First Edition, ESRI Guide to GIS Analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics editora: Environmental Systems Research Institute inc.; autor: - isbn 158948116x, 190 pp.

Nelson J., Jones N. and Smemoe C. 1997, From a Grid or Coverage to a Hydrograph: Unlocking Your GIS Data for Hydrologic Applications. Esri 1997 User Conference., www.Esri.com/library/userconf/proc97/proceed.HTM

Paul R. Wolf, Bon A. DeWitt, 2000, Elements of photogrammetry with application in gis, 2000, 3rd Edition, McGraw-Hill, 624 pp.

Perry J.N., Liebhold A. M., Rosenberg M. S., Dungan J., Miriti M., Jakomulska A. & Citron-Pousty S., 2002, Illustrations and guidelines for selecting statistical methods for quantifying spatial pattern in ecological data. *Ecography*, Vol.25, No.5, pp. 578-600.

Péwé L. T., 1963, Ice-wedges in Alaska Classification, Distribution, and Climatic Significance, Permafrost International Conference, Publication No. 1287, pp. 76-81.

FPéwé L. T., 1966, Paleoclimatic significance of fossil ice wedges, *Biuletyn Peryglacjalny*, Vol. 15. pp. 65-73.

Piepjohn K., Stange R., Jochmann M., and Hübner C., 2012, The Geology of Longyearbyen, Longyerbyen Feltbiologiske Forening (LoFF), P.O. Box 694, 9171 Longyearbyen, 35 pp.

Pina P., Saraiva J., Bandeira L., Antunes J., 2008, Polygonal terrains on Mars: A contribution to their geometric and topological characterization, *Planetary and Space Science*, Vol. 56, no. 15, pp. 1919-1924.

Pina P., Saraiva J., Bandeira L., Barata T., 2006, Identification of martian polygonal patterns using the dynamics of watershed contours, *Lecture Notes in Computer Science*, No. 4142, pp. 691-699.

Pina P., Vieira G., Christiansen H.H., Barata T., Saraiva J., Bandeira L., Lira C., Benavente N., Mora C., Neves M., Jorge M., Ferreira A., 2010. Analysis of polygonal terrains on Mars based on Svalbard analogues, LPSC2010-Lunar and Planetary Science XLI, Abs #1372, Lunar and Planetary Institute, Houston, TX, USA.

Plug, L. J. & Werner, B. T., 2001. Fracture networks in frozen ground. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. B5, pp. 8599-8613.

Plug, L.J., Werner, B.T., 2008, Modelling of ice-wedge networks. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(1): 63-69.

Quintela, A. C., 1992, “Engenharia Hidráulica”. História e desenvolvimento da Ciência em Portugal no séc. XX. Publicações do II Centenário da Academia das Ciências de Lisboa, pp. 437-464. Lisboa.

Ray R. J., Krantz W. B., Caine T. N., Gunn, R. D., 1983, A model for sorted patterned-ground regularity *Journal of Glaciology*, Vol. 29, Issue 102, pp.317-337.

Salvigsen O., 1984, Occurrence of pumice on raised beaches and Holocene shoreline displacement in the inner Isfjorden area, Svalbard. *Polar Research*, Vol. 2, 107-113.

Salvigsen O., 2002, Radiocarbon-dated *Mytilus edulis* and *Modiolus modiolus* from northern Svalbard: climatic implications *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography*, Vol. 56, pp. 56–61.

Saraiva J., Pina P., Bandeira L., Antunes J., 2009, Polygonal networks on the surface of Mars; applicability of Lewis, Desch and Aboav–Weaire laws, *Philosophical Magazine Letters*, Vol. 89, No. 3, pp. 185–193.

Schowengerdt, R. A., 2007, *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, 3rd edition, Academic Press, Elsevier, 515 pp.

Shiklomanov, N. I. & Nelson, F. E., 2002, Active-layer mapping at regional scales: a 13-year spatial time series for the Kuparuk region, north-central Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol.13, Issue 3, pp. 219-230.

