

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS – ICE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - PPGGEO

BEATRIZ PINHEIRO DE SOUZA

MODELAGEM GEOLÓGICA DO SETOR NORDESTE DA BACIA VAUPÉS-
AMAZONAS: INTEGRAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOFÍSICA

MANAUS - AM

2023

BEATRIZ PINHEIRO DE SOUZA

MODELAGEM GEOLÓGICA DO SETOR NORDESTE DA BACIA VAUPÉS-
AMAZONAS: INTEGRAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOFÍSICA

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, da Universidade Federal do Amazonas, para defesa da mestranda da pós-graduação, concentrada na linha de pesquisa II de Geologia Sedimentar e Ambiental.

ORIENTADOR: PROF. DR. LUIS ANTONIO CASTILLO LÓPEZ
COORIENTADORA: PROF^a. DRA. SOLANGE DOS SANTOS COSTA

MANAUS - AM

2023

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S729m Souza, Beatriz Pinheiro de
Modelagem geológica do setor nordeste da Bacia do Vaupés-
Amazonas: : integração de sensoriamento remoto e geofísica /
Beatriz Pinheiro de Souza . 2023
89 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Luis Antonio Castillo López
Coorientadora: Solange dos Santos Costa
Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal
do Amazonas.

1. Amazônia. 2. Bacia Vaupés-Amazonas. 3. Lineamentos. 4.
Geomorfologia Sísmica. 5. Sentinel 1 A. I. López, Luis Antonio
Castillo. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

BEATRIZ PINHEIRO DE SOUZA

MODELAGEM GEOLÓGICA DO SETOR NORDESTE DA BACIA VAUPÉS-AMAZONAS: INTEGRAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO E GEOFÍSICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Geociências, área de concentração em Geociências.

Aprovada em: 10 de abril de 2023.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Luis Antonio Castillo Lopez, Presidente.
Universidade Federal do Amazonas

Documento assinado digitalmente

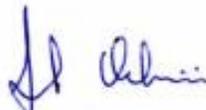
gov.br

RAPHAEL DE CARLO SILVA DOS SANTOS

Data: 16/05/2023 18:44:30-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Raphael Di Carlo Silva dos Santos, Membro.
Universidade Federal do Amazonas



Prof.ª Dr.ª Jamile Dehaini, Membro.
Universidade do Estado do Amazonas

À minha mãe e ao meu pai, que possibilitaram
o meu caminho até aqui.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças e sabedoria em todos os momentos durante a elaboração desta pesquisa de mestrado, pois sem Ele não seria possível a realização deste trabalho de pesquisa. Agradeço também a todos aqueles que contribuíram, de forma direta ou indireta, com o desenvolvimento desta pesquisa. Gratidão a todos vocês!

Aos meus pais, Léo e Cristina, eu sou eternamente grata pelas oportunidades que me proporcionaram, bem como o apoio e compreensão ao longo dessa jornada. Só Deus sabe que não foi um caminho tão fácil de trilhar, mas vocês fizeram o impossível para que eu conseguisse chegar até aqui.

Ao meu esposo, Rodrigo Viana, por todo o companheirismo, força e incentivos dados ao longo desse período. Sem o seu apoio, a caminhada seria cinzenta.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Luis Castillo e a Prof.^a Dr.^a Solange dos Santos Costa, agradeço imensamente pela orientação dada ao longo do mestrado, por todo respeito, suporte e paciência dedicados ao desenvolvimento.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM e a Universidade Federal do Amazonas - UFAM pela concessão de bolsa de pesquisa e pelo Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geociências que possibilitaram a continuação dos meus estudos na região.

Aos meus amigos, Wagner de Souza e Júlio Iago, que sempre estavam dando palavras de apoio e incentivo para a conclusão desta etapa acadêmica, meus muito obrigado pelo companheirismo de vocês. À minha companheira de mestrado, Andreza Miranda, que tive o prazer de conhecer e compartilhar esse caminho sempre com bastante alegria e leveza. E aos meus amigos e companheiros das jornadas diárias, Rebeca Alfaia, Tadeu Rocha e Darielle Cruz, que tornam os dias mais leves com suas presenças e demonstração de carinho, além das palavras de incentivo para conseguirmos vencer não só o dia a dia, mas sim um pedaço das nossas vidas.

Mais uma vez, expresso muita gratidão a todos que passaram pelo meu caminho e deixaram seu registro para que tudo ocorresse bem.

RESUMO

A região da Amazônia Colombiana possui uma lacuna de informações de cunho geocientífico, especialmente na Bacia Vaupés-Amazonas, que tem sido pouco explorada geologicamente devido a sua densa cobertura vegetal, difícil localização e poucos afloramentos expostos. Em estudos recentes, foram levantados dados que contribuem significativamente para o conhecimento da geometria e disposição tridimensional das camadas de rocha localizadas em profundidade, bem como as feições lineares registradas em superfície. A disponibilidade de dados de superfície e de subsuperfície e a sua integração possibilitam a análises de estruturas geomorfológicas ainda não descritas no interior da Bacia Vaupés-Amazonas. Diante disso, visando o uso de dados de subsuperfície, tais como seções sísmicas, perfilagem de poços e dados aeromagnéticos, e dados de superfície, como imagens de radar, disponíveis dessa área, foi elaborado a proposta desse estudo para a geração de um modelo geológico em profundidade, com a identificação de padrões de feições lineares em superfície. As evidências geomorfológicas e tectono-estratigráficas da área, em profundidade, foram obtidas a partir da avaliação sismoestrutural e sismoestratigráfica, enquanto o mapeamento dos lineamentos, bem como a identificação dos seus padrões foram obtidos a partir dos dados de radar do sensor Sentinel e dados aeromagnéticos. Com base nos dados interpretados, foi sugerido a ocorrência de feições associadas a paleocânions e vales, oriundos da reativação de estruturas rúpteis preexistentes no embasamento Pré-cambriano. São evidenciados rochas do pré-cambriano até o recente, bem como registro de erosão e adelgaçamento e sedimentação resultante da acreção lateral, influenciados por processos de subsidência e isostasia. Tais evidências podem ser relacionadas com a evolução do Alto do Vaupés e a formação do Gráben Apaporis, que ocorre devido no paleozoico inferior oriundos do falhamentos que foram reativados, a partir de episódios tectono-estratigráficos associados.

Palavras-chave: Amazônia; Bacia Vaupés-Amazonas; Lineamentos; Geomorfologia Sísmica, Sentinel 1 A.

ABSTRACT

The Colombian Amazon region has a geoscientific information gap. The Vaupés-Amazonas Sedimentary Basin is located in the Amazonas region, which is little geologically explored due to its dense vegetation cover, difficult location, and few exposed outcrops. Data collected contribute significantly to the knowledge of geometry, three-dimensional settling of the rock layers in depth, and the linear features registered on the surface. The availability of surface and subsurface data and their integration make it possible to analyze geomorphological structures not yet described within this basin. Because of this, aiming at the use of subsurface data, such as seismic sections, well log, and aeromagnetic data, and surface data, such as radar images, available from this area, the proposal of this study was elaborated for the generation of a geological model in depth, with the identification of patterns of linear features on the surface. The geomorphological and tectono-stratigraphic evidence begins with the seismostratigraphic evaluation. At the same time, the lineaments' mapping and identifying their patterns from the Sentinel sensor radar and aeromagnetic data. Based on the interpreted data, we suggested that the occurrence of features associated with paleo canyons and valleys originated from the reactivation of preexisting brittle structures in the Precambrian basement. Rocks from the Precambrian to the recent evidence, as well as records of erosion and thinning, and sedimentation resulting from lateral accretion, influenced by processes of subsidence and isostasy. Such evidence can be related to the evolution of the Vaupés High to the formation of the Apaporis Graben due to Lower Paleozoic origins of faults reactivated from associated tectono-stratigraphic episodes.

Keywords: Amazon; Vaupés-Amazonas Basin; Lineaments; Seismic Geomorphology, Sentinel 1 A.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização geográfica da área de estudo na região de Vaupés e Guaviare (Colômbia)	17
Figura 2 – (a) mapa da distribuição das Províncias Geocronológicas e as principais associações litológicas do Cráton do Amazonas de Tassinari e Macambira (1999) e (b) mapa de Santos <i>et al.</i> , (2006) com divisões das Províncias do Cráton Amazonas a partir dos limites idades.	18
Figura 3 - Mapa geológico da área de estudo com os principais lineamentos estruturais.	19
Figura 4 - Coluna litoestratigráfica da Bacia Vaupés-Amazonas e eventos tectônicos (GARCIA; CRUZ; UMAÑA, 2013).	22
Figura 5 - Representação da propagação de uma onda incidente P, onde a mesma é refletida e transmitida em ondas S e P (SEVERIANO RIBEIRO, 2001)	26
Figura 6 - Modelo esquemático dos modos de aquisição das imagens do satélite Sentinel 1.	30
Figura 7 - Localização dos poços e linhas sísmicas na região de interesse.....	32
Figura 8 – Fluxograma das metodologias aqui apresentadas.	35
Figura 9 – Imagem da primeira página do artigo científico publicado pela Revista Brasileira de Geomorfologia (RBG). O referido artigo segue está inserido no anexo.....	39
Figura 10 – Perfil de raio gama com a identificação de argila e não argila (Track GR), a classificação da litologia, das fácies e identificação das unidades geológicas perfuradas.....	40
Figura 11 – Interpretação das linhas LM1 (A), LS (B) e LS2 (C).	42
Figura 12 – Interpretação da linha sísmica LM1.....	43
Figura 13 – Linha sísmica posicionada tridimensionalmente com a interpretação sismoestratigráfica e a correlação com o poço.	45
Figura 14 – Seção esquemática baseada em horizontes interpretados LM1 (a) e a projeção dos limites de camada até os dados do perfil geofísico do poço U (b).	45
Figura 15 - Detalhes do esquema: (a) Esboço esquemático do detalhamento dos 67 km da seção sísmica e (b) a projeção da continuidade desse arcabouço sedimentar.	46
Figura 16 - Linha sísmica LM1 e detalhes de feições geomorfológicas na porção rasa.....	47
Figura 17 – Detalhamento das feições visualizadas com o uso do atributo TecVA.	48
Figura 18 - Linhas sísmicas com as superfícies correspondentes às feições dos paleocânions da camada mais rasa e a superfície (plano amarelo).	49
Figura 19 - Modelo determinístico da área de estudo.	49
Figura 20 – Mapa do campo magnético da área de estudo.....	50
Figura 21 - (a) Resultado do filtro de Amplitude do Sinal Analítico e (b) primeira derivada.....	51
Figura 22 – Lineamentos geofísicos principais (amarelo) obtidos a partir do mapa de Anomalia Magnética de Campo Total.	52

