

Mapeamento de Lineamentos Morfoestrutural, a partir de Sensoriamento Remoto: Estudo de Caso, Grupo Txitonga, Região de Lupilichi, Província do Niassa, Moçambique

Mapping of Morphostructural Lineaments, using Remote Sensing: A Case Study of the Txitonga Group, Lupilichi Region, Niassa Province, Mozambique

Ângela Carlos Benjamin Macuácu¹  & Clódís de Oliveira Andrades Filho² 

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Programa de Pós-graduação em Sensoriamento-Instituto de Geociências (IGEO), Porto Alegre, Brasil. angelakellycarlos@gmail.com.

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Programa de Pós-graduação em Sensoriamento-Instituto de Geociências (IGEO), Porto Alegre, Brasil. clodis.filho@ufrgs.

Resumo: Durante o evento tectônico do Neoproterozoico, associado ao ciclo orogênico Pan-Africano, ocorreram deformações significativas que culminaram na formação das principais estruturas presentes na região de Lupilichi, localizada no Grupo Txitonga, Moçambique, com uma área aproximada de 2000 km². Este estudo realiza o mapeamento de lineamentos morfoestrutural da área, baseada na análise espacial estrutural, correlacionados à geologia local. Foram utilizados dados de sensoriamento remoto oriundos de produtos de processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus, que permitiram a extração manual e automática de lineamentos, com escala de 1:250.000. A análise foi aprofundada por meio de diagramas de rosetas, para avaliar a orientação predominante de lineamentos. Os resultados mostram uma predominância de lineamentos orientados na direção NE-SW, com comprimentos variando entre 2 e 16 km. A subdivisão da área em quatro compartimentos geomorfológicos (C1, C2, O e P) revelou variações na densidade de lineamentos, sugerindo um maior controle estrutural nas zonas de transição e montanhosas. A correlação entre a densidade de lineamentos e a geologia, indica a influência de estruturas precambrianas, especialmente do Neoproterozoico, na evolução morfoestrutural atual da região.

Palavras-chave: Densidade; Lineamentos morfoestruturais; Neoproterozoico; Copernicus; Grupo Txitonga.

Abstract: During the Neoproterozoic tectonic event, associated with the Pan-African orogenic cycle, significant deformations occurred that culminated in the formation of the main structures present in the Lupilichi region, located in the Txitonga Group, Mozambique, with an area of approximately 2000 km². This study carries out the mapping of morphostructural lineaments in the area, based on structural spatial analysis, correlated to local geology. Remote sensing data from and processing products from the Copernicus Digital Elevation Model (DEM) were used, which allowed manual and automatic extraction of lineaments, with a scale of 1:250,000. The analysis was in-depth using rosette diagrams, to evaluate the predominant orientation of lineaments. The results show a predominance of lineaments oriented in the NE-SW direction, with lengths varying between 2 and 16 km. The subdivision of the area into four geomorphological compartments (C1, C2, O, and P) revealed variations in lineament density, suggesting greater structural control in the transition and mountainous zones. The correlation between lineament density and geology indicates the influence of Precambrian structures, especially from the Neoproterozoic, on the current morphostructural evolution of the region.

Keywords: Density; Morphostructural lineaments; Neoproterozoic; Copernicus; Txitonga Group.

1. Introdução

Os estudos geomorfológicos na região de Lupilichi, pertencente ao Grupo-Txitonga, têm se tornado cada vez mais indispensáveis. Esta análise é essencial para a detecção e identificação de potenciais mineralizações. A diversificada geomorfologia da região de Lupilichi, com variações que vão até cerca de 1800 m de altitude torna a região interessante no ponto de vista tectônico-estrutural, caracterizada por zonas montanhosas associadas a falhas e dobras intensas, como a Serra de Sanga, planaltos e áreas de transição, que refletem processos erosivos mais recentes. A predominância de rochas metassedimentares do Neoproterozoico, com intrusões de pórfiro quartzo-feldspáticos e metagabro, indica uma complexidade litológica, relacionada a uma complexidade tectônica (MAE, 2014).

Essas características a tornam propícia para a realização de estudos morfoestruturais, com potencial de identificação de indicadores de estruturas deformacionais em rochas, permitindo a construção de uma análise de frequência e orientações de lineamentos que podem revelar a influência de atividades tectônicas significativas na evolução deste ambiente. Processos tectônicos são determinantes na formação de feições geológicas e minerais de interesse, especialmente para o estudo de prospecção mineral na área do Grupo Txitonga, localizado na província de Niassa, Moçambique.

O entendimento do contexto geológico e geomorfológico e os processos estruturais atuantes em determinadas áreas podem ser compreendidos a partir do comportamento da rede de drenagem, seus padrões, formas e morfometria, ou seja, fornecem importantes informações que contribuem para a análise do arcabouço tectônico (Howard, 1967; O'Leary *et al.*, 1971; Schumm, 1981; Soares & Fiori, 1976).

O uso de tecnologias de Sensoriamento Remoto (SR) orbital é crucial para o reconhecimento geológico-estrutural em várias escalas. Essa ferramenta permite criar mapas digitais de grandes áreas rapidamente e com custos menores comparados aos métodos tradicionais sem sensoriamento remoto. Isto se deve à alta disponibilidade de dados e possibilidade de geração de imagens melhoradas a partir de técnicas de processamento de imagens que assim permitem a caracterização e interpretação de unidades litológicas e estruturas geológicas.

Estudos recentes em geomorfologia, como o de Clare *et al.* (2022), têm mostrado que o uso de características topográficas tem desempenhado papel fundamental na compreensão da evolução do relevo. O avanço em tecnologias de processamento de dados tem facilitado essa análise, permitindo a criação de modelos digitais de elevação (MDE), possibilitando uma investigação mais precisa das feições tectônicas (Mudd, 2020).

A análise de domínios de lineamentos sobre MDE possibilita apurar os estudos em geomorfologia tectônica, ampliando o entendimento das estruturas geológicas e suas implicações para mineralizações locais. Devido à sua contribuição necessária, a aplicação desses modelos em estudos geoestruturais tem apresentado uma crescente significativa, pois realça nitidamente características topográficas fornecidas por uma visão em terceira dimensão (Andrades-Filho, 2021; Akman & Tüfekçi, 2004; Peña & Abdelsalam, 2006; Masoud & Koike, 2006; Viridi *et al.*, 2006; Lin *et al.*, 2007).

Atualmente, detém-se uma variedade de imagens de dados MDE possíveis de utilização para estudos morfoestruturais, como é o caso de Copernicus DEM (*Digital Elevation Model*), SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (Rabus *et al.*, 2003; Andrades-Filho & Rossetti, 2012), entre outros. Diversos trabalhos relacionados ao mapeamento estrutural demonstram a importância desses dados em ambientes tropicais e

subtropicais, obtendo resultados relevantes, como o estudo realizado por Melo & Rossetti (2015). Tais estudos visaram à extração de lineamentos morfoestruturais de diferentes derivações de MDEs do banco de dados TOPODATA, adquirido pela SRTM, na Depressão do Piraí, situada no Primeiro Planalto do Paraná, que está inserida no contexto do Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil. Assim como realizados por Odigi & Okonny (1986) no sudeste da Nigéria, no Oban Massif, em estudos geológicos estruturais a partir de imagens radar.

Este estudo realiza o mapeamento de lineamentos morfoestruturais da região de Lupilichi, com o objetivo de mapear e analisar feições de relevo, integrando dados de orientação, frequência e avaliação da densidade de lineamentos, extraídos tanto manualmente quanto automaticamente, relacionados à geologia local.

Os resultados desse estudo têm aplicação direta não só na prospecção mineral, mas também no conhecimento tectônico, úteis para estudos futuros. A integração combinada de MDEs e de análise morfoestrutural contribui significativamente para a formação de uma estrutura geomorfológica detalhada, valiosa para a compreensão da estrutura tectônica e da evolução geológica da área de estudo.

2. Caracterização da Área de Estudo

A folha 34, do grau quadrado 1135, está situada na localidade de Lupilichi, Distrito do Lago na Província de Niassa. De acordo com a cartografia nacional de Moçambique, o território é organizado em graus quadrados, cada um correspondente a 1° de latitude por 1° de longitude, subdivididos em folhas numeradas que seguem o sistema oficial do Instituto Nacional de Geografia e Cadastro (INAGE). Assim, a folha 34 do grau quadrado 1135 refere-se à unidade cartográfica que abrange a área de Lupilichi. É delimitada pelas Longitudes 35° 00'00" e 35° 15'00"E e pelas Latitudes 11° 39' 10" e 11° 44' 10"S (Figura 1). O Distrito do Lago está localizado na parte Norte da Província do Niassa, faz fronteira a Norte com a República Unida da Tanzânia, a Sul com o Distrito de Lichinga, a Leste com o Distrito de Sanga e a Oeste com o Lago Niassa. O acesso a área de estudo é feito através da ER 734 que liga a Vila de Ntimbe e a sede de Matchedje, prolongando-se até a Localidade de Lupilichi e vai até o Distrito de Sanga (Fig. 1). A via que liga a ER 734 e a Localidade de Mpapa e encontra-se em más condições de transitabilidade (MAE, 2014).

2.1 Contexto Geológico

A região de Lupilichi, inserida no contexto geológico do Grupo Txitonga, apresenta diferentes unidades geomorfológicas. É limitada pelo Complexo Paleoproterozóico - Ponta Messuli com idade de (~ 2,5-1,6 Ga) para Oeste e pelo Supergrupo Karroo (rochas do Graben Maniamba) para Leste e encontra-se numa região montanhosa acidentada (Figura 2). O embasamento cristalino da região, de idade Paleoproterozóica (~2,5-1,6 Ga), é composto principalmente por gnaisses migmatíticos, atravessados por intrusões de pórfiros quartzo-feldspáticos e metagabros, indicando história tectônica profunda e complexa. Esses processos envolvem fusão parcial, migmatização e deformações ductis, que originaram zonas de cisalhamento e fraturas expressivas, responsáveis pelo controle estrutural do setor.

Sobre este embasamento, ocorrem unidades metassedimentares de idade Neoproterozoica (~1000-541 Ma), compostas por mica-xistos, metagrauvaques e xistos ricos em clorita, submetidos a metamorfismo regional e reativação tectônica, que geraram foliação, recristalização e padrões de fraturamento específicos. Estas unidades registam os

efeitos de eventos tectônicos pan-africanos-Africanos, evidenciando deformação significativa antes da deposição de sedimentos mais recentes.

As formações sedimentares do Supergrupo Karroo (Fanerozoico, ~541 Ma) representam os depósitos mais recentes da região, constituídos por siltitos e arenitos finos, originados em ambientes continentais de baixa energia, associadas a ciclos deposicionais em bacias sedimentares do norte de Moçambique. Estas unidades sedimentares recobrem parcialmente o embasamento cristalino, preservando evidências da sua configuração estrutural original e oferecendo contraste litológico importante entre rochas resistentes e rochas friáveis.