Shur Y., Hinkel K.M., Nelson F.E., 2005, The Transient Layer: Implications for Geocryology and Climate-Change. *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 16, Issue 1, pp. 5-17.

Smith R.B., 2011, Orthorectification Using Rational Polynomials, Tutorial ©MicroImages, Inc., 2004-2011 <http://www.microimages.com/documentation/Tutorials/rpcortho.pdf>

Sonka, M., Hlavac, V. and Boyle, R., 1993, *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. London: Chapman and Hall, 770 pp.

Sørbel L., Tolgensbakk J., Hagen J.O., Høgvard K., 2001. Geomorphological and Quaternary Map of Svalbard 1:100,000 Sheet C9Q Adventdalen. Temakart No. 31/32. Norwegian Polar Institute; 57–78.

Tolgensbakk J., Sørbel L., Høgvard K., 2001. Adventdalen, Geomorphological and Quaternary Geological map, Svalbard 1:100,000, Spitsbergen sheet C9Q, Norsk Polarinstitut, Temakart nr. 32.

Ulrich M., Hauber E. , Herzsuh U. , Härtel S. and Schirrmeister L., 2011. Polygon pattern geomorphometry on Svalbard (Norway) and western Utopia Planitia (Mars) using high-resolution stereo remote-sensing data , *Geomorphology*, Vol.134, Issue 3, pp. 197-216.

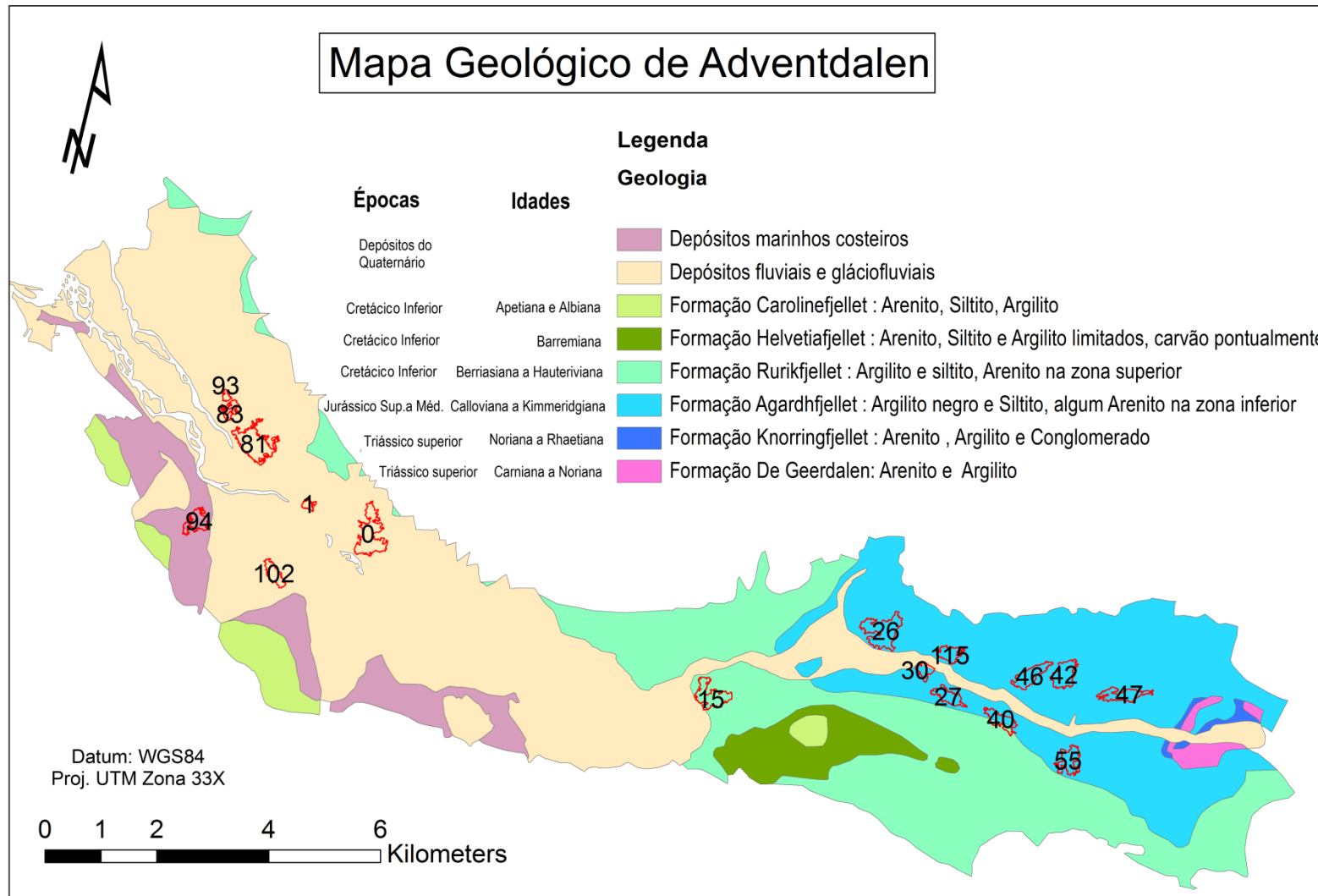
Vieira G., 2004, Geomorfologia dos Planaltos e Altos Vales da Serra da Estrela Ambientes Frios do Plistocénico Superior e Dinâmica Actual, Tese de Doutoramento, Departamento de Geografia, Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa.