Figura 23 - Lineamentos geofísicos secundários (preto), extraídos com o auxílio no mapa da ASA dos dados magnéticos.....	53
Figura 24 - Primeira Derivada em Z com realce das feições estruturais.....	53
Figura 25 – (a) sombreamento sintético aplicado ao produto da 1ª derivada, (b) mapeamento dos lineamentos (vermelha), (c) o diagrama de roseta indicando a direção preferencial das feições e (d) direção preferencial considerando as dimensões das estruturas lineares.	54
Figura 26 - (a) Imagem Sentinel-1 A original, sem processamento digital, (b) resultado da aplicação do Filtro de Frost, (c) correção radiométrica e (d) imagem corrigida geometricamente.....	56
Figura 27 – (a) Recorte da imagem corrigida geometricamente e (b) sua composição colorida.	56
Figura 28 - Lineamentos mapeados a partir das imagens SAR do Sentinel 1 A.....	57
Figura 29 - Imagens do relevo sombreado com 30 metros de resolução espacial, obtidos por azimutes solares de 0° (a) e 45° (b), com os seus diagramas de rosetas.....	58
Figura 30 – (a) imagens do relevo sombreado para os azimutes solares de 180° e (b) 225°, com a interpretação dos lineamentos morfoestruturais e seus diagramas de rosetas.	59
Figura 31 – (a) imagens do relevo sombreado para os azimutes solares de 135° (b) e 315° e seus diagramas de rosetas.....	59
Figura 32 - Produto final da extração dos lineamentos e a roseta indicando a direção preferencial dos mesmos.	60
Figura 33 - Correlação dos dados da geologia regional com os dados de lineamentos extraídos de cristas e vales do relevo (vermelho).	61
Figura 34 – Correlação dos lineamentos magnéticos (vermelho) e as falhas na seção sísmica LS2 (preto). 62	
Figura 35 – Modelo final, resultado da integração dos dados de superfície (radar e magnéticos).....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista da identificação dos dados de poços utilizados e suas respectivas informações de coordenadas geográficas e de perfis geofísicos.....	31
Tabela 2 - Informações de coordenadas geográficas do início (i) e fim (f) das linhas sísmicas.....	31
Tabela 3 - Lista das imagens Sentinel 1A utilizadas e suas respectivas datas de imageamento e download.....	33

LISTA DE SIGLAS

ASA – Amplitude do Sinal Analítico
CAL - *Caliper* - Calibre
CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DT – *Sonic* - Sônico
ESA - *European Space Agency* Agência Espacial Europeia
GR – *Gamma ray* - Raio Gama
ILD - *Resistivity* - Resistividade
IW - *Interferometric Wide Swath Mode* - *Modo Interferométrica*
LAS - *Log ASCII Standard*
m - metros
MAGR – Campo Magnético Residual
MDE – Modelo Digital de Elevação
nT – nanotesla
NPFI - *Neutron*
PDI – Processamento Digital de Imagem
RHOB – *Density* - Densidade
SP – *Spontaneous Potential* - Potencial Espontâneo
SAR - *Synthetic Aperture Radar* - Radar de Abertura Sintético
SGC - Serviço Geológico da Colômbia
SNAP - *Sentinel Application Platform* - Programa Sentinel
UTM - Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Apresentação	15
1.2. Objetivos	16
1.3. Localização da área de estudo	16
2. GEOLOGIA REGIONAL	17
2.1. Compartimentação do Cráton Amazonas	17
2.1.1. Província Rio Negro	18
2.1.2. Província Sunsás	19
2.2. Geologia Local	19
2.2.1. Pré-cambriano	20
2.2.1.1. Complexo Mitú	20
2.2.1.2. Formação Piraparaná	20
2.2.1.3. Intrusivas básicas	20
2.2.1. Paleozoico	20
2.2.1.1. Formação Araracuara	20
2.2.1. Cenozoico	21
2.2.1.1. Sedimentos do Neógeno	21
2.2.1.2. Depósito Terraços	21
2.2.1.3. Depósito aluvial	21
2.3. Estrutural	22
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1. Perfilagem Geofísica de poço	23
3.2. Sísmica de Reflexão	25
3.3. Magnetometria	27
3.4. Sensoriamento Remoto	28
3.4.1. Missão Sentinel 1A	29
3.4.2. Modelo Digital Global de Elevação Copernicus	30
4. MATERIAIS E METODOLOGIAS	31
4.1. Materiais	31
4.1.1. Dados da perfilagem Geofísica de Poço e descrição das amostras de calha	31
4.1.2. Linhas sísmicas 2D	31
4.1.3. Dados aeromagnetométricos	32
4.1.4. Imagens de Radar	32
4.1.4.1. Sentinel 1A	32
4.1.4.2. Copernicus	33
4.1.5. Recursos computacionais utilizados para interpretação de dados sísmicos e processamento digital de imagens.	33
4.2. Métodos	34
4.2.1. Perfil Geofísico de Poço	35
4.2.2. Seções Sísmicas	35
4.2.3. Imagens de Sentinel 1A	36
4.2.4. Dados Aeromagnéticos	37
5. RESULTADOS	38
5.1. Perfis Geofísicos de Poço	39

5.2. Seções Sísmicas	41
5.3. Dados Aeromagnéticos	50
5.4. Imagens Sentinel-1A	55
5.5. Integração dos dados	60
6. DISCUSSÕES	63
7. CONCLUSÃO	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXO	71

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

A Bacia Sedimentar Vaupés-Amazonas está situada no sudeste da Colômbia, na fronteira entre Brasil e Peru, e possui poucos estudos geológicos, principalmente devido a sua difícil localização, densa cobertura vegetal da floresta amazônica, poucas vias de acesso e escasso povoamento (KROONENBERG; REEVES, 2011). Os poucos estudos publicados na região, são provenientes da análise de dados obtidos por sensores remotos combinadas com dados geofísicos aerotransportados (CELADA *et al.*, 2006). Em áreas remotas, onde há pouca exposição de afloramentos rochosos e difícil acesso, a investigação geológica é feita principalmente a partir da integração e interpretação de diversas fontes de dados de métodos indiretos (GÓMEZ, 2020). Essas metodologias, tais como levantamento sísmico, magnético, gravimétrico, elétrico, radioativo e eletromagnético, possibilitam a geração de novas informações que contribuam para a compreensão da evolução geológica da área, bem como subsidia a identificação de pontos estratégicos para a coleta de informações através de métodos diretos quando possível.

Dentro dos tipos de métodos indiretos mais empregados, temos a magnetometria, a sísmica, a perfilagem de poço e o sensoriamento remoto. A magnetometria tem a finalidade de investigar a subsuperfície através da medição da susceptibilidade magnética, com base no campo magnético primário da Terra e na magnetização induzida e remanescente das rochas da crosta (LUIZ; SILVA, 1995). Já a sismoestratigrafia investiga e aprimora o conhecimento dos dados sísmicos para a compreensão da evolução tectono-sedimentar de uma bacia a partir da interpretação estratigráfica desses dados (SEVERIANO RIBEIRO, 2001), enquanto a perfilagem de poços representa graficamente as propriedades petrofísicas das rochas atravessadas por um poço de acordo com a profundidade (NERY, 2013). Para estudos de superfície, o sensoriamento remoto se baseia no estudo de imagens da superfície que foram geradas a partir das características quantitativas das respostas físicas dos materiais terrestres após os mesmos serem submetidos à radiação eletromagnética (MENESES; ALMEIDA 2012).

Tendo em vista os poucos estudos de cunho acadêmicos na área da Bacia do Vaupés-Amazonas, a variedade de insumos que podem ser utilizados para o estudo geológico de uma região e a disponibilidade de dados aeromagnéticos, sísmicos, perfilagem e imagens de radar da região, visando as contribuições de qualidade que os mesmos oferecem para a realização do mapeamento tradicional, optou-se por interpretar e correlacionar tais dados, a fim de realizar a

caracterização geológica e geofísica da superfície e subsuperfície da porção noroeste desta Bacia Sedimentar. O processamento desses dados foi realizado para discriminar feições geológicas a partir das assinaturas geofísicas, avaliando, sobretudo, a relação com a resposta textural e os registros de sondagens. As aplicações de ferramentas de acondicionamento e processamento, tais como a correções radiométricas, geométricas e eliminação de ruídos de imagens de radar, análises petrofísicas, a aplicação de atributos nas seções sísmicas, possibilitaram o mapeamento e desenvolvimento de um modelo geológico tridimensional para o melhor entendimento sobre o arcabouço tectono-estratigráfico da região.

1.2. Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo geral realizar a caracterização geológica e geofísica da porção noroeste da Bacia Sedimentar do Vaupés-Amazonas a partir da integração dos dados de superfície, como imagens de radar, e de subsuperfície, tais como dados sísmicos, perfilação geofísica de poços e dados aeromagnéticos.

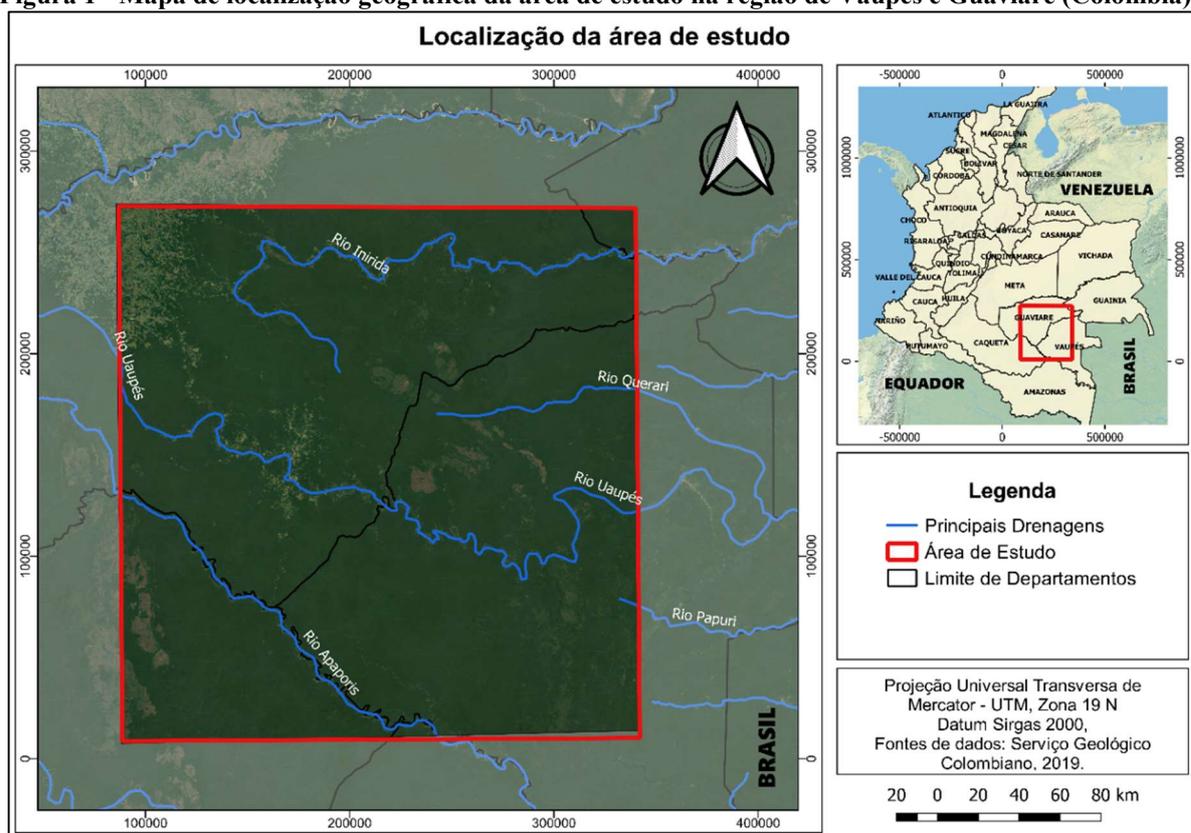
Os objetivos específicos incluem:

- ❖ Identificar as feições geológicas da superfície a partir das respostas texturais das imagens de radar do Sentinel 1, a fim de relacioná-las com dados geológicos pré-existent;
- ❖ Discriminar feições estruturais, texturais e estratigráficas registradas a centenas de metros de profundidade utilizando dados aeromagnéticos, levantamentos sísmicos e de poços, bem como a identificação das fácies sísmicas e;
- ❖ Integrar os dados com a finalidade de realizar um modelo tridimensional da disposição espaço-temporal do arcabouço tectono-estratigráfico do setor noroeste da Bacia Sedimentar Vaupés-Amazonas.

1.3. Localização da área de estudo

A área de estudo está situada na porção noroeste da Amazônia, próximo da região de fronteira entre Colômbia e Brasil, compreendendo a área da Bacia Sedimentar Vaupés-Amazonas, dentro dos Departamentos de Vaupés e Guaviare (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização geográfica da área de estudo na região de Vaupés e Guaviare (Colômbia)



Fonte: Autora (2021).