Geologicamente, os limites de Lupilichi a oeste do Complexo Paleoproterozóico de Ponta Messuli e a leste pelas formações do Graben Maniamba, mostram a influência de tectônica regional e intrusões magmáticas sobre a evolução local. A compatibilidade das direções estruturais observadas no embasamento e nas metassedimentares confirma a continuidade das principais zonas de cisalhamento NE-SW e NW-SE, interpretadas como feições resultantes de múltiplos episódios tectônicos, que moldaram a geologia local e influenciaram a história metamórfica da região.

A geologia de Lupilichi evidencia uma história geotectônica complexa, na qual a sobreposição de eventos Paleoproterozóicos, Neoproterozoicos e Fanerozoicos resultou na configuração atual do Grupo Txitonga, marcada pela coexistência de embasamento cristalino antigo, metassedimentos deformados e sedimentação mais recente, compondo uma paisagem geológica de alta relevância para estudos regionais.

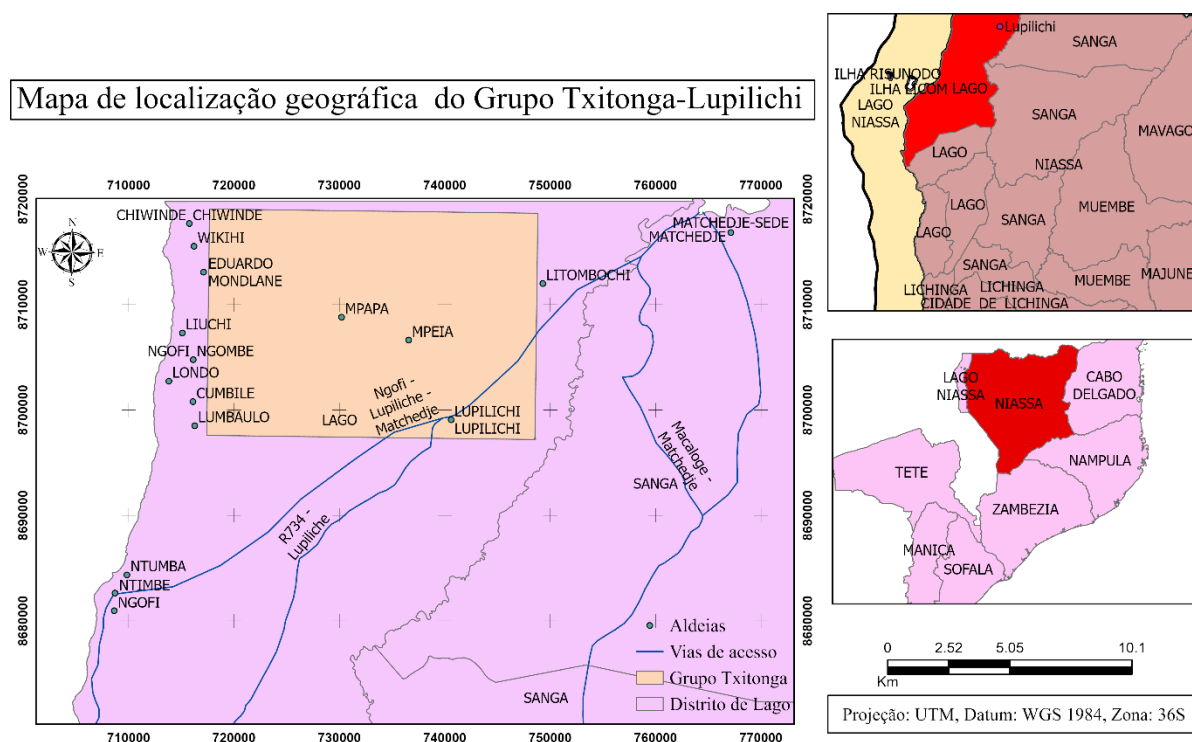


Figura 1. Localização geográfica da folha 34 – Lupilichi, com o polígono vermelho indicando os seus limites espaciais (latitude, longitude), e as respetivas vias de acesso da área, com a principal estrada que dá acesso a área a ER 734. Adaptado e modificado de DIVA-GIS (2021).

Figure 1. Geographic location of sheet 34 – Lupilichi, with the red polygon indicating its spatial limits (latitude, longitude), and the respective access roads to the area, with the main road that gives access to the area being ER 734. Adapted and modified from DIVA-GIS (2021).

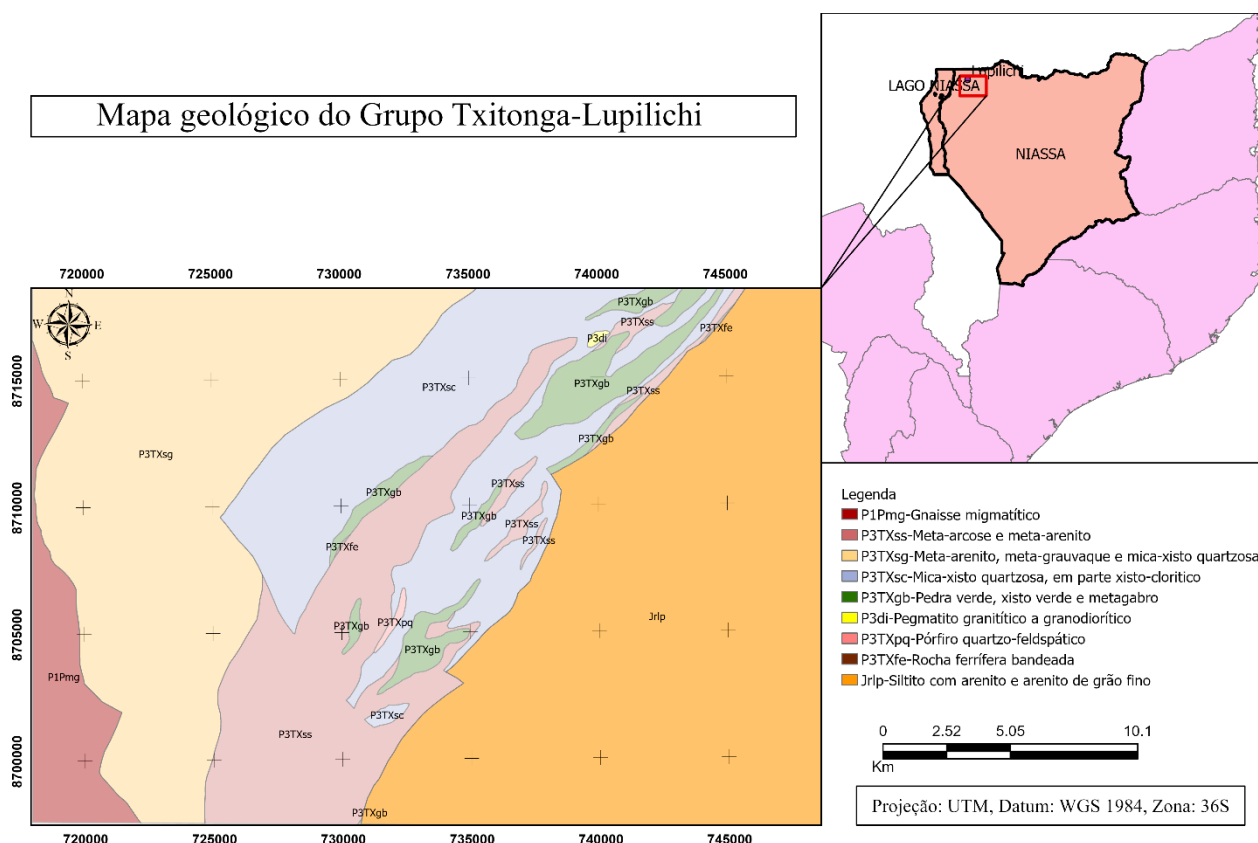


Figura 2. Mapa geológico da área de estudo. Ilustração das litologias do Fanerozóico, Neoproterozóico e Paleoproterozóico. Adaptado e modificado de GTK Consortium (2006).

Figure 2. Geological map of the study area. Illustration of Phanerozoic, Neoproterozoic and Paleoproterozoic lithologies. Adapted and modified from GTK Consortium (2006).

3. Materiais e Métodos

Para a realização deste trabalho, foram aplicadas técnicas com base em um Modelo Digital de Elevação (MDE), com principal enfoque em estudos relacionados à morfologia do terreno. O tipo de MDE mais utilizado é o MDS, fundamental para a caracterização morfológica regional. Segundo Cruz (2011), o MDS é um modelo que representa a superfície do terreno acrescida de quaisquer objetos presentes, como árvores e construções, em que o topo desses objetos é considerado a superfície do terreno.

O modelo digital de superfície utilizado foi o Copernicus DEM, que consiste em um MDS com resolução de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m em sistema de coordenadas métricas na linha do Equador), o qual foi utilizado nesse trabalho. O Copernicus também detém dados a 3 segundos de arco (aproximadamente 90 m). Esses modelos são baseados em dados de dois satélites com sistemas de radar, adquiridos de dezembro de 2010 a janeiro de 2015 (AIRBUS, 2020). Para complementar as análises, também foi utilizado o mapa geológico da área de estudo, publicado pelo GTK (2006), na escala 1:250 000.

A partir do MDE, foram gerados os mapas de declividade e de rede de drenagem. O mapa de declividade foi produzido por meio da ferramenta Slope, disponível no ArcGIS Pro, que calcula a taxa de variação do valor de elevação entre células adjacentes, expressando o resultado em graus. Esse procedimento permitiu identificar as variações do relevo,

destacando áreas de maior e menor inclinação, fundamentais para a compreensão do comportamento morfoestrutural da região.

Para a extração da rede de drenagem, utilizou-se a sequência de ferramentas *Fill*, *Flow Direction* e *Flow Accumulation*, também no ArcGIS Pro. Inicialmente, o modelo foi corrigido com a ferramenta *Fill* para eliminar depressões que poderiam interromper o fluxo hídrico. Em seguida, foi aplicado o *Flow Direction* para determinar a direção do escoamento superficial a partir da célula de maior declividade. Por fim, o *Flow Accumulation* foi utilizado para gerar a grade de acumulação de fluxo, a partir da qual foi possível vetorizar a rede de drenagem da área de estudo. Esses produtos (declividade e drenagem) foram integrados ao mapa geológico na escala 1:250.000 (GTK, 2006), permitindo a análise conjunta entre a estrutura geológica e as feições morfológicas, essenciais para a interpretação da compartimentação morfoestrutural de Lupilichi.