Washburn A.L., 1979, Geocryology. A survey of periglacial processes and environments. London, 406 pp.

Worsley D., 2008. The Post-Caledonian development of Svalbard and the Western Barents Sea. Polar Research Vol. 27, pp. 298-317.

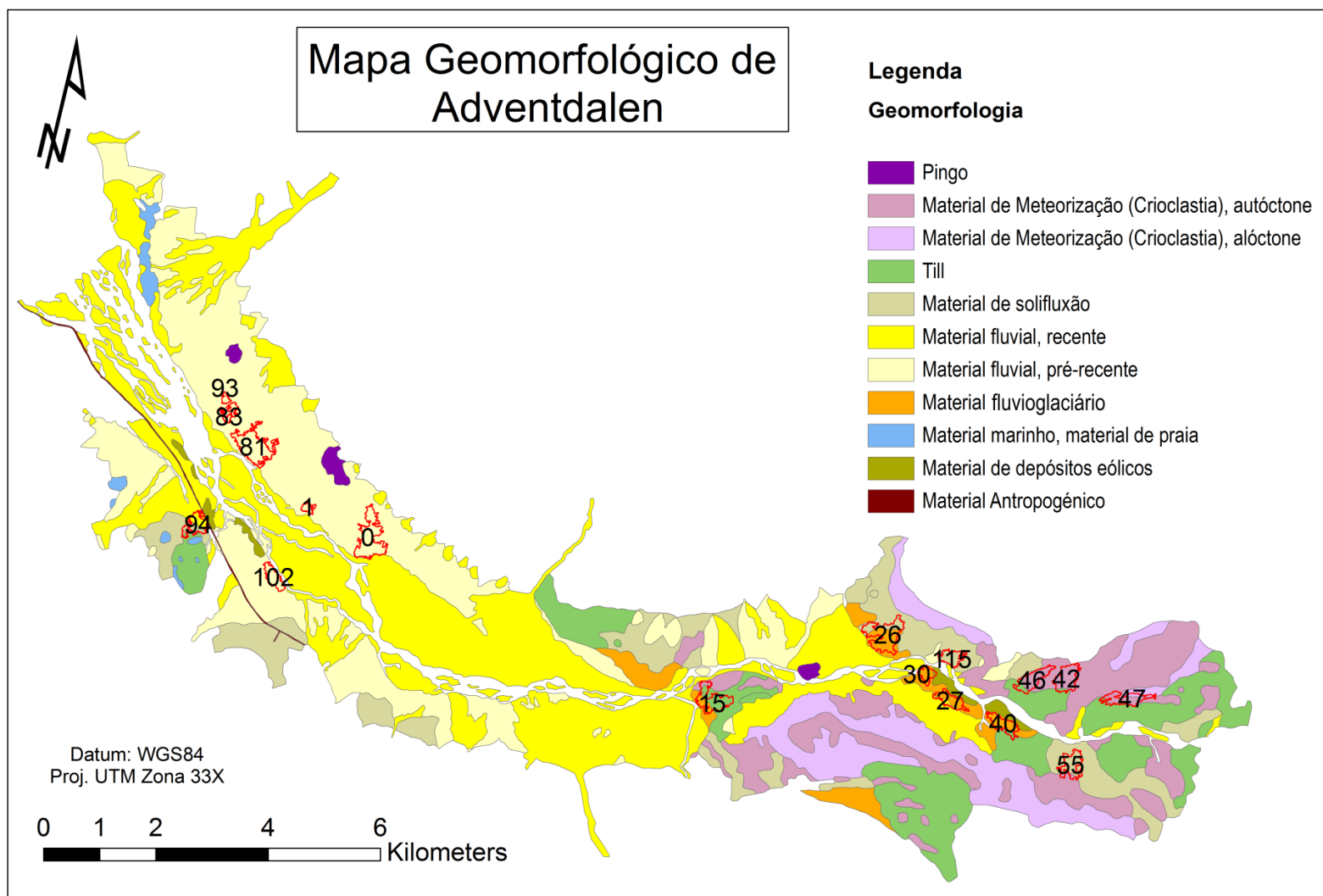
Yong Z. 1995, Symmetry and other geometric constraints of surface networks in nature and science. International Journal of Solids and Structures, Vol.32, No. 2, pp. 173-201.