2. GEOLOGIA REGIONAL

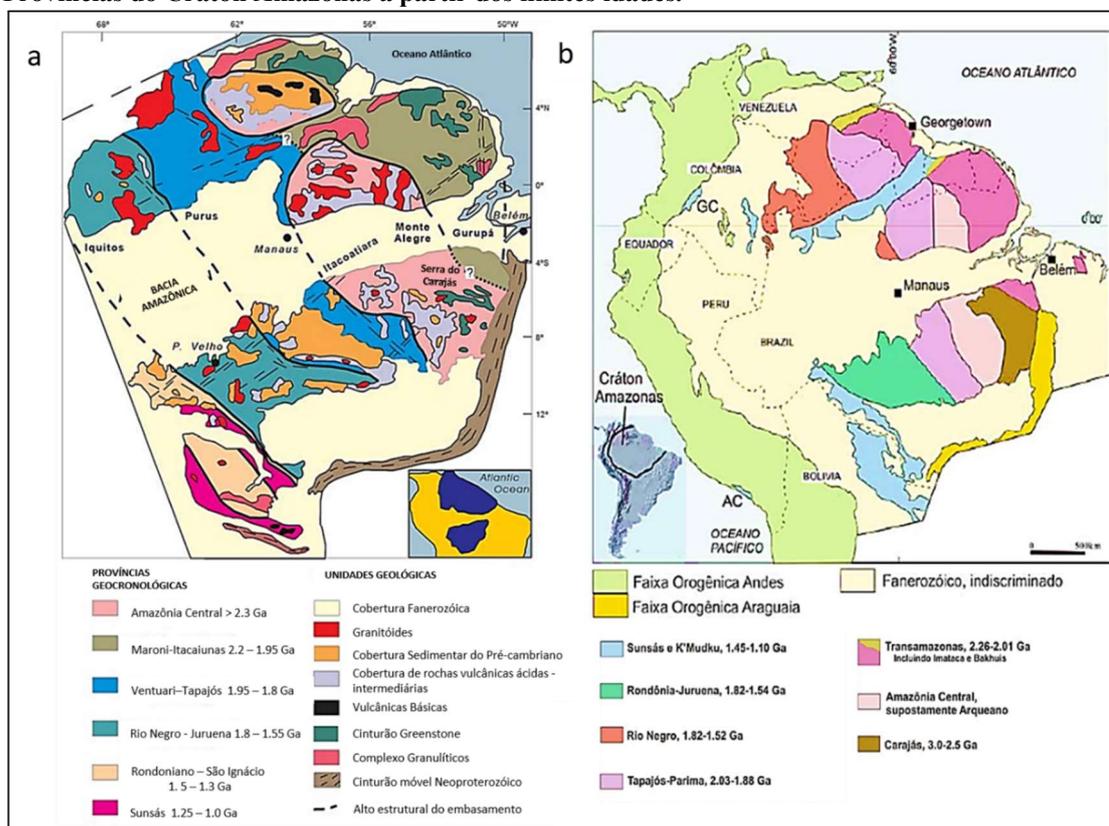
2.1. Compartimentação do Cráton Amazonas

Nas décadas de 1990 e 2000, estudos isotópicos (principalmente Sm-Nd, Rb-Sr e U-Pb), com mapeamento geológico, geocronológico e geofísicos deram origem a duas principais propostas de compartimentação, em províncias geocronológicas, do Cráton Amazonas. O modelo de Tassinari e Macambira (1999) evoluiu a partir da proposta inicial de Cordani *et al.* (1979) que utilizou dados de datação de K-Ar e Rb-Sr para separar o Cráton em quatro províncias iniciais. Em outro modelo, o Cráton Amazonas é dividido em seis províncias geocronológicas, que ocorrem em forma de faixas na direção NW, e que incluem quatro cinturões móveis acrescentados a um proto-cráton arqueano (Figura 2a). Com o passar dos anos, o aporte de novos dados serviu para embasar e remodelar essas compartimentações chegando aos modelos reconhecidos atualmente.

O modelo a partir de dados geocronológicos de U-Pb e Pb-Pb de SANTOS *et al.* (2000), SANTOS *et al.* (2006) e SANTOS *et al.* (2008) propuseram que o Cráton Amazonas fosse dividido em sete províncias geocronológicas na direção NW, bem como uma faixa de idade

mesoproterozoica denominada K'Mudku, que ocorre na porção norte do cráton na direção NE-SW, que afeta as províncias Transamazônica, Tapajós Parima e Rio Negro (Figura 2b).

Figura 2 – (a) mapa da distribuição das Províncias Geocronológicas e as principais associações litológicas do Cráton do Amazonas de Tassinari e Macambira (1999) e (b) mapa de Santos *et al.*, (2006) com divisões das Províncias do Cráton Amazonas a partir dos limites idades.



Fonte: Tassinari e Macambira (1999) e Santos *et al.* (2006).

De acordo com os modelos de compartimentação, a área de estudo está inserida dentro da Província Rio Negro-Juruena, segundo o modelo de Tassinari e Macambira (1999), ou nas Províncias Rio Negro e Sunsás e K'Mudku, segundo Santos *et al.* (2000). Assim, optou-se por descrever a geologia regional de acordo com a compartimentação de Santos *et al.* (2000).

2.1.1. Província Rio Negro

Localizada na porção noroeste do Cráton do Amazonas, a Província Rio Negro ocupa, geograficamente, o extremo norte do estado do Amazonas e se prolonga para áreas no sudeste da Colômbia e sudoeste da Venezuela (SANTOS *et al.*, 2000). Esta é uma região de difícil acesso, com densa cobertura florestal e com pouco conhecimento geológico e está dividida em quatro domínios geológicos, sendo dois no Brasil (Domínio Alto Rio Negro e Domínio Imeri), um na Colômbia (Domínio Guiana) e um na Venezuela (Domínio Ventuari) (SANTOS *et al.*, 2000).

Na Colômbia, segundo Galvis, Huguet e Ruge (1979), as rochas dessa província estão incluídas dentro do Complexo Mitú, que apresentam dois intervalos de idades distintas, uma mais velha e outra mais jovem, onde a primeira é interpretada como reflexo de levantamento, exumação e estabilização, enquanto a segunda é discutida como superaquecimento por magmatismo anorogênico ou cisalhamento ao longo da faixa K'Mudku.

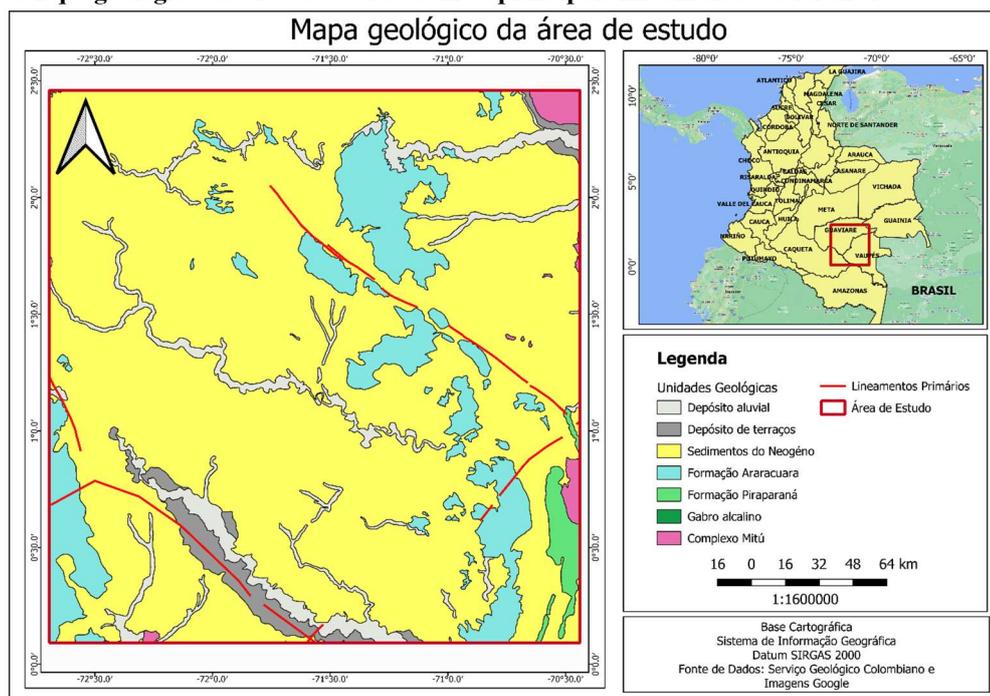
2.1.2. Província Sunsás

Esta é a unidade cronoestratigráfica mais jovem do Cráton Amazonas e sua evolução geodinâmica pode ser relacionada com a Orogenia Grenviliana com idade de 1.3 - 1.0 Ga (CELADA *et al.*, 2006). Na Colômbia, essa província é representada pelo cinturão granulítico de Grazón de 1.18 Ga, bem como inúmeros afloramentos de rochas antigas rodeadas por rochas mais jovens (ÁLVAREZ (1981); KROONENBERG, (1982)). A Formação Piraparaná e o Granófiro de Tijereto também fazem parte das litologias da província Sunsás (GALVIS; HUGUETT; RUGE, 1979).

2.2. Geologia Local

A área de estudo está localizada nos departamentos de Vaupés e Guaviare, na porção noroeste da bacia sedimentar do Vaupés-Amazonas. Essa área é composta por rochas do embasamento cristalino das províncias Rio Negro e Sunsás que são cobertas por sedimentos da Bacia Vaupés-Amazonas (Figura 3). Ao todo são identificadas sete unidades geológicas onde estão descritas a seguir:

Figura 3 - Mapa geológico da área de estudo com os principais lineamentos estruturais.



Fonte: Autora (2022).

2.2.1. Pré-cambriano

2.2.1.1. Complexo Mitú

As rochas do embasamento cristalino da área de estudo fazem parte do Complexo Mitú (GALVIS; HUGUETT; RUGE, 1979). Esse complexo é constituído de rochas metamórficas de alto grau, de idade Paleoproterozoica, tais como gnaisses, anfíbolitos migmatitos, quartzitos e granitoides (CELADA *et al.*, 2006; GÓMEZ *et al.*, 2015). Algumas áreas dessa unidade estão cobertas por rochas metassedimentares de baixo grau, tais como a Formação La Pedrera, Grupo Tunuí e as rochas vulcano-sedimentares da Formação Piraparaná (MOYANO-NIETO *et al.*, 2022).

2.2.1.2. Formação Piraparaná

Definida por Galvis, Huguett e Ruge (1979) e Huguett, Galvis e Ruge (1979), ao longo do projeto PRORADAM, a Formação Piraparaná é caracterizada por uma sequência de rochas vulcano-sedimentares avermelhadas dobrada que apresentam mergulho para oeste. Estas rochas afloram em forma de colinas isoladas sobre a paisagem plana da área (KROONENBERG, 2019). Segundo dados preliminares de datação isotópica de Rb-Sr essa formação tem cerca de 1.200 Ma (PRIEM *et al.*, 1982).

2.2.1.3. Intrusivas básicas

O Complexo de Mitú e o Grupo Tunuí são intrudidos por diques máficos não metamorfizados. Na área de estudo, na base do poço Vaupés, foi encontrado um corpo intrusivo composto por gabro granofirítico que apresenta em sua mineralogia dois piroxênios que, de acordo com Franks (1988), foram datados em K-Ar apresentando a idade em 826 ± 41 Ma.