3.1 Extração de Lineamentos

Neste estudo, os lineamentos foram extraídos aplicando duas abordagens complementares: manual (digitalização) e automática, para garantir uma análise abrangente das feições estruturais. Inicialmente, foram aplicadas técnicas de relevo sombreado em oito imagens, com ângulos azimutais de 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°, e um ângulo solar de 45°, ângulo intermediário que facilita a análise em regiões heterogêneas, que apresentam áreas planas e montanhosas. Essas técnicas facilitaram o mapeamento morfoestrutural, permitindo a visualização e extração das feições estruturais retilíneas ou ligeiramente curvilíneas em relevo positivo e negativo.

As imagens de relevo foram posteriormente combinadas para obter imagem de relevo sombreado multidirecional no ArcGIS Pro (*Mosaic to new raster*), com quatro direções nos ângulos de azimute solar de 0°, 45°, 90° e 315°, todas com altitude solar de 45°, isso proporcionou realces em diferentes posições. A área de estudo foi subdividida em compartimentos geomorfológicos, baseando-se em critérios altimétricos e geoestruturais (lineamentos), conforme as informações contidas no mapa geológico e de relevo. Essa subdivisão, realizada de acordo com o com base em distinções observadas a partir de suas representatividades, de acordo com suas características litológicas, estruturais, de hipsometria e declividade (Figura 2), possibilitando uma análise detalhada das características da região.

Cada compartimento foi processado separadamente em novos rasters, permitindo a extração de dados individuais para a posterior criação de diagramas de roseta de cada compartimento. Utilizou-se o ArcGIS Pro com as ferramentas como Tabela de Atributos, Split Line at Vertices e Geometric Calculator, tanto para a extração manual quanto para a automática. A análise inclui a disposição dos lineamentos e a avaliação de sua direção (i.e., frequência absoluta, número e comprimento).

3.1.1 Extração Manual

A extração manual seguiu o método descrito por Nopeia (2016) no mapeamento lito-estrutural da folha nº 736, utilizando imagens multiespectrais de alta resolução. Esse método foi aplicado ao Copernicus DEM no software ArcGIS Pro, onde foram utilizadas as ferramentas de raster/análise/sombreamento para compor os relevos sombreados com quatro iluminações artificiais. Aplicou-se o *hillshade* (relevo sombreado) com o objetivo de visualizar as feições estruturais, que foram extraídas manualmente por meio da técnica de

digitalização. Os lineamentos são traçados em cada uma das iluminações referenciadas, considerando linhas de segmentos de escarpas, alinhamento de cristas, vales, trechos de rios e lagos, e depressões alongadas.

Após a digitalização das estruturas, os dados foram exportados em formato de tabela, no formato DXF, permitindo sua leitura no software Rockworks (licença trial) para a criação de diagramas de roseta. Esses diagramas facilitam a análise das principais orientações e da frequência dos lineamentos. Por último, a elaboração de um mapa de densidade de lineamentos para contribuir para a análise das principais direções estruturais da área.

A extração manual de lineamentos pode ser subjetiva, uma vez que depende do conhecimento e interpretação do observador. Para minimizar essa limitação, foram desenvolvidos métodos automáticos baseados na detecção de bordas em imagens. No presente estudo, a extração automática foi aplicada para oferecer uma avaliação comparativa e permitir a coleta de dados adicionais detalhados.

3.1.2 Extração Automática

A extração automática de lineamentos é feita pelo algoritmo de software PCI Geomatica, que consiste na detecção de bordas, configuração de limiares e na extração de curva (PCI Geomatica, 2013). Para isso, é necessária a aplicação de alguns parâmetros com valores padrão (Tabela 1), ajustáveis para cada área de estudo, esses parâmetros garantem a adaptação da análise à área de estudo e detecção eficaz de lineamentos. Para a extração de lineamentos são utilizados alguns parâmetros, que são nomeadamente:

RADI (*Radius of filter*): suavizar ruídos e detalhes não importantes que possam interferir na detecção de lineamentos. O valor deste parâmetro varia de 0 até 8192.

GTHR (*Threshold for edge gradient*): é o limite de gradiente de borda na imagem binária. Este valor deve estar na faixa de 0 a 255.

LTHR (*Threshold for curve length*): define o comprimento mínimo que uma linha deve ter para ser considerada como um lineamento. Linhas abaixo desse limite podem ser descartadas como ruído.

FTHR (*Threshold for line fitting error*): estabelece um limite para o erro aceitável ao ajustar uma linha à feição detectada na imagem. Os valores mais baixos proporcionam um melhor ajuste, mas também segmentos mais curtos na linha.

ATHR (*Threshold for angular difference*): controla o quão diferente o ângulo de uma linha detectada pode ser em relação a uma linha pré-estabelecida antes que ela seja considerada uma nova linha.

DTHR (*Threshold for linking distance*): define a distância máxima entre segmentos de linha que serão considerados partes de uma mesma linha contínua. Isso é usado durante a fase de ligação dos segmentos de linha detectados para formar linhas completas.

Os valores dos parâmetros neste trabalho foram ajustados (Tabela 1) consoante a geomorfologia da área de estudo, visto que imagens multidirecionais de sombreamento podem representar efetivamente informações de relevo (Loisios *et al.*, 2007). Adotou-se o método de Abdullah *et al.* (2010) para a extração automática de lineamentos. A área de estudo apresenta variações sutis de terreno e uma geologia bastante interessante, o que propiciou a alteração dos valores dos parâmetros, RAD, GTHR, LTHR, FTTH. Essas

alterações foram necessárias para que a extração de lineamentos fosse mais precisa, permitindo a conexão de lineamentos detectados em distâncias maiores. Isso é necessário para garantir a continuidade dos lineamentos ao longo de grandes extensões na área de estudo, que pode ser caracterizada por lineamentos mais espaçados.

O módulo LINE no PCI Geomatica foi aplicado para realizar a extração dos lineamentos, que consiste nas etapas de detecção de borda e extração de curvas (PCI Geomatica, 2013). Essas etapas realizadas na imagem de relevo sombreado, utilizando os parâmetros padrão (Tabela 1). Após a extração automática, os dados também foram exportados para o Rockworks, para a criação de diagramas de roseta, combinando assim a análise de orientações tanto para a extração manual quanto para a automática.

3.1.3 Análise de Densidade de Lineamentos

Em paralelo, foi gerado um mapa de densidade no ArcGIS Pro, utilizando a ferramenta *Line Density* para visualizar as áreas de concentração de lineamentos para os dois métodos de extração. A análise de densidade de lineamentos consistiu na contagem do número de lineamentos em cada célula do pixel ou no cálculo do comprimento das linhas contidas dentro de uma célula.

O resultado foi um arquivo raster que foi classificado utilizando a técnica de *Stretch* em vez do algoritmo de quebras naturais (*Natural Breaks Jenks*). A classificação *Stretch* ajusta a distribuição de valores para maximizar o contraste, resultando em um mapa temático final com maior clareza na visualização das variações morfoestruturais.

Tabela 1. Parâmetros de PCI Geomatica, valores padrões e adotados neste trabalho.

Table 1. Geomatica PCI parameters, standard values and those adopted in this work.

Parâmetros	Descrição	Abdullah et al (2010) - Valores	Valores. Aptados no trabalho	Valor padrão
RADI	<i>Radius of filter</i>	12 pixels	15 pixels	10 pixels
GTHR	<i>Threshold for edge gradient</i>	90 pixels	80 pixels	100 pixels
LTHR	<i>Threshold for curve length</i>	30 pixels	30 pixels	20 pixels
FTHR	<i>Threshold for line fitting error</i>	10 pixels	8 pixels	5 pixels
ATHR	<i>Threshold for angular difference</i>	30 graus	30 graus	30 pixels
DTHR	<i>Threshold for linking distance</i>	20 pixels	20 pixels	20 pixels

Fonte: Adaptado e modificado de Abdullah *et al.* (2010).

4. Resultados

A análise integrada dos modelos digitais de elevação, dos mapas de declividade e da morfologia do Grupo Txitonga possibilitou a identificação de diferentes padrões de relevo, permitindo a definição de unidades morfoestruturais e morfoesculturais (Ross, 1991). As unidades morfoestruturais foram definidas com base em litologia, fraturamento, orientação dos lineamentos, hipsometria e declividade, enquanto as unidades morfoesculturais correspondem às formas superficiais subordinadas, como colinas, depressões e superfícies sedimentares. A partir da interpretação conjunta desses dados com o contexto geológico e estrutural do Grupo Txitonga, foi possível propor uma compartimentação morfoestrutural e morfoescultural, considerando litologia, fraturamento, orientação de lineamentos, hipsometria e declividade, como também às formas superficiais subordinadas, como colinas, depressões e superfícies sedimentares.

Foram reconhecidas duas unidades morfoestruturais principais: o Domínio Cristalino Montanhoso, constituído por gnaisses, migmatitos e granitos fortemente fraturados, atravessados por zonas de cisalhamento neoproterozoicas, e o Domínio Sedimentar e de Depressões, caracterizado por superfícies planas a suavemente onduladas, com depósitos sedimentares recentes suavizam a expressão morfoestrutural do substrato, mas mantêm evidências do controle tectônico preexistente. Desta forma, com base nessas unidades, foram estabelecidos três compartimentos, onde um deles é subdividido em dois, a saber: Região Norte-Central 1 e 2 (C1-zona montanhosa, C2-zona de transição), Oeste (O) (depressão) e Leste (P) (Planalto) (Figura 3).

A porção C1 Norte-Central, inserida no Domínio Cristalino Montanhoso, apresenta altitudes próximas de 1800 m, vertentes íngremes (>30%) e cristas alongadas na direção NE–SW. As morfoesculturas predominantes incluem cristas estruturais e vales encaixados, refletindo forte controle estrutural sobre a morfologia. E, C2-zona intermediária de transição, também no Domínio Cristalino Montanhoso, apresenta altitudes entre 900 e 1100 m, com relevo ondulado e colinas alongadas, declividade de 11-28%. As morfoesculturas incluem colinas suavemente inclinadas e vales moderadamente encaixados, evidenciando ação erosiva diferencial sobre rochas cristalinas, ainda subordinadas ao arcabouço estrutural.

As porções P e O, nomeadamente: Planalto Leste de Sedimentos e Depressão Ocidental, estão inseridas no Domínio Sedimentar e de Depressões. Cujo a P, apresenta altitudes inferiores a 500-700 m, relevo plano a suavemente ondulado e deposição sedimentar recente predominante. As morfoesculturas correspondem a superfícies aplainadas e depósitos aluvionares, caracterizados essencialmente como sedimentares, com influência tectônica indireta. Sendo que, a O apresenta altitudes entre 500 e 800 m, relevo suavemente dissecado e depressões localizadas. As morfoesculturas refletem subsidência crustal e erosão diferencial, indicando que processos estruturais e erosivos atuam em conjunto para moldar o relevo atual.