ANEXO I – MAPA GEOLÓGICO DE ADVENTDALEN



(Adptado de Major *et al.*, 2001)

ANEXO II – MAPA GEOMORFOLÓGICO DE ADVENTDALEN



(Adptado de Tolgensbakk *et al.*, 2001)

ANEXO III –TABELA COM PERCENTAGENS DE OCUPAÇÃO DE UNIDADES GEOLÓGICAS E GEOMORFOLÓGICAS DAS 17 REDES.

ID Redes		0	1	15	26	27	30	40	42	46	47	55	81	83	93	94	102	115	
FORMAÇÕES GEOLÓGICAS (% DE OCUPAÇÃO)	DEPÓSITOS MARINHOS COSTEIROS	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	100	---	---	
	DEPÓSITOS FLUVIAIS E FLUVIOGLACIÁRIOS	100	100	---	---	---	21	---	---	---	---	---	100	100	100	---	100	---	
	ARGILITO E SILTITO, ARENITO NA ZONA SUPERIOR	---	---	100	---	---	---	29	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
	ARGILITO NEGRO E SILTITO, ARENITO NA ZONA INFERIOR	---	---	---	100	100	79	71	100	100	100	100	---	---	---	---	---	100	
FORMAÇÕES GEOMORFOLÓGICAS (% DE OCUPAÇÃO)	MATERIAL DE METEORIZAÇÃO AUTÓCTONE,	---	---	9	---	---	---	---	93	78	72	10	---	---	---	---	---	---	
	MATERIAL DE METEORIZAÇÃO , ALÓCTONE	---	---	---	---	---	---	---	---	---	17	---	---	---	---	---	---	---	
	TILL	---	---	64	---	---	---	14	7	22	10	---	---	---	---	7	---	---	
	MATERIAL DE SOLIFLUXÃO	---	---	---	33	---	---	---	---	---	---	90	---	---	---	41	---	100	
	MATERIAL FLUVIAL, RECENTE	1	---	---	---	20	---	---	---	---	---	---	---	---	---	52	---	---	
	MATERIAL FLUVIAL, PRÉ-RECENTE	99	100	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	100	100	100	---	100	---
	MATERIAL FLUVIOGLACIÁRIO	---	---	27	67	79	92	82	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
MATERIAL DE DEPÓSITOS EÓLICOS	---	---	---	---	---	8	3	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	

ANEXO IV – METODOLOGIA ESQUEMÁTICA PARA ELABORAÇÃO DE UM MAPA DE VARIEDADE DAS ÁREAS.