2.2.1. Paleozoico

2.2.1.1. Formação Araracuara

É uma sequência de rochas predominantemente arenosas que ocorrem em um sítio na aldeia de Araracuara, no Departamento do Amazonas (GALVIS; HUGUETT; RUGE, 1979). São representadas por duas grandes faixas de planalto alinhadas e descontínuas na direção norte-sul, mergulhando para oeste, que cobrem as rochas do Complexo Mitú e Formação Piraparaná. Sua estratigrafia é composta por conglomerados na base, em contato com o Complexo Mitú, arenitos com granulação média, intercalados com argilitos e siltitos e mais próximo ao topo predomina areia com presença de conglomerados intraformacionais. Sua espessura varia entre 80 m e 100 m e é identificada em sua estrutura a estratificação cruzada. Segundo Celada *et al.*, (2006), dados paleontológicos de níveis distintos dessa formação obtidos por Thery (1982) confirmaram a idade do Ordoviciano Inferior a Médio (fósseis de arcritacos

do Arenigiano) para esse trecho obtidas por Bogotá (1982) e com isso é possível afirmar que esta formação é de origem marinha e podem ser correlacionadas com outros depósitos tais como o Arenito Vaupés e o Arenito San José que foram descritos por Vesga e Castillo (1972). Segundo Baldis (1988), a Formação Benjamin Constant da Bacia do Solimões, localizada próximo a Letícia, estaria correlacionada com a Formação Araracuara, devido à influência da presença de um corredor marinho contínuo que conectava as duas bacias.

2.2.1. Cenozoico

2.2.1.1. *Sedimentos do Neógeno*

Definido por Galvis, Huguet e Ruge (1979), os sedimentos dessa unidade são classificados como inferior e superior, sendo o primeiro composto por argila azul e o segundo por um pacote formado por conglomerado ferruginoso na base e argilas roxas e amarelas, com arenito pouco consolidado com matriz ferruginosa em alguns trechos na porção superior. Segundo García *et al.*, (2013), as camadas de solo ferruginoso oolíticas são formadas pelo intemperismo das rochas graníticas do Complexo Mitú e que não fazem parte desta unidade. Esses sedimentos são representados por afloramentos de superfícies planas, cobertas por vegetação da floresta Amazônica, com um sistema de drenagem do tipo dendrítico que se conectam aos rios maiores, como o rio Vaupés, onde também são encontrados os seus melhores afloramentos no período do verão amazônico, quando os níveis de água dos rios estão mais baixos.

2.2.1.2. *Depósito Terraços*

Segundo IGAC (1999), os depósitos de Terraços são compostos por sedimentos antigos das planícies aluviais que foram dissecados durante o período de estabilidade das correntes. São compostos de cascalho fino, areia grossa e argila com idade provável do Pleistoceno.

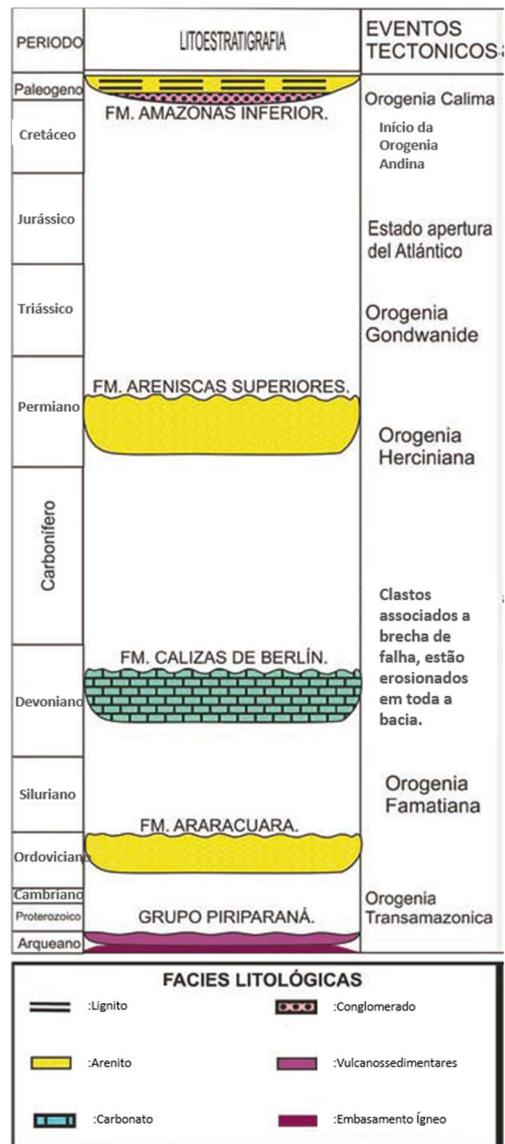
2.2.1.3. *Depósito aluvial*

São compostos por depósitos de areia quartzosa, de espessura variando em até 3 metros, oriundas de rios secundários que drenam e descarregam as suas águas nos rios principais. Nesse processo, o depósito de sedimentos nas laterais dos rios é ocasionado devido ao desvio lateral e perda de energia dos fluxos geralmente situados em áreas planas. Esses materiais são provenientes da dissecação causada pela denudação das partes mais altas da região, representadas pelas rochas do Complexo do Mitú, de composição quartzo feldspática, que após passar pelo processo de alteração mineral e lixiviação geram sedimentos quartzosos translúcidos e leitosos (GARCÍA *et al.*, 2013).

2.3. Estrutural

As principais fases do tectonismo na região amazônica, conforme a litoestratigrafia da área (Figura 4), ocorreram entre o pré-cambriano e o paleozoico, sendo posteriormente registrados eventos com menos intensidade. Dentro desses, as principais fases tectônicas que ocorreram no pré-cambriano foram a Orogenia Transamazônica seguida de evento que proporcionou a formação de vários *riftes*, na direção NW-SE, com deposição de material sedimentar que estão limitadas por falhas que não apresentam expressão superficial. No proterozoico foram gerados diversos falhamentos normais devido ao regime tectônico regional distensivo, o que provocou a formação do Graben Apaporis (GARCIA; CRUZ; UMAÑA, 2013).

Figura 4 - Coluna litoestratigráfica da Bacia Vaupés-Amazonas e eventos tectônicos (GARCIA; CRUZ; UMAÑA, 2013).



Fonte: GARCIA; CRUZ; UMAÑA, 2013.

No paleozoico, houve uma leve subsidência onde foram depositados sedimentos, como a Formação Araracuara, e um leve soerguimento da bacia correlacionado com a presença de um corpo intrusivo (GARCIA; CRUZ; UMAÑA, 2013). Durante a Orogenia Herciniana, a Bacia do Vaupés-Amazonas sofreu um levantamento, seguido de uma subsidência termal que provocou o depósito da Formação Arenitos Superiores. E no Cenozoico, foram depositados os sedimentos fluviais provenientes do Escudo das Guianas, bem como os sedimentos provenientes da transgressão marinha do mar do Caribe. Já os sedimentos do Neógeno, correspondentes aos sedimentos eólicos, são os depósitos mais recentes da bacia (GARCIA; CRUZ; UMAÑA, 2013).

Ao longo da região são mapeadas algumas falhas e fraturas com direção preferencial NW-SE e NE-SW, como o lineamento de Carurú e o lineamento de Mitú. Além disso, também são descritas outras feições com direção N-S (MOYANO-NIETO *et al.*, 2022). Tais informações foram obtidas a partir de imagens de radar (DE BOORDER, 1981) e dados aerogeofísicos (ETAYO *et al.*, 1983; KROONENBERG; REEVES, 2011; DE BOORDER, 2019; MOYANO-NIETO *et al.*, 2020). Uma feição identificada por Etayo *et al.* (1983) é denominada como “Rifte de Apaporis”, possui direção preferencial NWW-SEE, e está localizada dentro da área de estudo. Esta feição é delimitada pela falha de Carurú ao norte e afloramento de estratos paleozoicos na porção sul.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste trabalho foram utilizados vários dados geofísicos e sensoriamento remoto para a elaboração do modelo tridimensional, tais como dados aeromagnéticos, linhas sísmicas, perfilagem de poços e imagens de radar. Os dados foram avaliados, processados utilizando ferramentas e pacotes computacionais, para magnetometria (Oasis Montaj), sísmica e poços (Opendtect) e mapeamento (SNAP e QGis) segundo a técnica e ferramentas empregadas.

3.1. Perfilagem Geofísica de poço

Perfilagem Geofísica de poço ou perfil de poço é a designação genérica dos levantamentos em um poço e são a representação gráfica das propriedades físicas das rochas atravessadas e a sua profundidade (NERY, 2013), o qual inclui descrições baseadas em inspeção visual de amostras levadas para a superfície ou medições de grandezas geofísicas, feitas com instrumentos específicos, para formar um perfil do poço (SERRA, 1984; ELLIS; SINGER, 2008).

A medida que um poço é perfurado, as medições dos parâmetros são realizadas progressivamente e amostradas regularmente para serem apresentadas no formato de perfil de acordo com a profundidade. Geralmente as sondas de medições são acopladas por diversos sensores que captam diferentes propriedades geofísicas. Ao interpretar tais propriedades, caso as informações coletadas não tenham sido concomitantemente, há possibilidades de exposição de erros pela falta de correlação das mudanças da propriedade do tempo. Isso faz com que seja recomendada a coleta simultânea de informações de uma perfuração (BUSTAMANTE, 2012).

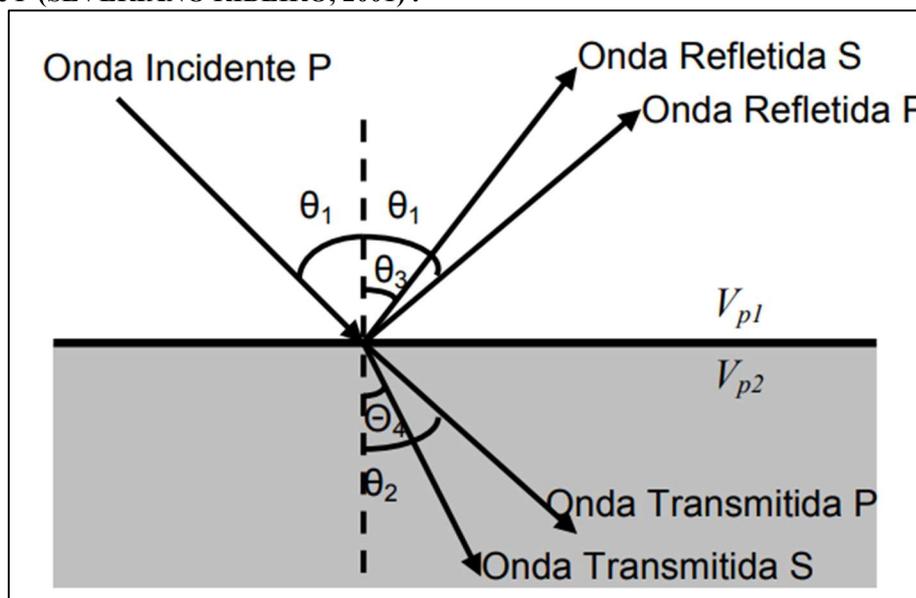
Dentro das várias propriedades geofísicas medidas em uma perfuração, temos a medida do perfil de indução, que utiliza a magnetização para induzir o campo magnético para a identificação qualitativa da litologia e do fluido nas rochas, bem como a estimativa de saturação da água e a identificação de zonas de alta permeabilidade. Outro é o perfil sônico, que contém medições de tempo de trânsito de um pulso acústico entre dois pontos fixos de uma formação, tendo em vista que a velocidade do som é maior nos sólidos do que nos líquidos e nos gases, os meios com velocidades maiores possuem os tempos de trânsito são menores, por exemplo, se uma rocha contém maior quantidade de fluidos nos seus poros, o tempo de trânsito do pulso será maior do que em uma rocha não porosa. As principais aplicações deste perfil se dão na estimativa de porosidade intergranular das rochas, a densidade, a identificação de zonas de fraturas e na calibração sísmica de superfície. Já o perfil de densidade, utiliza a interação de radiação gama com a parede do poço para captação de uma porção de radiação que não foi perdida, onde estes valores representam a densidade da formação rochosa, enquanto o perfil de potencial espontâneo é utilizado para a detecção de camadas permoporosas, realizar a correção de poços vizinhos, calcular a argilosidade, bem como identificar a resistividade das águas das formações em relação ao filtrado de lama possibilitando a identificação da salinidade do líquido intersticial (NERY, 2013; SERRA, 1984; ELLIS; SINGER, 2008). Outro perfil de poço bastante empregado nas investigações geofísicas é o de raio gama. Ele obtém informações sobre a radiação gama natural das rochas ou dos sedimentos do poço, devido cada rocha emite uma quantidade de radiação gama característica. Os folhelhos emitem uma quantidade maior de raio gama do que as demais rochas sedimentares, devido a presença de potássio (K) radioativo na sua composição da argila, além da possibilidade do seu material ter a capacidade catiônica de armazenar na sua estrutura elementos como urânio e (U) e Tório (Th). Dessa forma, essa propriedade possibilita a diferenciação dos pacotes sedimentares em folhelhos e não folhelhos (BUSTAMANTE, 2012). Tais perfis foram utilizados para obtermos informações de litotipos dos materiais amostrados.