A partir do mapa de declividade, é possível observar contrastes marcantes entre os compartimentos, variando de <5% nos planaltos sedimentares rebaixados (P), 11-21 % no relevo ondulado da transição (C2), 17-30% em colinas e cristas (C1) e >30% em vertentes íngremes de cristas estruturais (C1) (Figura 4). Essa compartimentação evidencia que o relevo de Lupilichi é resultado da interação complexa entre morfoestruturas e morfoesculturas, em que o arcabouço tectônico do Grupo Txitonga define os padrões estruturais, enquanto processos erosivos e deposicionais moldam as formas superficiais.

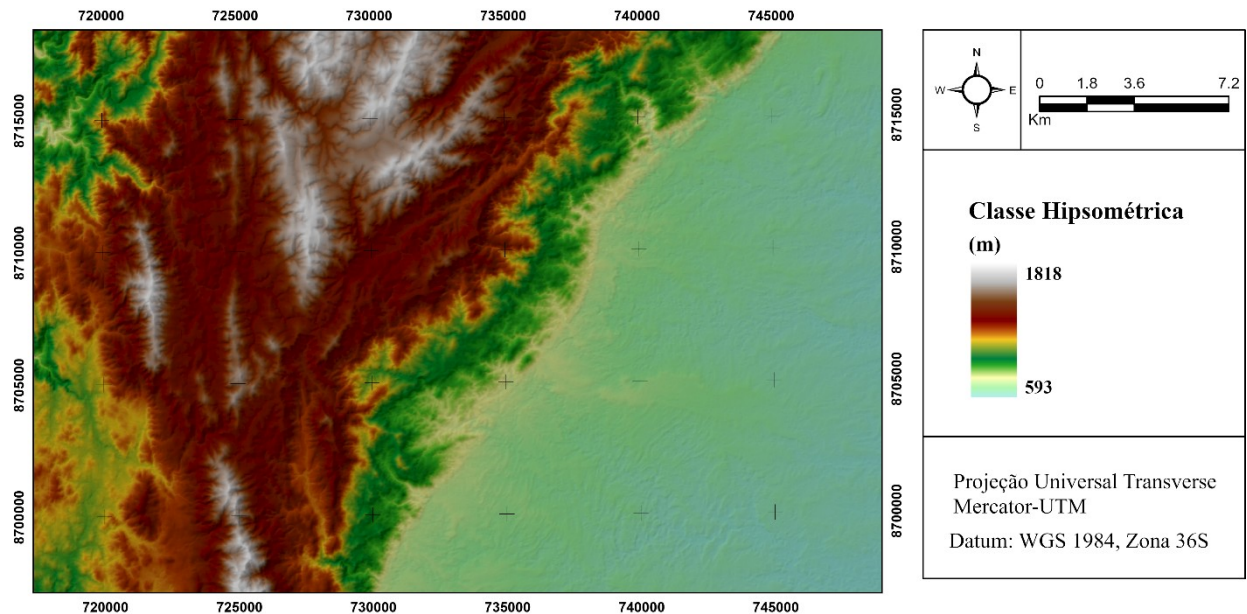


Figura 3. Mapa Hipsométrico. Ilustração dos intervalos altimétricos, apresentados em diferentes cores, em que o ponto mais alto é representado pela cor rosa-escuro, com elevação de até 1818 m.

Figure 3. Hypsometric Map. Illustration of the altimetric intervals, presented in different colors, where the highest point is represented by dark pink and elevations up to 1818 m. Adapted and modified from GTK Consortium (2006).

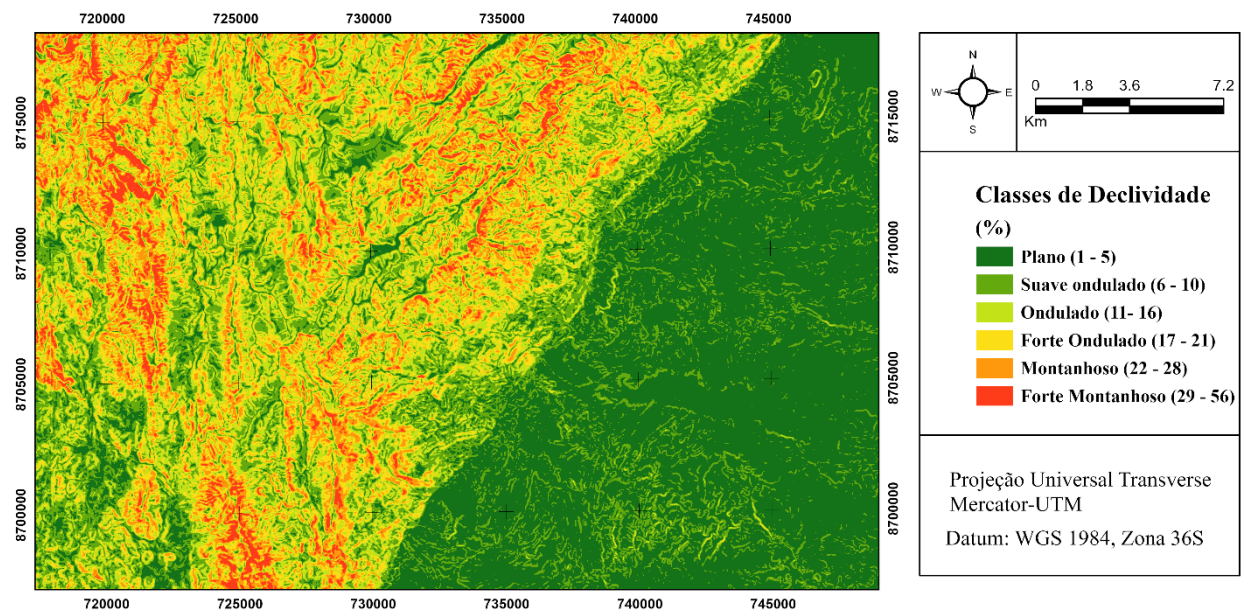


Figura 4. Mapa de declividade de Lupilichi-Grupo Txitonga.
Figure 4. Slope map of Lupilichi-Txitonga Group.

4.1 Rede de drenagem

A rede de drenagem de Lupilichi demonstra uma relação tanto do arcabouço estrutural quanto da diversidade litológica presente na área de estudo. A análise morfoestrutural realizada a partir de sensoriamento remoto permitiu identificar alinhamentos retilíneos que se relacionam diretamente a estruturas profundas, projetadas em superfície por meio de feições geomorfológicas lineares (O'Leary *et al.*, 1976; Bricalli, 2016). Nesse contexto, falhas estruturais de direção predominante NE-SW constituem elementos fundamentais no condicionamento da drenagem, uma vez que definem direções preferenciais de canais principais e de afluentes de ordem inferior. A associação dessas estruturas a uma litologia variada contribui para a configuração complexa do sistema hidrográfico observado.

Foram identificados três padrões principais de drenagem: dendrítico, retangular e paralelo, além de variações intermediárias como o subdendrítico (Figura 5). Entre eles, o dendrítico é o mais predominante, distribuindo-se sobretudo na porção leste da área, onde predominam unidades sedimentares fanerozoicas compostas por siltitos e arenitos de granulação fina. Esse padrão corresponde ao arranjo hidrográfico mais comum na natureza, caracterizando-se por sua configuração irregular e ramificada, típica de contextos em que a diversidade litológica favorece a instalação de canais sem controle estrutural marcante (Christofolletti, 1980; Horton, 1945). Ainda na mesma porção, caracterizada por superfícies erosivas rebaixadas, foram observadas variações subdendríticas e paralelas, que denotam influência indireta de controles estruturais e topográficos (Howard, 1967). O padrão subdendrítico, embora semelhante ao dendrítico, apresenta menor perfeição no arranjo dos canais, refletindo a atuação de fatores locais de controle.

As anomalias de drenagem constituem elementos importantes para compreender os processos que influenciam o sistema hidrográfico regional. Na porção leste, registram-se meandros anômalos e inflexões abruptas em ângulos próximos de 90°, revelando mudanças súbitas de direção dos canais, muitas vezes de E-W para NE-SW, associadas ao condicionamento imposto por falhas regionais. Esse comportamento também se repete na porção oeste, onde, além do predomínio dendrítico, a drenagem principal e seus afluentes exibem cotovelos, mudanças bruscas de direção e meandros localizados. Tais feições configuram fortes indícios de reativações estruturais em áreas litologicamente mais complexas, reforçando o papel do fator tectônico.

O padrão retangular ocorre em compartimentos específicos, notadamente na porção C1 e no extremo sudoeste da área, apresentando drenagens organizadas em ângulos retos. Esse padrão é típico de substratos fraturados, nos quais falhas e juntas ortogonais orientam diretamente os canais fluviais (Howard, 1967). Em alguns setores, o padrão é de difícil reconhecimento, pois a complexidade litológica dificulta a definição clara do traçado. Ainda assim, a recorrência de canais retilíneos conectados em ortogonalidade confirma a relevância do controle estrutural no ordenamento hidrográfico.

De forma geral, a organização da rede de drenagem em Lupilichi reflete um equilíbrio entre processos erosivos e condicionamentos estruturais. Enquanto áreas sedimentares e superfícies rebaixadas favorecem o desenvolvimento de padrões dendríticos e subdendríticos, os setores associados a falhas e fraturas revelam padrões retangulares e paralelos, bem como inflexões abruptas e anomalias que denunciam a presença de controles tectônicos ativos. Essa combinação de fatores evidencia que a drenagem local não é influenciada apenas por processos denudacionais, mas de uma complexa interação entre litologia, tectônica e morfoestrutura regional.

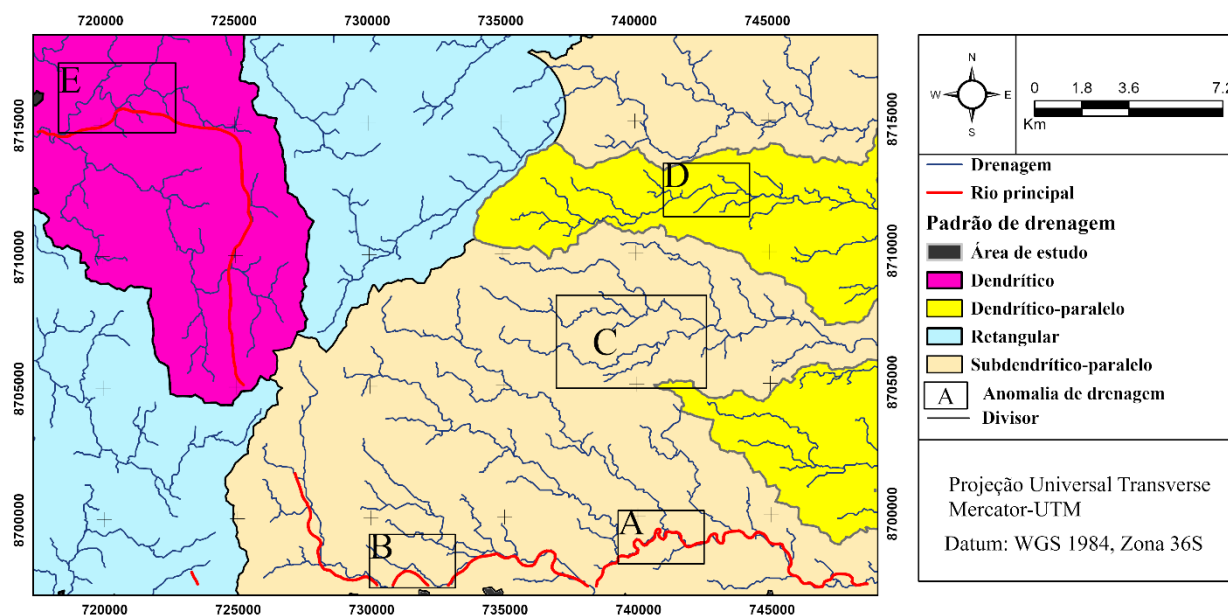


Figura 5. Mapa dos padrões de drenagem, com indicação de anomalias de drenagem (A, B e E – Meandros localizados; C, D e E – Inflexões em ângulo agudo).

Figure 5. Map of drainage patterns, indicating drainage anomalies (A, B and E – Localized meanders; C, D, and E – Acute-angle inflections).

4.2 Extração Manual

A área de estudo para extração manual apresenta no seu total 466 lineamentos (Figura 6), com comprimentos que variam de (2-16 km) considerando que a maior parte varia de 2-6, e uma direção predominante de NE-SW, com uma média do ângulo de direção de 450. Entretanto, cada compartimento apresentou variações de acordo com as características geológicas e morfológicas da área de estudo, o que influenciou na disposição morfoestrutural.

A região Norte-Centro (C1 e C2) apresenta uma disposição morfológica variada. Na porção C1, é possível observar, pelo diagrama de rosetas, duas direções principais NE-SW e NW-SE (Figura 6B). No entanto, a direção mais frequente é NE-SW, com ângulo de 450, com comprimentos que variam de (3-16 km). O compartimento C2 apresenta lineamentos mais longos, comparativamente ao C1, com a direção predominante também em NE-SW, e ângulos de inclinação que variam entre 300 e 600, representado pelas cores vermelhas no diagrama de rosetas, sugerindo essa variação pela diferença significativa do relevo. No entanto, o compartimento C1 apresenta alta densidade de lineamentos em relação a C2, conforme observado tanto no mapa de lineamentos (Figura 6A), quanto no mapa de densidade, onde são representadas áreas com densidade alta pela cor vermelha (Figura 7).

Na porção Oeste (O), observa-se que, diferentemente dos demais compartimentos, as direções dos lineamentos são mais dispersas, com tendência para NE-SW, NW-SE e N-S. Essa dispersão está associada a uma maior densidade de lineamentos, sugerindo maior concentração dos lineamentos.

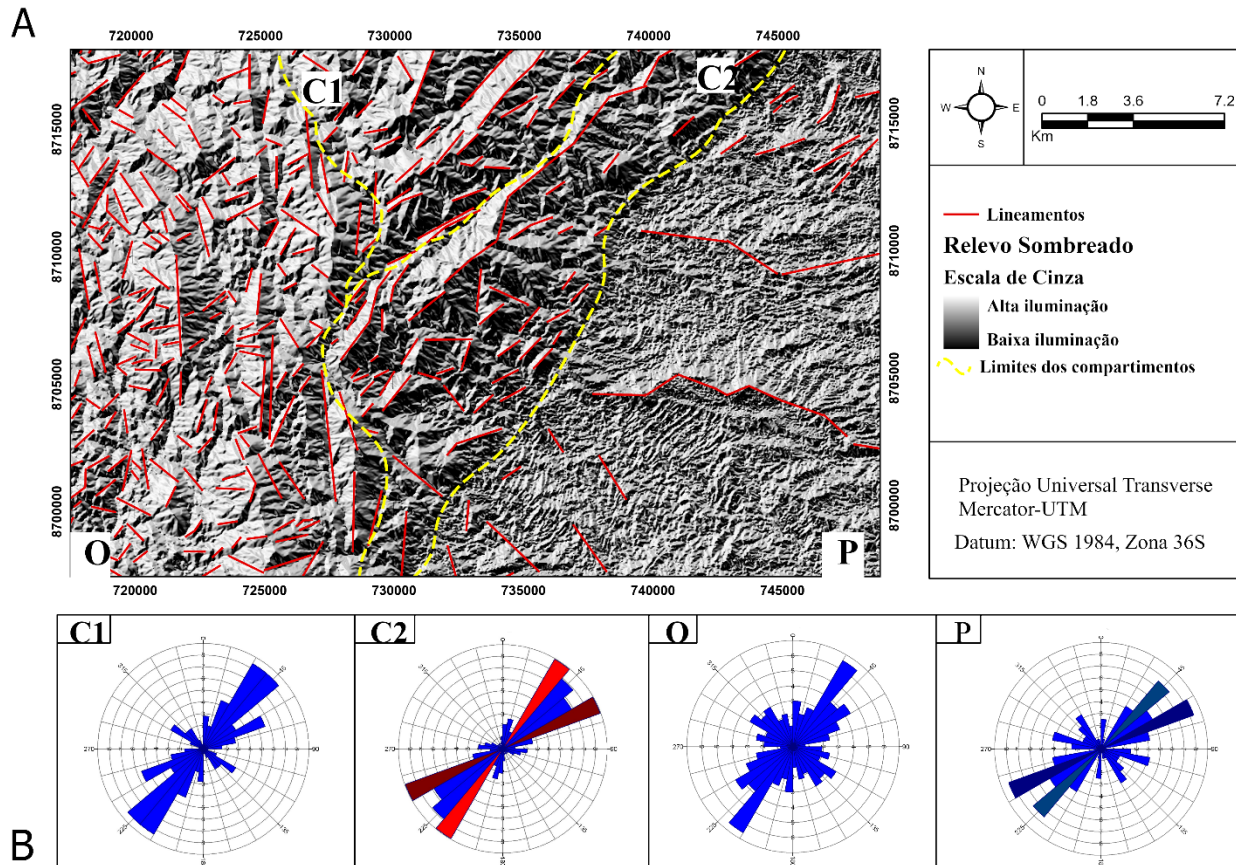


Figura 6. A figura apresenta os lineamentos extraídos manualmente na região de Lupilichi, subdividida nos quatro compartimentos geomorfológicos. A) Mostra a distribuição dos lineamentos nos compartimentos geográficos, com os códigos representando diferentes tipos de relevo: **C1 (zona montanhosa)**, **C2 (zona de transição)**, **O (depressão)** e **P (planalto)**. B) Apresenta os diagramas de rosetas de frequência absoluta para cada compartimento, onde é possível observar a predominância de lineamentos com **orientação NE-SW**, com ângulos variando entre 30° e 60°. A cor vermelha no diagrama de rosetas de C2 destaca essa variação angular, enquanto no compartimento P, a cor azul escura. Os diagramas têm um espaçamento angular de 15° a partir do Norte.

*Figure 6. The figure shows the manually extracted lineaments in the Lupilichi region, subdivided into four geomorphological compartments. A) Shows the distribution of lineaments in geographic compartments, with the codes representing different types of relief: **C1 (mountainous area)**, **C2 (transition zone)**, **O (depression)** and **P (plain)**. B) Presents the absolute frequency rosette diagrams for each compartment, where it is possible to observe the predominance of lineaments with **NE-SW orientation**, with angles varying between 30° and 60°. The red color in the C2 rosette diagram highlights this angular variation, while in the P compartment, the dark blue color. The diagrams have an angular spacing of 15° from North.*

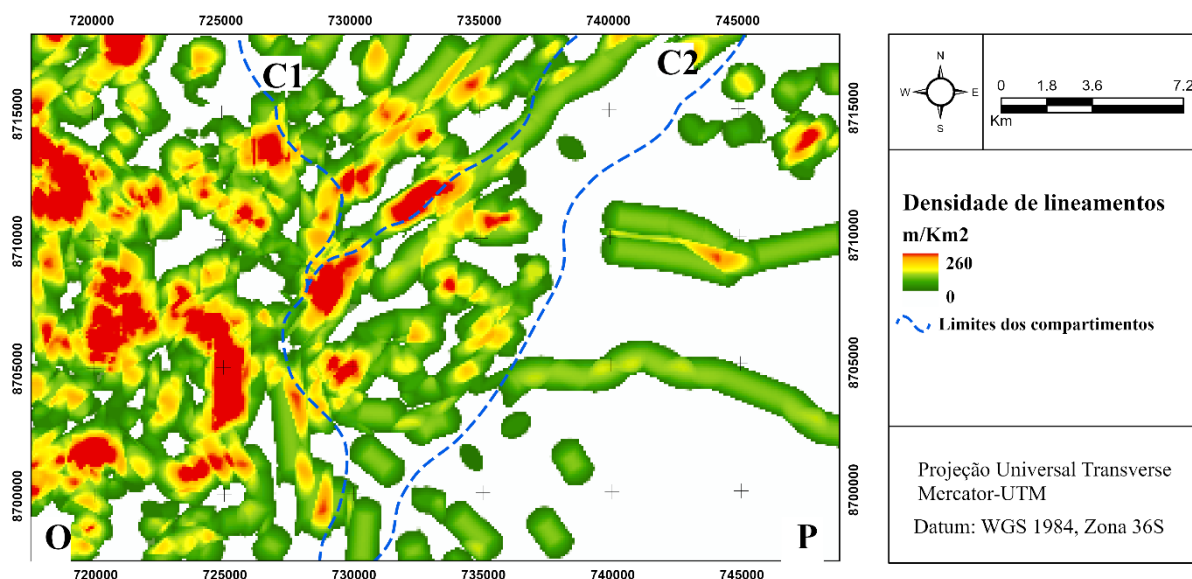


Figura 7. O mapa mostra a distribuição da densidade de lineamentos extraídos manualmente na área de estudo. Os valores de densidade variam de acordo com a concentração dos lineamentos, sendo representados pela escala de cores, onde o verde indica os valores de densidade mais baixos e o vermelho, os valores mais altos. A variação de densidade ao longo dos compartimentos geomorfológicos reflete as características estruturais da região. As áreas com maior densidade de lineamentos são: C1 e O.