3.2. Sísmica de Reflexão

A sísmica de reflexão é um método geofísico de investigação da subsuperfície que se baseia na emissão e recepção de ondas elásticas geradas por energia de uma fonte artificial, podendo ser de tipo percussão, explosivo ou vibratório, onde essa excitação gera ondas que se propagam no meio geológico. Os registros da trajetória da onda sísmica são captados por receptores em formas diferentes: refração, difração e/ou reflexão das ondas durante o seu retorno para a superfície. O tempo de percurso de uma onda pode ser convertido para profundidade da camada e conseqüentemente a mesma pode ser mapeada (KEAREY, BROOKS; HILL, 2009).

Na realização de um levantamento sísmico, tem-se a liberação de energia a partir de uma fonte sísmica, que se propaga radialmente e percorre a velocidade determinada de acordo com as propriedades físicas das rochas circundantes. Devido às mudanças do meio, a velocidade da onda sofre alterações à medida que entram em contato com uma interface de contraste de impedância acústica e com isso é possível estimar características e delimitações das camadas de rochas limitadas por interfaces. Se houver poços nas proximidades da área de levantamento, pode ser possível a realização de correlação dos valores de velocidade com as unidades geológicas presentes dentro da sequência do poço (KEAREY, BROOKS; HILL, 2009). A propagação de uma onda, de acordo com a Lei de Snell, é interpretada como ao encontrar em contato com uma superfície de diferentes impedâncias, parte da onda sísmica é refletida e outra parte é transmitida para camadas inferiores (Figura 5). Ao longo do seu percurso, a diminuição da amplitude das ondas sísmicas é o resultado da perda da sua energia de acordo com a distância transitada (BUSTAMANTE, 2012). Dessa forma, sempre que uma onda sísmica encontrar o contato do substrato com impedância diferente, seu comportamento possibilitará o registro de refletores, que contribuem para a análise e interpretação de possíveis contatos de superfícies bem como a identificação de falhas que auxiliaram na estimativa conveniente e realista da estrutura dos estratos (MIRANDA *et al*, 1998).

Figura 5 - Representação da propagação de uma onda incidente P, onde a mesma é refletida e transmitida em ondas S e P (SEVERIANO RIBEIRO, 2001).



A técnica da reflexão sísmica, baseia-se na medição do tempo de deslocamento da onda, e a amplitude de acordo com o deslocamento pelas camadas profundas, onde parte da onda é refletida e captada por receptores. De acordo com Mitchum; Vail; Thompson (1977), o método é eficaz para aplicação de conceitos de sequências deposicionais, uma vez que os refletores sísmicos são gerados a partir das propriedades acústicas dos estratos e por isso as reflexões tendem a ser superfícies paralelas a cronoestratigrafia. Os refletores mostram informações estruturais das camadas sedimentares, espessura da camada, mergulho e falhamentos, dentre outras informações do substrato (AYRES NETO, 2001). Segundo Souza (2006), este método retrata a reflexão de uma onda elástica nas interfaces das diferentes impedâncias encontradas no pacote analisado, onde as camadas heterogêneas apresentam reflexões que podem ser indicativas de contato geológico entre elas, sendo essas feições chamadas de interfaces ou horizontes.

Para uma melhor interpretação dos dados de uma seção sísmica podem-se utilizar atributos sísmicos, que são ferramentas que auxiliam na interpretação das seções e sua aplicação melhora a visualização das sequências sedimentares registradas em uma seção sísmica a partir do realce das feições registradas nas linhas, possibilitando a aferição de dados geológicos de uma seção. Um desses atributos é o Volume de Amplitude (tecVA), que consiste em uma técnica de tratamento de dados que se baseia no princípio da sismocamada elementar (BULHÕES; AMORIM, 2005), em uma janela em tempo que dará o número de amostras a ser utilizada no cálculo da média móvel da amplitude ao longo do traço, que possibilita uma melhor

visualização das sequências sedimentares de uma seção. Esse atributo gera uma imagem que realça as discontinuidades, continuidade lateral dos refletores, pacotes com contrastes de impedância acústica contribuindo para a análise das características estruturais e estratigráficas presentes na seção sísmica (ENZILA, 2018). Especificamente é uma técnica multiatributo, resultante dos atributos de refletividade e da mudança de fase, realçando a amplitude através das correlações dos traços.

3.3. Magnetometria

Na busca de identificar as anomalias ferromagnéticas e entender as feições registradas em subsuperfície, a magnetometria contribui para o mapeamento de estruturas geológicas e grandes contraste litológicos, sendo possível medir pequenas variações do campo magnético terrestre oriundo da propriedade magnética das rochas, a partir da variação da susceptibilidade magnética das rochas que causam anomalias no campo magnético terrestre. Com isso, é possível delimitar os principais lineamentos e fontes com minerais ferromagnéticos na subsuperfície (CARNEIRO; BARBOSA, 2008).

O levantamento magnetométrico pode ser aplicado para diversas finalidades, tanto de pequena escala, para a identificação de materiais metálicos enterrados, quanto levantamento de grande escala, para mapear estruturas geológicas de caráter regionais, como a delimitação tectônica do cinturão Guiana Central em Roraima (COSTA, 2005), e a realização de análise estrutural na Província de Borborema, nordeste do Brasil (ARAÚJO NETO *et al.*, (2018). Essa técnica utiliza a medição das propriedades magnéticas que são registradas no processo de cristalização das rochas ígneas e solos que possuem, em sua assembleia mineralógica, minerais magnéticos. Nesse processo, a variabilidade da susceptibilidade magnética está influenciada pelo campo magnético, uma vez que tendem a magnetizar-se mais com maior intensidade, tanto positivamente quanto negativamente, refletindo a intensidade da magnetização em relação ao campo. A magnetizações remanescentes secundárias podem ser impressas posteriormente, quando os minerais magnéticos se recristalizam durante o metamorfismo ou se modificam durante a diagênese (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009).

Dentro dos tipos de levantamento, os aéreos são os mais realizados devido a sua melhor relação custo e benefício. Nele o sensor é rebocado em um suporte conhecido como pássaro, que foi idealizado para não deixar que o sensor sofra efeitos magnéticos da aeronave, ou vai fixado na cauda da aeronave por meio de cabos, onde se faz necessária a utilização de bobinas para compensar o campo magnético gerado pela aeronave (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009).

A aeromagnetometria é utilizada nos trabalhos de reconhecimento, para determinar as características em subsuperfície, mapeamento de jazidas de minerais ferromagnéticos, bem como para determinar a espessura da cobertura sedimentar, identificação de falhas e lineamentos e modelagem de bacia (AMINZADEH; DASGUPTA, 2015).

Com os dados brutos do levantamento magnético, o processamento permite gerar imagens do Campo Magnético Residual da área, que ao aplicar filtro da Amplitude do Sinal Analítico possibilitam a resolução das anomalias magnéticas bidimensionais e tridimensionais, uma vez que a fonte anômala apresenta magnetização uniforme. O filtro da Primeira Derivada Vertical pode ser usado com a finalidade de ressaltar as feições estruturais. A técnica de sombreamento pode ser utilizada sobre esse produto a fim de realçar as feições para serem mapeadas, principalmente nas áreas de sombra da imagem original (PUPIN, 2011; MORAIS; BLUM, 1999).

3.4. Sensoriamento Remoto

Para realizar o mapeamento da superfície, as técnicas de sensoriamento remoto permitem a obtenção de dados da superfície terrestre de forma automática. A sua representação em forma de imagens, é feita por meio da captação e registro da energia refletida ou emitida pela superfície (FLORENZANO, 2007). Novo e Ponzone (2001), destacam que essa técnica começou a ser utilizadas nos mapeamentos temáticos, em meados dos anos 1980, com o lançamento do sensor *Thematic Mapper* (TM) a bordo dos satélites LANDSAT 4 e 5, as quais visam à análise de parâmetros biofísicos. Essa tecnologia tem se tornado cada vez mais importante para os estudos de diferentes naturezas, uma vez que possibilita a obtenção de imagens de qualquer localidade do globo. O aumento das resoluções espaciais e espectrais possibilitam a sua aplicação em diversas áreas de levantamento de recursos naturais com maior riqueza de detalhes, podendo contribuir no monitoramento ambiental, planejamento urbano, detecção de desastres naturais, desmatamentos florestais, fenômenos meteorológicos, defesa e vigilância (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Para a coleta de dados de sensoriamento remoto, são utilizados sensores que podem estar acoplados em satélites, que orbitam a superfície da Terra a quilômetros de distância, ou aeronaves transportadoras que sobrevoam a superfície a alguns metros. Tais sensores são classificados como ativos e passivos, no qual o primeiro, o sensor possui fonte de energia própria, enquanto no segundo, o sensor necessita de uma fonte externa de energia (MENESES; ALMEIDA, 2012). Para estudos geológicos, são bastante usados ambos os sensores, no entanto

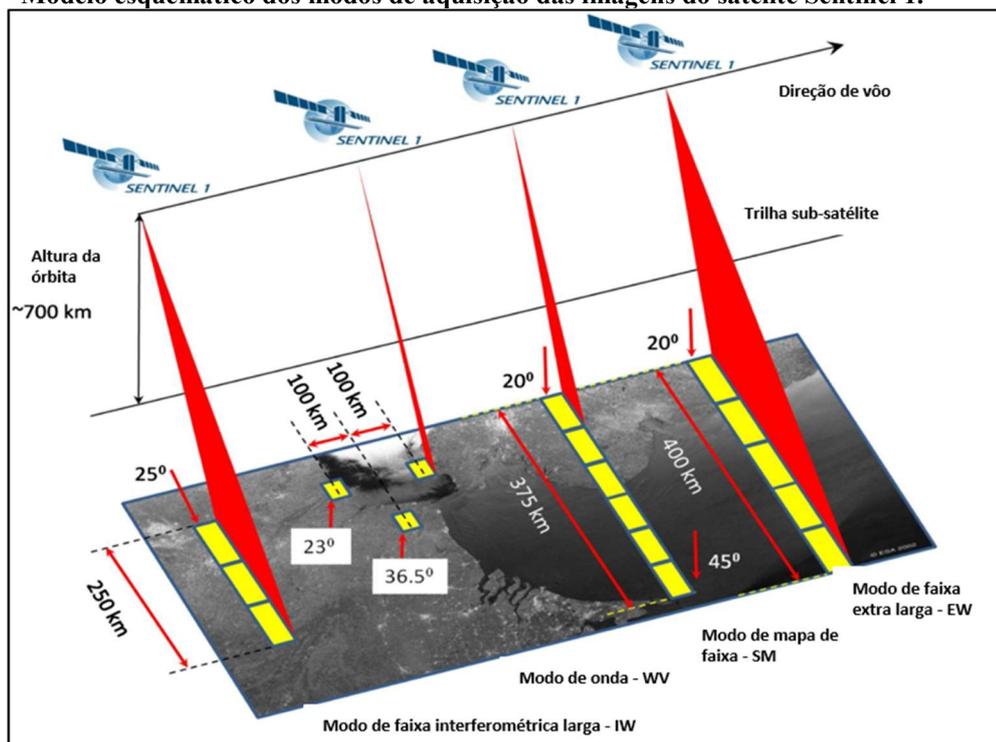
na região amazônica, onde há alta cobertura vegetal e cobertura de nuvens em grande parte do ano, o sensor ativo é mais visado, uma vez que utilizam fontes artificiais para a geração de sua faixa do comprimento de onda possibilita a realização de imagens em condições atmosféricas adversas e sua interação das micro-ondas com as rochas é controlada pela textura do relevo, ultrapassando também a vegetação. Tal ferramenta é bastante utilizada para estudos de geologia estrutural e mapeamento geológico, tais como a delimitação estrutural da Guiana Central, Roraima por Costa (2005), a análise estrutural e mapeamento geológico de Vierópolis, no nordeste Brasileiro (ARAÚJO NETO *et al.*, 2018) e análise estrutural do estado do Rio de Janeiro (LIU, 1984).