Figure 7. The map shows the density distribution of manually extracted lineaments in the study area. Density values vary according to the concentration of lineaments, being represented by the color scale, where green indicates the lowest density values and red, the highest values. The variation in density throughout the geomorphological compartments reflects the structural characteristics of the region. The areas with the highest density of lineaments are: C1 and O.

4.3 Extração Automática

A extração automática de lineamentos utilizando o PCI, com os parâmetros adotados para área demonstraram a possibilidade do uso de métodos além do manual, para a extração de feições geológicas como os lineamentos. Assim como Abdullah *et al.* (2010), a área responde positivamente ao método, implicando na extração de 199 lineamentos, um número menor do que a extração manual, com comprimentos que variam de (3-18km), porém maior parte deles estão entre 5-10km. Similar à extração manual, a direção predominante identificada foi NE-SW, com uma correlação positiva às direções extraídas manualmente (Figura 8).

O algoritmo extraiu lineamentos relativamente longos, diferente do que é observado na extração manual, deve-se ao fato de que, os parâmetros aplicados tenham sido ajustados para a extração dos lineamentos com comprimentos mais extensos, considerando a escala da área, como para evitar ruídos na análise direcional dos lineamentos. Como constatado por Abdullah *et al.* (2010), a abordagem do método de extração automática de lineamento não discrimina características artificiais e características não geológicas durante a análise. Então, isso pode influenciar o aumento do número total e do comprimento total dos lineamentos.

O compartimento C1, apresenta alta densidade de lineamentos na direção NE-SW (Figura 8A). Além disso, foram detectados lineamentos menos extensos em outras direções, que são observados na extração manual nos compartimentos C1, O e P, porém variando no ângulo de inclinação. No compartimento C2 (Figura 8A), a extração automática revelou lineamentos mais extensos na direção NE-SW e densidade elevada (Figura 9),

diferentemente da extração manual, neste compartimento, observa-se menor número de lineamentos curtos e dispersos.

No Oeste (O), observa-se que a frequência dos lineamentos tende a estar alinhada com os extraídos manualmente, diferenciando na quantidade menor de lineamentos nessa porção na extração automática (Figura 8B). Entretanto, os métodos manuais têm um significativamente maior número de lineamentos de pequena escala, particularmente na direção N-S, o que acresce à densidade nesta porção com a extração manual.

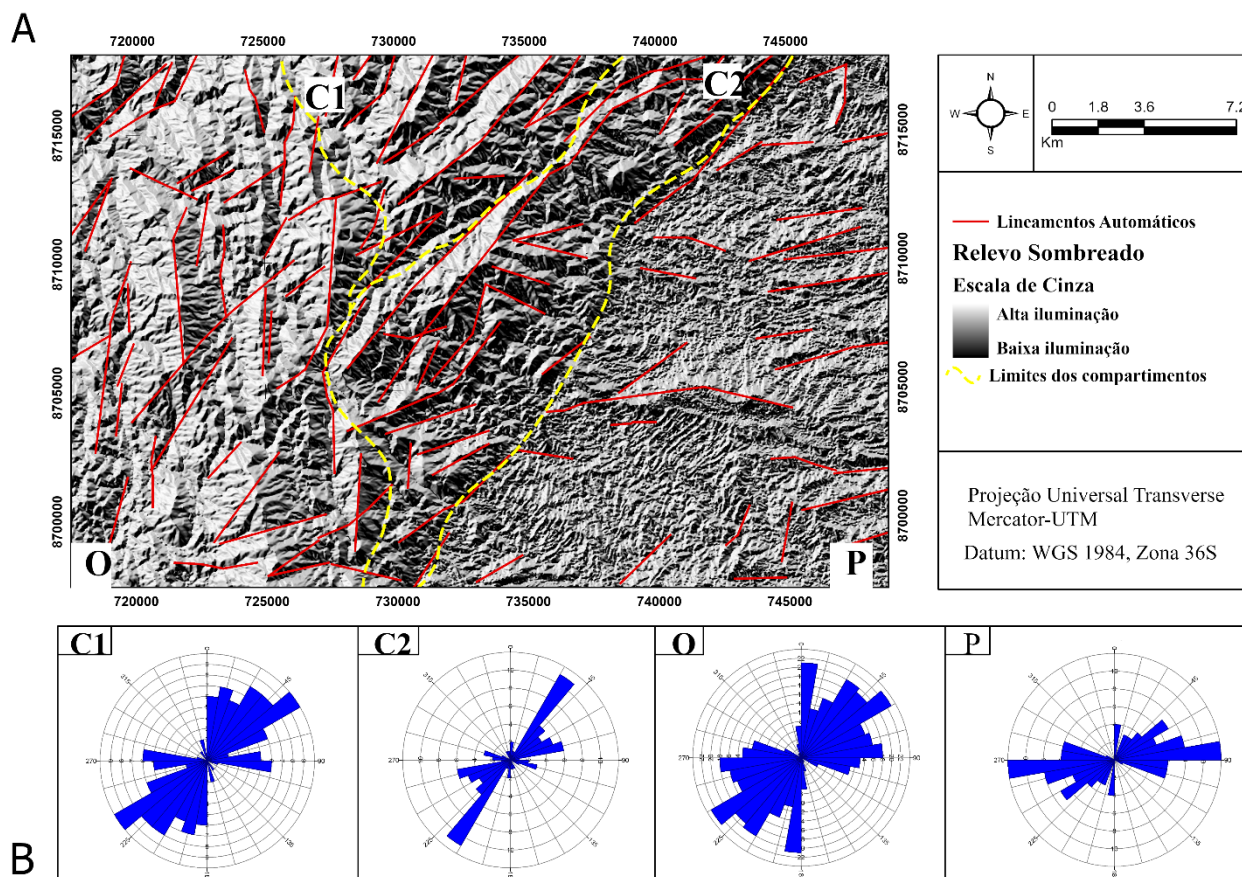


Figura 8. A figura apresenta os lineamentos extraídos automaticamente na região de Lupilichi, subdividida em quatro compartimentos geomorfológicos principais. A) Mostra a distribuição dos lineamentos nos compartimentos geográficos, com os códigos representando diferentes tipos de relevo: **C1 (zona montanhosa)**, **C2 (zona de transição)**, **O (depressão)** e **P (planalto)**. B) Apresenta os diagramas de rosetas para cada compartimento, onde é possível observar a predominância de lineamentos com orientação NE-SW, de comprimentos mais longos com ângulos variando entre 30° e 60°. Nas porções P e O, nota-se um evento totalmente distinto, onde em P lineamentos mais longos têm direções quase horizontais (E-W), enquanto O, alguns quase verticais na direção (N-S).

Figure 9. The figure shows the automatically extracted lineaments in the Lupilichi region, subdivided into four main geomorphological compartments. A) Shows the distribution of lineaments in geographic compartments, with the codes representing different types of relief: **C1 (mountainous area)**, **C2 (transition zone)**, **O (depression)** and **P (plain)**. B) Presents the rosette diagrams for each compartment, where it is possible to observe the predominance of lineaments with NE-SW orientation, of longer lengths with angles varying between 30° and 60°. In portions P and O, a totally different event can be seen, where in P longer lineaments have almost horizontal directions (E-W), while O, some almost vertical in the direction (N-S).

A porção Leste (P) é também esparsa, com quantidade de lineamentos elevada e extensos com frequência direcional para E-W (Figura 8B), sendo que, os lineamentos extraídos manualmente apresentam mais variações de comprimentos em relação ao

automático. Entretanto, essa interpretação exige cautela, uma vez que está baseada apenas nas feições capturadas automaticamente, bem como na óptica do observador, que nem sempre refletem a verdadeira estrutura geológica da área.

Nesse compartimento, observa-se uma cobertura significativa de siltitos e rochas sedimentares finas do Supergrupo de Karroo, que dificultam a expressão de lineamentos devido à sua reologia (Macuácuá, 2025). Como resultado, os traçados detectados tendem a evidenciar principalmente descontinuidades topográficas associadas a processos erosivos e, necessariamente, estruturas tectônicas. Ao analisar áreas adjacentes, fora dessa região sedimentar, torna-se evidente a presença de lineamentos, na direção NE-SW, semelhante ao observado nos demais compartimentos. Com base apenas nas imagens, numa interpretação mais detalhada, há indícios de que as extensas faixas E-W observadas no compartimento P, possam corresponder a depósitos sedimentares relacionados a cones de ejeção. Esses sedimentos teriam sido originados a partir do bloco a Oeste e associados a zonas de falha com orientação NE-SW.

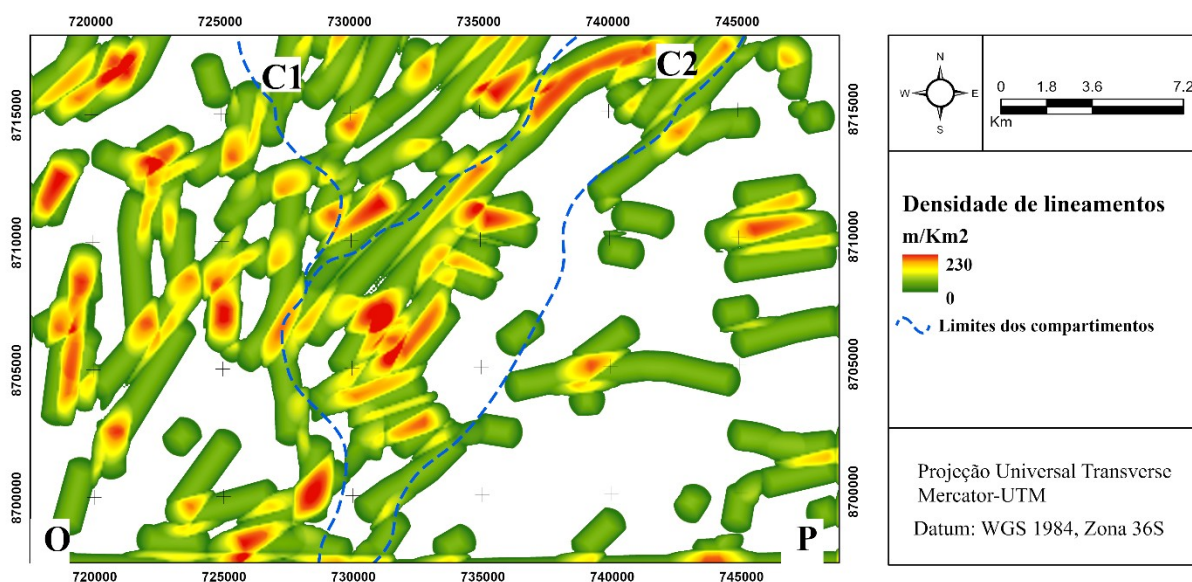


Figura 9. O mapa apresenta a densidade de lineamentos extraídos automaticamente utilizando o software PCI Geomatic. Os valores de densidade são representados em uma escala de cores, onde o verde indica os valores de densidade mais baixos e o vermelho, os mais altos. A distribuição de lineamentos em diferentes compartimentos da área de estudo é visível, com variações significativas de densidade, refletindo a complexidade geológica da região. As áreas com maior densidade de lineamentos são: C1 e C2.

Figure 9. The map shows the density of lineaments automatically extracted using the PCI Geomatic software. Density values are represented on a color scale, where green indicates the lowest density values and red the highest. The distribution of lineaments in different compartments of the study area is visible, with significant variations in density, reflecting the geological complexity of the region. The areas with the highest density of lineaments are: C1 and C2.

4.4 Abordagem geológica

Os padrões de lineamentos detectados na área de estudo, Lupilichi-Grupo Txitonga, sugerem uma forte relação entre os lineamentos e a geotectônica da área. Pode-se afirmar que, a área apresenta evidências de uma tectônica ativa, com forte tendência na direção NE-SW, relacionada a zonas de falhas regionais associadas a fluídos hidrotermais. Pode ser observada a falha extensa na direção NE-SW, que se estende da porção Norte-Centro

(C2) até a porção Oeste (O), conforme constatado em estudos anteriores, como o da NORCONSULT (2007).

A densidade elevada de lineamentos na porção Oeste (O) e na região Norte - Centro (C1 e C2), está associada a atividades tectônicas mais intensas, evidenciada por uma estrutura geológica mais complexa, com rochas deformadas e dobradas, associadas a rochas metassedimentares de Neoproterozóico e intrusões de Pórfiro quartzo-feldspático e metagabro, desde uma zona altamente montanhosa-Serra de Sanga à uma zona de transição caracterizada por colinas erosivas a partir da planalto, resultando em um relevo suave ondulado.

Os resultados obtidos na região Norte-Centro, demonstram que, à medida que a elevação aumenta, a topografia se torna ainda mais acidentada, com rochas altamente fraturadas e deformadas, como constatado por Odigi & Okonny (1986) no estudo realizado no sudeste da Nigéria, no Oban Massif, em estudos geológicos estruturais a partir de imagens radar. Embora sejam áreas distintas, Lupilichi e Oban Massif têm uma similaridade na geomorfologia, onde estruturas tectônicas definem o relevo.

Além disso, a predominância da orientação NE-SW em Lupilichi, demonstra uma atividade tectônica significativa, que impacta diretamente a distribuição de zonas de alta densidade de lineamentos. Estudos como de Odigi & Okonny (1986), indicam que, os padrões de lineamentos em regiões constituídas por rochas metassedimentares e intrusivas, estão associados a zonas de falhas e cisalhamentos, que permitem a passagem de fluídos mineralizantes em ambientes hidrotermais. Essas ações se repetem em Oban Massif, onde o alto grau de fraturamento está ligado a eventos tectóno-metamórficos do Paleoproterozoico e Neoproterozoico. As observações ressaltam que estruturas geológicas de mesma idade em contextos semelhantes, respondem de maneira comparável às forças tectônicas atuantes.

De acordo com Edet *et al.* (1998), as zonas de densidade de lineamentos relativamente alta são identificadas como zonas de alto grau de fraturamento de rochas, o que favorece a circulação de fluídos hidrotermais. Na porção Oeste (O), onde se encontra a depressão sinclinal de Mariri entre as Escarpas de Messinge e as montanhas anticlinais de Tchissango, observa-se um número considerável de lineamentos, com orientações que seguem estruturas mais antigas, possivelmente refletindo a subsidência tectônica, com predominância de Gnaisses migmatíticos do Paleoproterozóico (MAE, 2014).

O compartimento Leste (P), caracterizado por um planalto, assim como zona intermediária C2, apresentam menor concentração de lineamentos. No entanto, diferentemente da C2, que houve uma atividade tectônica intensa, o compartimento P apresenta ou sugere áreas menos deformadas, compostas principalmente por rochas sedimentares do Supergrupo de Karroo, associadas ao Gabren Maniamba, com formações do Fanerozoico, como Siltitos com arenitos de grão fino. Essas formações sedimentares estão associadas ao relevo plano da área, onde sugere um processo de deposição mais recente. A forte relação da geologia e dados morfoestruturais, destacam a relevância das estruturas geológicas de Lupilichi, na prospeção mineral. A integração dessas informações evidencia a influência de formações rochosas e as feições tectônicas no que concerne a estudos onde o foco é a determinação e distribuição de minérios de interesse, como o Ouro.

5. Discussão

A análise integrada da rede de drenagem, da litologia e dos lineamentos morfoestruturais de Lupilichi evidencia que as atividades tectônicas desempenham papel fundamental na evolução da paisagem e morfoescultural da área. A presença de lineamentos, com direções preferenciais NE-SW e NW-SE, revela um sistema estrutural complexo, responsável tanto pelo controle do padrão de drenagem quanto pela compartimentação geomorfológica regional. Essa configuração demonstra a estreita relação entre estrutura, litologia e processos erosivos, refletindo a atuação de eventos tectônicos antigos e reativações mais recentes.

De modo geral, observam-se três principais padrões de drenagem, fortemente associados à compartimentação morfoestrutural. O primeiro ocorre nas zonas montanhosas do compartimento C1, onde nascentes e cursos d'água se desenvolvem sobre terrenos compostos por gnaisses, quartzitos e xistos intensamente fraturados. Nesses setores, a drenagem apresenta padrão retangular, evidenciando forte controle estrutural por fraturas, zonas de cisalhamento e diáclases que canalizam o escoamento superficial. As encostas íngremes e as depressões associadas sugerem dissecação fluvial intensa e evidências de ajuste tectônico recente, sustentados pela orientação paralela entre cristas estruturais, escarpas de declividade e direções de drenagem.

O segundo contexto corresponde ao compartimento C2, uma zona intermediária e transicional, onde o relevo é menos acidentado, e as drenagens têm padrões subdendríticos, ajustando-se à variação litológica e às fraturas menores. Nessa porção, ocorrem intrusões graníticas e quartzo-feldspáticas, que geram desníveis e condicionam a orientação dos talvegues. As drenagens ortoclinais atuam como elementos de conexão entre as áreas montanhosas e as zonas mais baixas, indicando processos erosivos controlados por falhas antigas reativadas. Esse comportamento reforça a importância das estruturas neoproterozoicas e paleoproterozoicas na morfogênese local.

O terceiro conjunto de drenagens que ocorre nas depressões do compartimento Oeste (O), sobre materiais arenosos e coberturas detrito-lateríticas, onde predominam litologias mais friáveis. O padrão de drenagem é predominantemente dendrítico, mas exibe variações no extremo norte, observa-se dendrítico com inflexões angulares tipo cotovelo, enquanto no Sul há predominância de padrão retangular. Essa diferença indica maior maturidade erosiva nas áreas mais suaves, mas ainda com influência tectônica residual evidenciada por segmentos retilíneos e mudanças abruptas de direção.

Essas observações demonstram que a evolução da paisagem de Lupilichi está diretamente associada a eventos tectônicos neoproterozoicos e fanerozoicos, que foram responsáveis por gerar e reativar fraturas, controlando tanto o desenvolvimento da drenagem quanto a dissecação diferencial das rochas do Grupo Txitonga. A interação entre litologia resistente (gnaisse, quartzitos e meta-arenitos) e zonas de fraqueza estrutural define a morfodinâmica local, onde a erosão atua seletivamente, intensificando o contraste entre áreas elevadas e planas. Assim, a compartimentação observada é a resposta direta da superfície às variações do arcabouço geológico e à persistência de controles estruturais herdados.

Sob o ponto de vista geológico-litológico, o comportamento da drenagem e dos lineamentos está condicionado ao resultado da mecânica e ao grau de deformação das rochas. As unidades metassedimentares do Grupo Txitonga, compostas por mica-xistos, quartzitos e metarenitos, apresentam resistência variável à erosão, favorecendo a dissecação diferencial. Nos setores de gnaisses migmatíticos e meta-arcósios (porção Oeste e C1), a elevada resistência confere relevos mais acidentados, com declividades

acentuadas e vales encaixados. Essas rochas, fortemente fraturadas, funcionam como zonas preferenciais para infiltração e esculturação fluvial, controlando tanto a direção das drenagens quanto a orientação das vertentes.

Em contraste, a porção leste, característico planáltico e sedimentar, é composta predominantemente por siltitos e arenitos finos. Essas litologias mais friáveis resultam em relevo suave e drenagem dendrítica, com baixa densidade de lineamentos. O contraste geomorfológico entre as áreas elevadas e os planaltos estruturais evidencia a forte interação entre estrutura e litologia no controle da morfologia regional.

Do ponto de vista tectônico, a predominância das direções NE-SW e NW-SE nos lineamentos da região de Lupilichi -Grupo Txitonga confirma que a região foi influenciada por falhas e fraturas do embasamento, associadas à reativação de estruturas Pan-Africanas e às deformações neoproterozoicas do norte de Moçambique. Essas direções estruturais coincidem com os alinhamentos principais reconhecidos em outros domínios do Cinturão de Moçambique, indicando continuidade tectônica regional.

A orientação NE-SW, predominante nos compartimentos montanhosos (C1, C2 e oeste), está relacionada a zonas de cisalhamento profundas, que controlam tanto o alinhamento dos vales quanto a disposição das cristas estruturais. Já as direções NW-SE, mais expressivas nas zonas intermediárias e de transição, refletem fases posteriores de reativação tectônica, possivelmente associadas a ajustes crustais tardios, que influenciaram a reorganização da drenagem e a erosão diferencial.

A análise dos lineamentos e da densidade estrutural reforça esse entendimento, sugerindo que as atividades tectônicas foram determinantes para a evolução da sucessão sedimentar. A correspondência entre as estruturas regionais e os lineamentos extraídos do MDE-Copernicus destaca a relevância dessa abordagem morfoestrutural como suporte para investigações geológicas. O predomínio de lineamentos NE-SW, coincidente com as falhas mapeadas por Norconsult (2007) e MAE (2014), e a semelhança com estruturas observadas por Bjerkgard *et al.* (2009) reforçam a hipótese de reativação de antigas zonas de cisalhamento. A maior densidade de lineamentos nas áreas do embasamento cristalino (C1, C2 e O) contrasta com a menor densidade nos setores sedimentares (leste), o que reflete a diferença de idade e de resistência das formações.