3.4.1. Missão Sentinel 1A

A partir de um projeto da Agência Espacial Europeia (*European Space Agency – ESA*), em conjunto com a Comissão Europeia, a missão Sentinel foi lançada em 2014 com a finalidade de atender o Programa Copernicus, que possui o objetivo dar continuidade às missões antigas gerenciadas pela agência, na qual monitorava os recursos naturais terrestres, o uso e ocupação da terra, ambientes marinhos, clima e desastres naturais (EMBRAPA, 2019). Essa missão é composta por uma constelação de dois satélites, o Sentinel -1A e Sentinel - 1B, que compartilham o mesmo plano orbital polar e tendem a imagear as massas continentais quinzenalmente.

O satélite Sentinel 1 A possui uma vantagem pois é equipado por um Radar de Abertura Sintética (SAR), que opera em comprimento de onda que não sofre os efeitos da cobertura de nuvem, da falta de iluminação e das condições meteorológicas. As imagens captadas são da banda C que operam a uma frequência de 5.405 GHz (ESA, 2015). O sistema tem a capacidade de operar nos modos de dupla polarização (HH/HV ou VV/VH) e polarização única (HH ou VV) além de possuir quatro modos de imageamento, com tempo de visita curtos: SM (*Stripmap Mode*), IW (*Interferometric Wide Swath Mode*), EW (*Extra-Wide Swath Mode*) e WV (*Wave Mode*) (Figura 6).

Figura 6 - Modelo esquemático dos modos de aquisição das imagens do satélite Sentinel 1.



Fonte: ESA (2015)

O principal modo de aquisição de dados sobre a Terra é o IW, onde seus dados são adquiridos com uma faixa de 250 km, com resolução espacial de 5 m por 20 m e utiliza a técnica TOPSAR3 (*Terrain Observation with Progressive Scans SAR*). O modo de aquisição SM obtém os dados com uma faixa de 80 km, com resolução espacial de 5 m por 5 m, sendo destinado apenas a casos excepcionais. Já o modo EW, que também utiliza a técnica TOPSAR para adquirir dados de uma área mais ampla utilizando cinco faixas, adquire os dados sobre uma faixa de 400 km com uma resolução espacial de 20 m por 40 m. Esse modo é destinado particularmente para aplicações relacionadas com gelo, monitorização de derrames de óleo e serviços de segurança. E o modo WV adquire dados em vinhetas de 20 km por 20 km, com uma resolução espacial de 5 m por 5 m, exclusivamente em modo de polarização única (VV ou HH). (ESA, 2015).

3.4.2. Modelo Digital Global de Elevação Copernicus

O Copernicus DEM é um Modelo Digital de Superfície que representa a superfície da Terra, incluindo edifícios, infraestrutura e vegetação. Esse modelo é derivado do WorldDEM, um modelo digital de elevação global, onde o achatamento dos corpos d'água e o fluxo consistente dos rios foram incluídos. Os dados do Copernicus DEM são baseados em informações de satélite de radar adquiridos pela Missão TanDEM-X, provenientes da parceria

Público-Privada entre o Estado Alemão e a *Airbus Defense and Space* (OPEN TOPOGRAPHY, 2021).

4. MATERIAIS E METODOLOGIAS

Este estudo compreende diferentes tipos de materiais e recursos geofísicos. Cada insumo apresenta informações distintas que juntas contribuiriam para o desenho de um modelo tridimensional da área de interesse.

4.1. Materiais

4.1.1. Dados da perfilagem Geofísica de Poço e descrição das amostras de calha

Nesta pesquisa são utilizados dados de dois poços exploratórios: o poço U, que se encontra dentro da área, e o poço S, situado fora do perímetro estudado (Figura 7), sendo utilizado para fins de auxílio na modelagem da geometria da Bacia Vaupés-Amazonas. O poço U foi perfurado em 1988, atingindo uma profundidade total de 1601,42 m, enquanto o poço S, atingiu uma profundidade de 787,90 m. Os poços apresentam o *set* básico de perfis (Tabela 1): Raio Gama (GR), Potencial Espontâneo (SP), Densidade (RHOB), Sônico (DT), Neutrônico (NPHI), Caliper (CALI) e Resistividade (ILD), bem como os dados das descrições das amostras de calha coletados durante a perfuração. No entanto, apenas os dados dos perfis de raio gama foram utilizados nesta pesquisa. Tais registros de perfis passaram por um controle de qualidade e edição para que pudessem ser utilizados de maneira correta.

Tabela 1 - Lista da identificação dos dados de poços utilizados e suas respectivas informações de coordenadas geográficas e de perfis geofísicos.

Nome do poço	Lat (N)	Long (E)	Zona	GR	SP	RHOB	DT	CALI	ILD
U	128570.00 m	276522.00 m	19 N	X					
S	386778.27 m	641426.84 m	18 N	X	X	X	X	X	X

Fonte: Tabela elaborada pela autora.

4.1.2. Linhas sísmicas 2D

Os dados sísmicos levantados em 1992 pela Ecosísmica Ltda consistem em aproximadamente 242 km de linhas sísmicas migradas pós-empilhadas (Tabela 2), sendo duas linhas na direção de rumo (LS1 e LS2) e uma na direção de mergulho (LM1) (Figura 7).

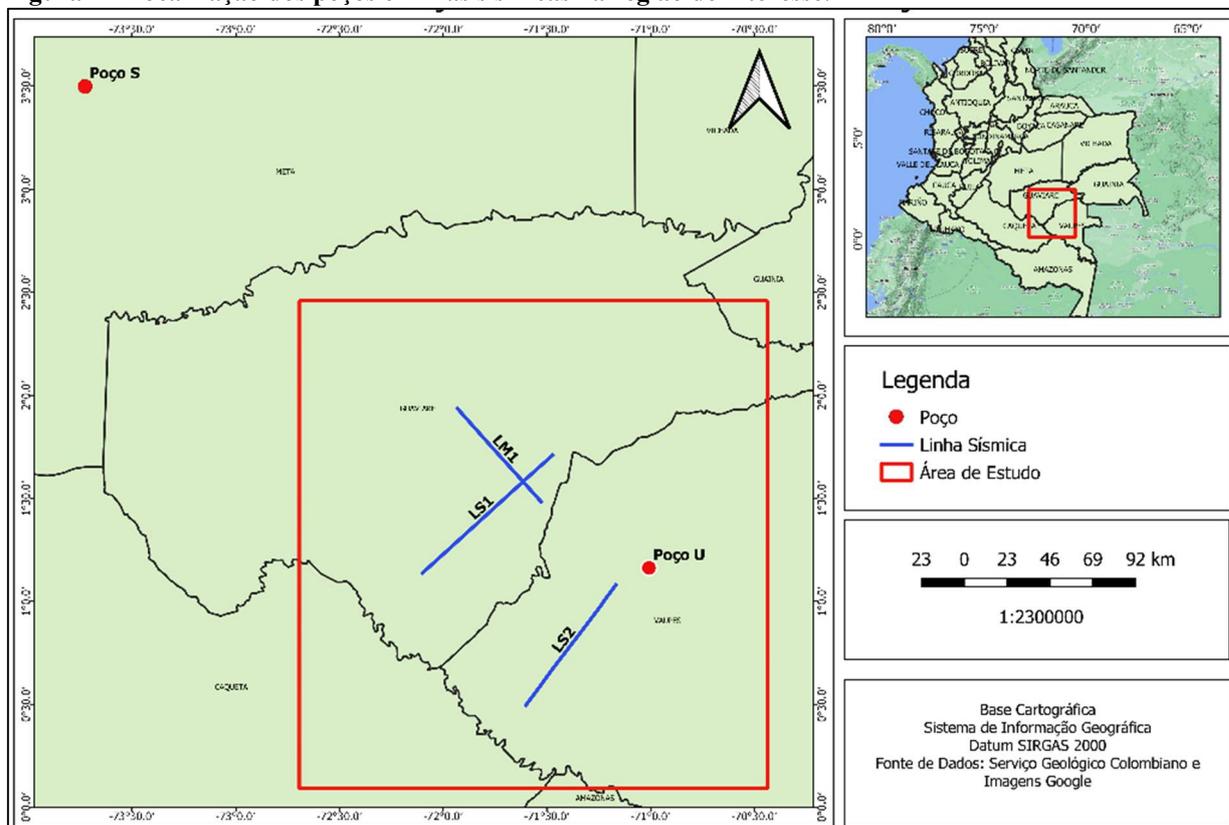
Tabela 2 - Informações de coordenadas geográficas do início (i) e fim (f) das linhas sísmicas.

	Linha	X	Y	Zona	Extensão
Linha LS1	LS1(i)	125892.00 m N	822703.00 m E	18 N	94.106 m
	LS1(f)	189062.00 m N	224742.00 m E	19 N	
Linha LS2	LS2(i)	55118.00 m N	118775.00 m N	19 N	80.549 m
	LS2(f)	209869.00 m E	258091.00 m E	19 N	
Linha LM1	LM1(i)	214696.00 m N	164514.00 m N	19 N	67.248 m
	LM1(f)	173222.00 m E	218249.00 m E	19 N	

Fonte: Tabela elaborada pela autora.

Os dados sísmicos apresentam um comprimento de 5 segundos de frequência de 25 Hz por registro e resolução de até 80m.

Figura 7 - Localização dos poços e linhas sísmicas na região de interesse.



Fonte: Autora (2023).

4.1.3. Dados aeromagnetométricos

Os dados aeromagnéticos do bloco geofísico Amazonas Norte, estão localizados na zona oriental da Colômbia, abrangendo área próxima à fronteira da Colômbia com o Brasil, cobrindo uma área de 110.469 km², sendo coletados dados gamaespectométricos e magnéticos, a uma altura média de voo de 100 metros sobre o terreno. Os espaçamentos da linha de voo foram de 1 km na direção N-S e linhas de controle de 10 km na direção E-W.

4.1.4. Imagens de Radar

4.1.4.1. Sentinel 1A

A área de estudo dispõe de imageamento de Radar do satélite Sentinel 1A, adquiridas através do catálogo de imagens da *European Space Agency* (ESA). Foram utilizadas cinco imagens que cobrem toda a área de estudo, conforme mostra a tabela 3. Este satélite tem um sensor SAR (*Synthetic Aperture Radar*) que opera na banda C (entre 8 a 4 GHz). Para a aquisição das imagens foi escolhido o modo de aquisição IW (*Interferometric Wide Swath*

Mode) onde a imagem possui 250 km de largura da faixa, com resolução espacial de 5 x 20, ângulo de incidência de 29° - 46°, operando em dupla polarização (HH/HV e VV/VH) e polarização única (HH e VV).

Tabela 3 - Lista das imagens Sentinel 1A utilizadas e suas respectivas datas de imageamento e download.

Identificação	Data de imageamento
S1A_IW_GRDH_1SDV_20160831T225600_20160831T225625_012850_014490_46D5	01/09/2016
S1A_IW_GRDH_1SDV_20160831T225625_20160831T225650_012850_014490_90F2	01/09/2016
S1A_IW_GRDH_1SDV_20160905T230401_20160905T230426_012923_0146ED_3C0F	06/09/2016
S1A_IW_GRDH_1SDV_20160905T230426_20160905T230451_012923_0146ED_352F	06/09/2016
S1A_IW_GRDH_1SDV_20160905T230451_20160905T230516_012924_0146ED_6C21	06/09/2016

Fonte: Tabela elaborada pela autora.

4.1.4.2. Copernicus

O dado da imagem de RADAR da Copernicus, foi obtido através do limite em *shapefile* da área de estudo. A disponibilização dos dados desse MDE é feita pela *Open Topography*, na qual disponibiliza tanto os dados de MDS global de 30 metros de resolução espacial (GLO-30) quanto os de 90 metros (GLO-90). Ambas as classificações estão disponíveis gratuitamente para o público em geral, no entanto a cobertura do GLO-30 não é totalmente global devido algumas áreas, ainda não terem sido disponibilizadas ao público pelo Programa Copernicus. Nos conjuntos de dados originais, o espaçamento das células aumenta em função da latitude para latitudes ao norte de 50N e ao sul de 50S, porém para manter as dimensões dos pixels uniforme, o *Open Topography* reamostra os dados ao norte de 50 graus de latitude e ao sul de -50 graus gerando um produto consistente para as resoluções de 30m e 90m (OPEN TOPOGRAPHY, 2021).

4.1.5. Recursos computacionais utilizados para interpretação de dados sísmicos e processamento digital de imagens.

Para o gerenciamento dos dados geofísicos, a interpretação e modelagem de dados sísmicos e dos perfis geofísicos de poço, foram utilizadas as licenças acadêmicas do *software Opentect* (dGB, 2020). O *software* Oasis Montaj (Geosoft na versão 6.4.2) foi utilizado para

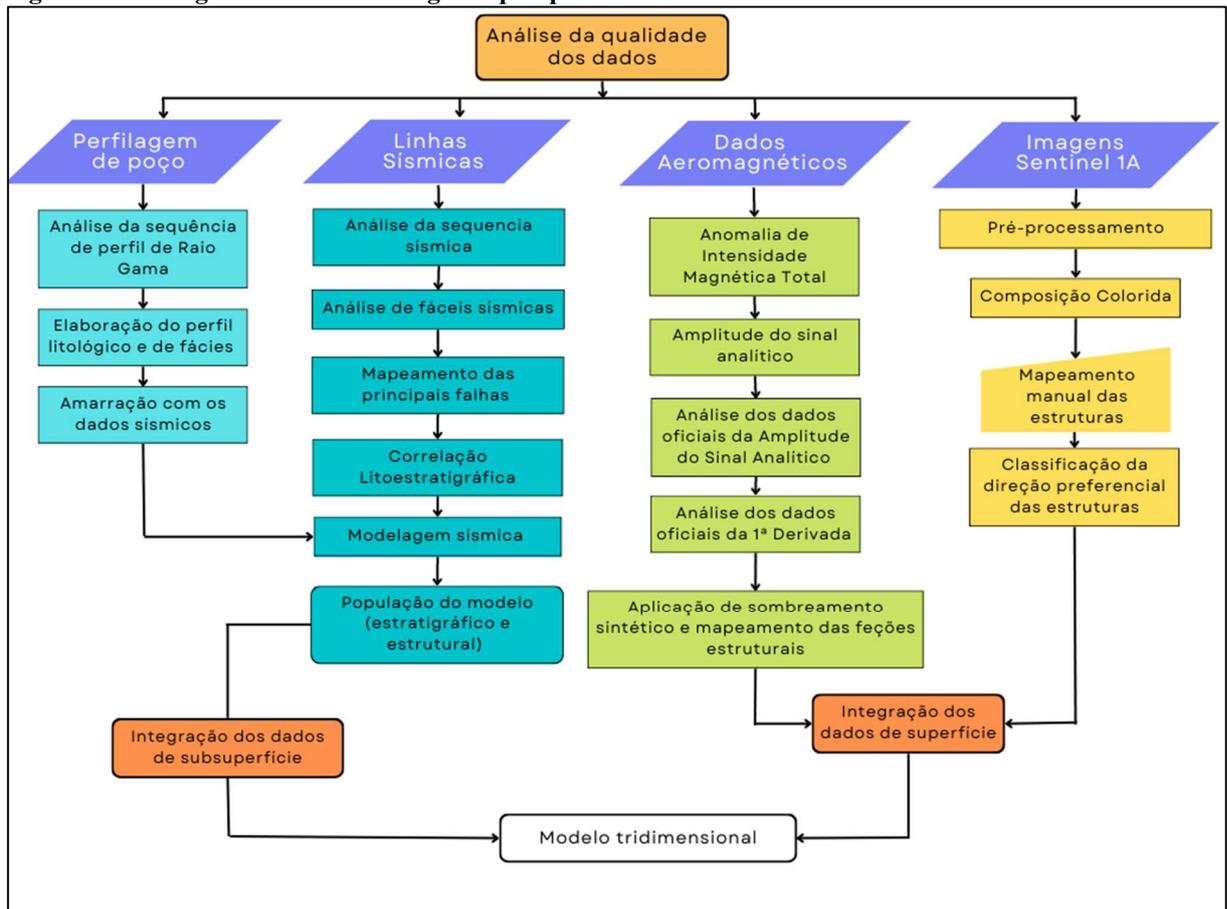
o processamento e interpretação dos dados magnéticos, bem como os *softwares* livres *Sentinel Application Platform* (SNAP) e QGIS, versão 3.16.7, foram empregados para o processamento, análise e interpretação das imagens de radar do sensor Sentinel 1A.

4.2. Métodos

Foram adotados procedimentos de análise, processamento e interpretação dos dados utilizados, como mostra a Figura 8. Os dados de poços passaram pelo processo avaliação da qualidade dos dados, analisados para a obtenção do índice de argila presentes no poço para a distinção dos dados litológicos em argila e não-argila, geração da classificação de litológica e de fácies. Ao final, o seu resultado foi incorporado aos dados sísmicos para realizar a amarração dos dados, bem como auxiliar na estimativa dos limites de topo e base das camadas nele presente. Os dados sísmicos foram utilizados para o mapeamento dos horizontes sísmicos, geração de superfícies e identificação de falhas. Tais informações foram necessárias para a geração do modelo tridimensional e gerar informações para alimentá-lo. Os dados aeromagnéticos também foram essenciais para alimentar as informações de subsuperfície com a identificação dos lineamentos estruturais presentes. Utilizando filtros sobre os dados magnéticos, foi possível mapear lineamentos primários e secundários da área de interesse. Os dados de radar foram processados, a fim de possibilitar o mapeamento de lineamentos presentes na superfície. Para isso, foram aplicados filtros para eliminação de ruído, típico desse tipo de dado, além das correções necessárias, como a radiométrica e a geométrica.

Com os resultados obtidos, a partir do arcabouço tectono-estratigráfico, geomorfológico e a delimitação de estruturas geológicas, foi possível gerar um modelo geológico tridimensional, possibilitando um melhor entendimento da distribuição espaço-temporal das rochas desse trecho na Bacia Vaupés-Amazonas, bem como, avaliar o potencial de confiabilidade da análise e a correlação dos dados para mapeamento em áreas da região Amazônica, onde se tem limitação de dados e pouca infraestrutura e geologia disponível.

Figura 8 – Fluxograma das metodologias aqui apresentadas.



Fonte: Autora (2022).

4.2.1. Perfil Geofísico de Poço

Os dados dos poços foram carregados e editados a partir das informações do cabeçalho do dado do poço, tais como: nome do poço, coordenadas da cabeça do poço, profundidade medida (MD), profundidade vertical total (TVD) dentre outras informações. A partir dos dados dos perfis de GR e dos relatórios de amostra de calha, foram estabelecidas as litologias sedimentares, sendo consideradas duas principais: arenito e siltito. Além disso, foram delimitados o topo e base das diferentes unidades estratigráficas ali presentes através dos marcadores de horizontes.

4.2.2. Seções Sísmicas

Os dados sísmicos foram utilizados para analisar e definir as características estruturais, estratigráficas e geomorfológicas. Neles foram aplicados o atributo sísmico tecVA com o objetivo de realçar as feições estratigráficas e estruturais, tais como falhas, lineamento e contatos geológicos. Após a geração dos atributos, foi feita a análise das seções a fim de rastrear

padrões das continuidades laterais dos refletores, a características de suas terminações e padrões similares dentro dos estratos.

A partir da continuidade dos refletores e considerando os marcadores da perfilagem de poços foram delimitados os horizontes sísmicos, sendo identificados 7 horizontes sísmicos. Após, o mapeamento dos horizontes nas 3 seções sísmicas, sendo estes correspondentes aos topos das unidades litoestratigráfica (Areia Neógena, Formação Araracuara), foram definidas as unidades sismo-estratigráficas. Estas por sua vez são definidas a partir de estratos correlacionados que possuem delimitações, no topo e na base, por refletores que possuem as terminações características de *onlap*, *downlap*, *toplaps* e truncamentos erosivos. A partir dessas, foram geradas as superfícies de cada uma dessas unidades. Foi possível delinear um escopo do modelo tridimensional da posição das principais camadas encontradas a partir do mapeamento das superfícies. Além disso, com a aplicação do atributo tecVA foi possível realizar o mapeamento de algumas feições lineares nas seções, tais como falhas.

A integração dos dados adquiridos nessa etapa, com os dados dos perfis geofísicos de poços e das amostras de sedimento, possibilitou o estabelecimento de informações que alimentam o arcabouço estratigráfico do modelo tridimensional. Dessa forma, a partir das análises e interpretações, o modelo gerado é suportado com características da integração dos dados geofísicos, conforme a geração das superfícies sísmicas, inserção de dados de fácies, feições estruturais, bem como a propagação das informações para as demais áreas do modelo.

4.2.3. Imagens de Sentinel 1A

As imagens de radar passaram pelo processamento digital de imagem (PDI) que tem o objetivo de melhorar o aspecto visual das feições estruturais presentes na superfície, possibilitando a identificação e interpretação de maneira adequada, bem como o fornecimento de outros subsídios para a sua interpretação.

A sequência de processamento das imagens utilizando os módulos SNAP 6.0, incluem a redução do ruído “*Speckle*”, correção radiométrica e correção geométrica do terreno. O ruído *Speckle* é gerado pela interferência destrutiva ou construtiva causada por alvos difusos distribuídos aleatoriamente. Essa interferência pode ser destrutiva, cancelando o sinal refletido gerando pixels mais escuros ou ser construtiva, causando a soma do sinal gerando pixels mais claros, gerando em qualquer um dos casos distorções e variações súbitas na intensidade da imagem (DIAS; MENDONÇA, 2020). Esse ruído gera um aspecto visual granuloso que degrada a qualidade da imagem e dificulta a sua interpretação. E para a redução desse ruído é feita a filtragem ou o processamento “*multilooking*”, onde os filtros devem manter o valor

médio do retorno do radar e devem ser preservadas as bordas e as informações de textura presente na imagem.

Para as imagens SAR usadas foi aplicado o Filtro de Frost, com uma janela de filtragem de 7x7. Frost é um filtro convolucional linear, proveniente da minimização do erro médio quadrático sobre o modelo multiplicativo do ruído (SANT'ANNA; MASCARENHAS, 1996). Neste filtro é incorporado à dependência da estatística dos valores originais do sinal (correlação espacial exponencial do pixel), sendo capaz de preservar as estruturas de bordas.