Apesar dessa diminuição ao longo do tempo geológico, a presença de lineamentos em todos os compartimentos, inclusive nas regiões sedimentares, indica que houve atividade tectônica subsequente, afetando toda a área. O contraste entre lineamentos NE-SW e N-S no embasamento e E-W na cobertura sedimentar sugere que as estruturas mais recentes não estão associadas à recristalização antiga, mas a novas feições estruturais ligadas à evolução do Grupo Txitonga.

Assim, a morfologia atual de Lupilichi resulta da superposição entre controles estruturais antigos e processos erosivos recentes, em que a drenagem atua como indicadora das descontinuidades tectônicas. A coincidência espacial entre zonas de alta densidade de lineamentos e vales encaixados confirma que a reativação estrutural neotectônica ainda influencia o modelado atual, conferindo à paisagem uma assinatura morfoestrutural complexa e relacionada ao substrato cristalino.

6. Conclusão

Após o processamento dos dados e a análise comparativa dos mapas de lineamentos, é possível afirmar que, a combinação dos métodos de extração manual e automática proporciona uma análise mais precisa e robusta. A extração manual permitiu maior controle e precisão em áreas complexas e uma visão mais abrangente, podendo ser extraídas estruturas de menor dimensão e lineamentos adicionais. Esses métodos revelaram-se fundamentais para a compreensão das estruturas tectônicas e na avaliação do potencial de recursos minerais na região, especialmente em relação às intrusões mineralógicas.

As observações em Lupilichi ressaltam a importância das áreas de fraturamento associadas às intrusões graníticas e quartzo-feldspáticas, que exercem influência direta sobre a morfologia e a organização da drenagem. A rede de drenagem, fortemente condicionada pelas direções estruturais NE-SW e NW-SE, reflete a atuação de sistemas de falhas e fraturas, que controlam o escoamento superficial e a dissecação do relevo. Áreas com maior densidade de lineamentos coincidem com vales encaixados e zonas de maior fluxo fluvial, evidenciando a correlação entre a estrutura e a dinâmica erosiva. A combinação das condições tectônicas favorece a formação de mineralizações em zonas de alta densidade de lineamentos, especialmente em ambientes hidrotermais propícios à concentração de metais preciosos, como o ouro.

Observou-se que a direção principal dos lineamentos está correlacionada às zonas de alta densidade de variação na área de estudo, sugerindo que essas direções constituem vias preferenciais para a circulação de fluidos mineralizantes. Por outro lado, as zonas com baixa densidade de lineamentos correspondem a áreas de menor intensidade tectônica, associadas a rochas mais resistentes à fraturação e à deformação. Dessa forma, a integração entre análise estrutural, morfologia e drenagem permite compreender, de modo mais abrangente, a evolução morfoestrutural de Lupilichi e reforça o potencial da área para investigações geológicas e prospecção mineral no contexto do Grupo Txitonga.

Agradecimentos: Os autores agradecem em especial o Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento e Meteorologia-CEPSRM e Programa e Pós-graduação em Sensoriamento Remoto-PPGSR, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS. Ao Grupo de Cooperação Internacional de Universidades Brasileiras-GCUB-Mob, primeira edição do Edital GCUB-Mob nº 001/2022, de igual forma a Direção Nacional de Geologia de Moçambique.

Contribuições dos Autores: Â.C.B.M.: concepção do estudo, aquisição e processamento dos dados, análise e interpretação dos resultados, elaboração dos mapas e figuras, redação do manuscrito original. C.O.A.F.: orientação científica, supervisão metodológica, contribuição na interpretação dos resultados e revisão crítica do manuscrito.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

- Abdullah, A.; Akhir, J.M.; Abdullah, I. 2010. Automatic mapping of lineaments using shaded relief images derived from digital elevation models (DEMs) in the Maran–Sungai Lembing area, Malaysia. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15: 949-957.
- AIRBUS. 2020. *Copernicus Digital Elevation Model – Product Handbook*. Airbus Defence and Space.
- Akman, A.Ü. & Tüfekçi, K. 2004. Determination and characterization of fault systems and geomorphological features by RS and GIS techniques in the WSW part of Turkey. *In: ISPRS CONGRESS*, 20., 2020, Istanbul, Turkey, p. 899-904.

- Andrades-Filho, F.C.; Rossetti, D.F.; Bezerra, F.H. 2021. The unsteady post-rift stage of the South American passive margin based on the tectono-sedimentary evolution of the onshore Paraíba Basin, NE Brazil. *Quaternary International*, 580: 100-119. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.10.051>
- Andrades-Filho, F.C. & Rossetti, D.F. 2012. Effectiveness of SRTM and ALOS-PALSAR data for identifying morphostructural lineaments in northeastern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 33: 1058-1077. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.549852>
- Bezerra, P.L. 2003. *Análise estrutural da drenagem*. Belém, IBGE.
- Bricalli, L.L. 2016. Procedimentos metodológicos e técnicas em geomorfologia tectônica. *Espaço Aberto*, 6(1): 75-110. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/EspacoAberto>. Acesso em: 27 out. 2023.
- Christofoletti, A. 1980. *Geomorfologia*. 2. ed. São Paulo, Edgar Blücher.
- Clare, M.A.; Kramer, S.C.; Cotter, C.J.; Piggott, M.D. 2021. *Calibration, inversion and sensitivity analysis for hydro-morphodynamic models through the application of adjoint methods*. Preprint submitted to *Computers & Geosciences*; 1-18. <https://doi.org/10.31223/X5F327>
- Clare, M.A.; Percival, J.R.; Angeloudis, A.; Cotter, C.J.; Piggott, M.D. 2021. Hydro-morphodynamics 2D modelling using a discontinuous Galerkin discretisation. *Computers & Geosciences*, 146: 104658. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104658>
- Cruz, C.M. 2011. Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LiDAR. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Curitiba. *Anais...* Curitiba, INPE, p. 5463.
- DIVA-GIS. 2021. *DIVA-GIS*. Disponível em: <https://www.diva-gis.org/gdata>. Acesso em: 27 out. 2021.
- Edet, A.E.; Okereke, C.S.; Teme, S.C.; Esu, E.O. 1998. Application of remote-sensing data to groundwater exploration: a case study of Cross River State, southeastern Nigeria. *Hydrogeology Journal*, 6(3): 394-404. <https://doi.org/10.1007/s100400050162>
- GTK, C. 2006. *Mapa Geológico - Lupilichi Série Geológica*. Maputo, Direcção Nacional de Geologia e Minas, escala 1:250000.
- GTK. 2006. *Map explanation: geology of degree sheets in Hamambo, Maluwera, Chifunde, Zumbo, Fingoè-Mágoè, Songo, Cazula and Zóbuè*. Maputo, Direcção Nacional de Geologia e Minas, 4.v., escala 1:250000.
- Hobbs, B.E.; Means, W.D.; Williams, P.F. 1976. *An Outline of Structural Geology*. New York, John Wiley & Sons.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3): 275-370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- Howard, A.D. 1967. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 51(11): 2246-2259. <https://doi.org/10.1306/5D25C26D-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Liu, S.; Li, H.; Wang, H. 2017. Integrating remote sensing data and geographic information system for mineral potential mapping: A case study in Luanchuan County, China. *Geocarto International*, 32(4): 379-394.
- Lin, C.W.; Hsu, C.Y.; Yu, T.D. 2007. The Chiuhsiungken fault: A candidate to trigger a hazardous earthquake in western Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(2): 390-402. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.07.021>
- Loisios, D. & Tzelepis, N.B. 2007. A methodology for creating analytical hill-shading by combining different lighting directions. In: 23rd INTERNATIONAL CARTOGRAPHIC CONFERENCE, Moscow. *Anais...* Moscow, p. s/p.
- MAE – Ministério da Administração Estatal. 2014. *Relatório geológico e geomorfológico da região de Lupilichi, norte de Moçambique*. Maputo, Governo de Moçambique.
- Macuácuá, Â.C.B. 2025. *Sensoriamento remoto aplicado à caracterização geológica e potencial geológico aurífero: folha 34 do grau quadrado 1135 (Lupilichi), Grupo Txitonga, província de Niassa*. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <http://hdl.handle.net/10183/294703>

- Masoud, A. & Koike, K. 2006. Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 45(4/5): 467-477. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.04.005>
- Melo, M.S. & Rossetti, D.F. 2015. Morphostructural lineaments based on DEM-SRTM derivations in the Pirai Depression, State of Paraná, Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 16(1): 145-160. <https://doi.org/10.20502/rbg.v16i1.615>
- Mudd, S.M. 2020. Chapter 4 - Topographic data from satellites. In: Tarolli, P.; Mudd, S.M. (Ed.). *Developments in Earth Surface Processes*, 23: 91-128. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00004-7>
- Nopeia, M.A. 2016. *Mapeamento litoestrutural da folha nº 736 através de imagens multiespectrais de alta resolução ASTER*. Maputo. Dissertação de Licenciatura, Universidade Eduardo Mondlane.
- Norconsult, C. 2007. *The Geology of Niassa and Cabo Delgado Provinces, with parts of Zambezia and Nampula Provinces*. Maputo, Direcção Nacional de Geologia, Republic of Mozambique.
- O'Leary, D.W.; Friedman, J.D.; Pohn, H.A. 1978. Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, 87: 1463-1469. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87<1463:LLLSPN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87<1463:LLLSPN>2.0.CO;2)
- Odigi, M.I. & Okonny, I.P. 1986. *Application of radar imagery to structural and geological studies in the Oban Massif, SE Nigeria*. Port Harcourt, Department of Geology, Faculty of Science, University of Port Harcourt.
- Orey, F.L. 1992. *Origem, transporte e deposição do ouro em Manica*. Lisboa. Dissertação de Mestrado, Ciências da Terra, Universidade Nova de Lisboa.
- PCI Geomatics, 2013. *Geomatica 2013: Software for Remote Sensing and Photogrammetry*. Vancouver, PCI Geomatics.
- Peña, S.A. & Abdelsalam, M.G., 2006. Orbital remote sensing for geological mapping in southern Tunisia: implication for oil and gas exploration. *Journal of African Earth Sciences*, 44(2), 203-219. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.10.011>
- Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, A.; Bamler, R. 2003. The Shuttle Radar Topography Mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57(4): 241-262. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00124-7)
- Ross, J.S. 1992. O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. *Revista do Departamento de Geografia – USP*, 6: 17-29.
- Schumm, S.A. 1981. Evolution and response of the fluvial system: sedimentologic implications. *SEPM Special Publication*, 31: 19-29. <https://doi.org/10.2110/pec.81.31.0019>
- Soares, P.C. & Fiori, A.P. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícia Geomorfológica*, 16(32): 71-104.
- USGS. 2024. *USGS Global Visualization Viewer (GloVis)*. Disponível em: <https://glovis.usgs.gov>. Acesso em: 10 jan. 2024.