Além da eliminação do ruído é feita a correção radiométrica e a correção geométrica da imagem filtrada para melhorar o posicionamento e a imagem. A calibração radiométrica tem o objetivo de converter os números digitais dos pixels da imagem SAR, em valores de retrodispersão radiometricamente calibrados, que geram uma imagem com valores de pixels diretamente relacionados ao retroespalhamento do radar da cena (ESA, 2015). A correção geométrica geocodifica a imagem SAR, com base em uma modelo digital de elevação (DEM), convertendo a imagem de alcance inclinado, conhecido como efeito da geometria SAR, em um sistema de coordenação de mapa (ESA, 2015). Nas etapas de calibração, os parâmetros utilizados para realizar as correções foram obtidos automaticamente através do algoritmo de co-registro que busca as informações obtidas na passagem do satélite e que são registro do metadados de cada imagem (VECI; BRAUN, 2021).

Após estas calibrações, foram feitas as composições de bandas espectrais (falsa cor e composição colorida) para melhorar a qualidade visual das imagens a fim de realçar as feições de superfície, possibilitando assim a discriminação e delimitação das feições. E com a finalidade de extrair os lineamentos estruturais da superfície as imagens foram recortadas e exportadas no formato GeoTIFF para serem mapeadas e realizar a interpretação.

4.2.4. Dados Aeromagnéticos

Os dados aeromagnéticos foram processados com ajuda dos módulos do *software* Oasis Montaj. Os dados estavam no formato de imagem do campo magnético residual onde foram analisados a fim de identificar ruídos e aplicado filtro de atenuação dos mesmos, para melhorar o resultado da imagem (MINTY, 1991). Também foi gerada a imagem de Campo Magnético Residual (MAGR) onde foi aplicado o filtro passa alta para realçar as feições de fontes mais rasas descartando os componentes que contém o maior comprimento de onda. É chamada a atenção aos cuidados na seleção dos parâmetros utilizados ao aplicar filtros dessa classe, pois os ruídos podem ser realçados em relação ao sinal desejado. Para evitar essa interferência, foi

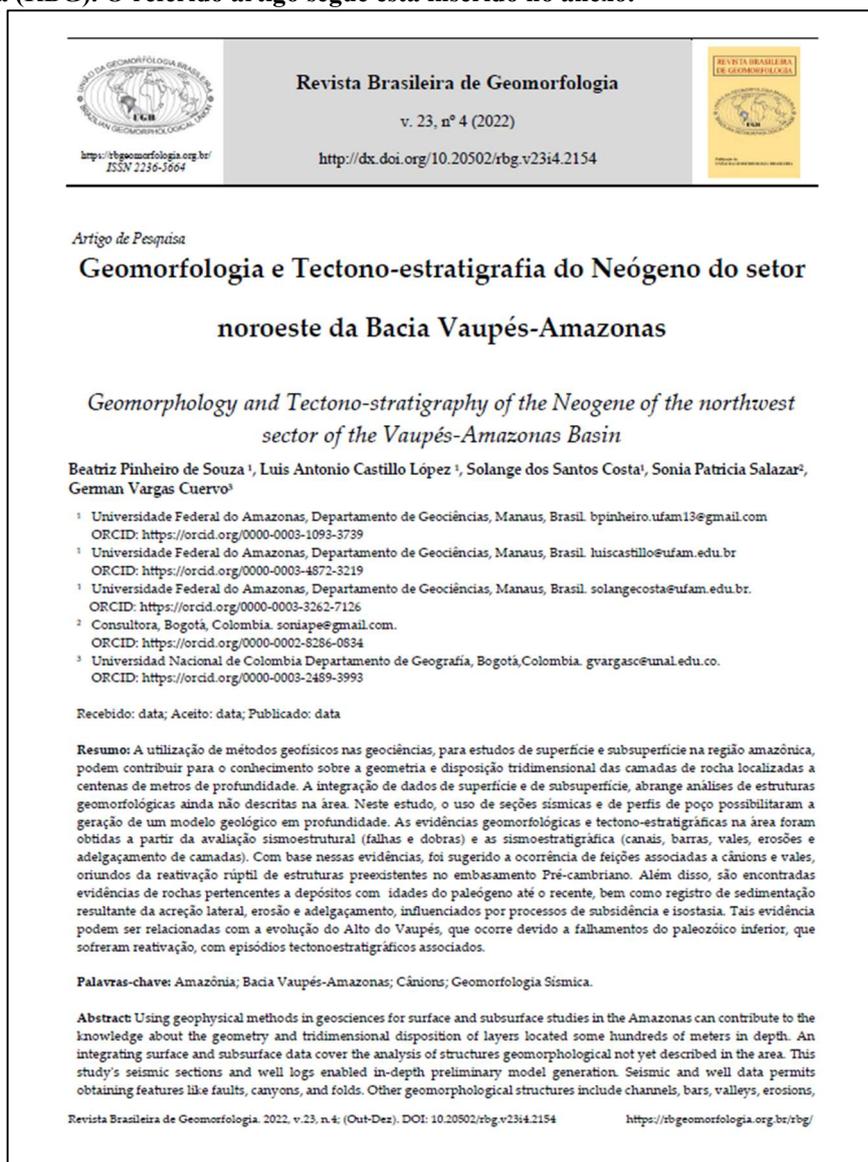
utilizado o filtro de Amplitude do Sinal Analítico (ASA). Este filtro é gerado pela combinação de derivadas direcionais e evidencia uma medida da quantidade de magnetização que não depende da direção da magnetização dos corpos e nem do campo magnético (RAO *et al.* 1981; THOMPSON, 1982; MILLIGAN; GUNN, 1997). Os corpos com geometria semelhantes devem apresentar o mesmo sinal analítico. Essa imagem evidencia a assinatura de fontes magnéticas localizadas com destaque para o realce das bordas e o centro do corpo em corpos largos e estreitos respectivamente (BLUM, 1999), melhorando a representação dos contatos (SORDI, 2007).

Outro filtro aplicado foi da Primeira Derivada, pois segundo Luiz e Silva (1995), este ressalta as feições estruturais tais como falhas, fratura, dobras e zonas de cisalhamento. Para melhorar a visualização destas feições será aplicada a este produto a técnica de sombreamento sintético com valores de azimutes que melhor destaquem tais estruturas. Ressalta-se que a utilização dos filtros tem a função de ressaltar aspectos específicos das imagens e reduzir o efeito dos ruídos.

5. RESULTADOS

Como resultado das avaliações e interpretações dos dados geofísicos, tem-se um artigo publicado na Revista Brasileira de Geomorfologia (<https://doi.org/10.20502/rbg.v23i4.2154>) último trimestre de 2022 (OUT-DEZ) (Figura 9).

Figura 9 – Imagem da primeira página do artigo científico publicado pela Revista Brasileira de Geomorfologia (RBG). O referido artigo segue está inserido no anexo.



Fonte: Souza *et al.* (2022).

5.1. Perfis Geofísicos de Poço

Os perfis de poços abrangem vários tipos, mas um dos mais utilizados corresponde ao perfil de Raio Gama, sendo o principal dado quantitativo utilizado para a obtenção de índice de volume de argila. A partir dele, é possível sugerir também a classificação qualitativa da fácies e sequência, bem como identificar litologias (RIDER, 2002). De acordo com isso, utilizamos os perfis de raio gama para indicar a classificação dos pacotes sedimentares em argila e não argila, a partir do cálculo do índice de raio gama através da fórmula a seguir:

$$IGR = \frac{GR \log - G \min}{GR \max - GR \min} , \quad \text{eq.1}$$

onde:

IGR = índice de raio gama;

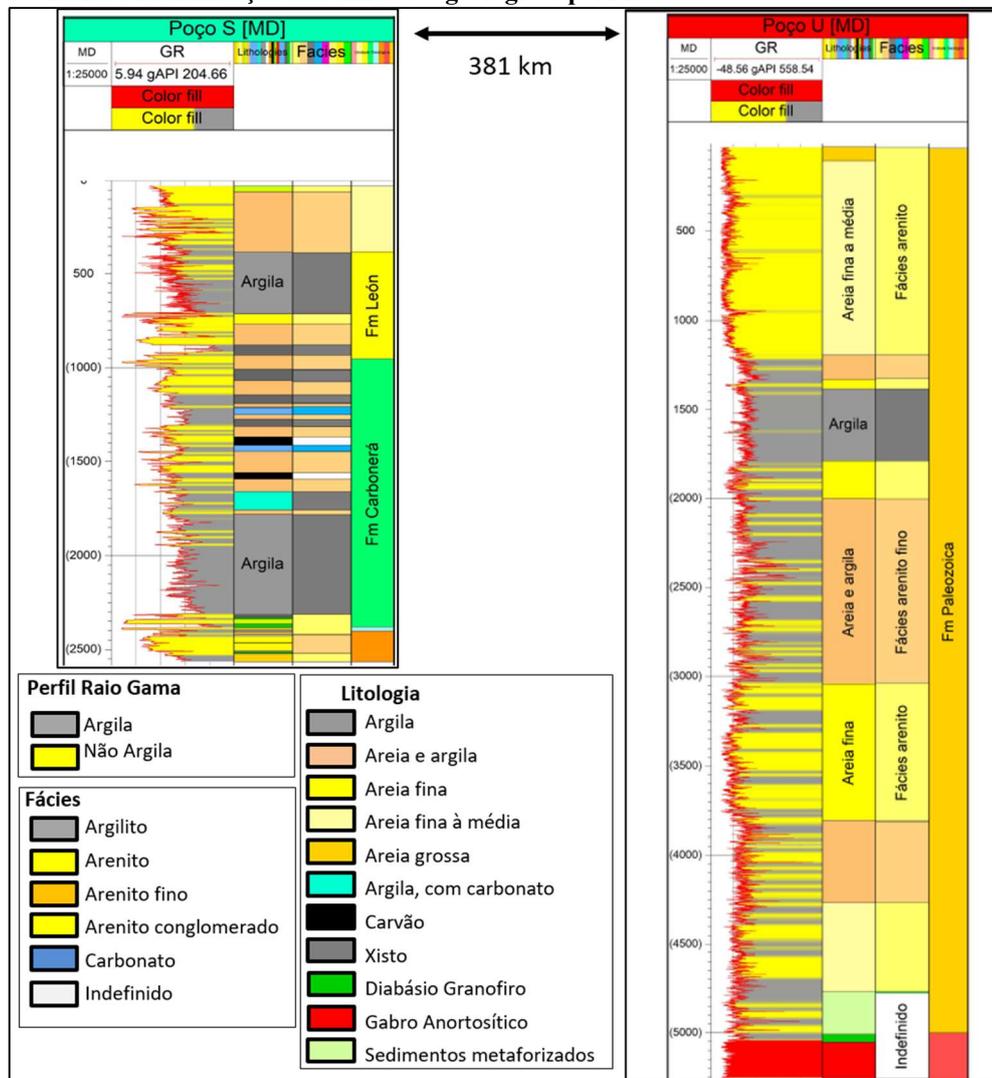
GR log = raio gama lido na formação;

GR min = raio gama limpo (arenito “limpo” ou carbonato);

GR máx. = raio gama máximo (folhelho).

Após a classificação do perfil em argila e não argila, foi utilizado os dados das amostras de calha, coletas no momento da perfuração, para alimentar a descrição desses pacotes de arenitos. Ao correlacionar ambos os dados, foram realizadas as classificações das fácies sedimentares, bem como a unidade geológica perfurada (Figura 10).

Figura 10 – Perfil de raio gama com a identificação de argila e não argila (Track GR), a classificação da litologia, das fácies e identificação das unidades geológicas perfuradas.



Fonte: Autora (2022).

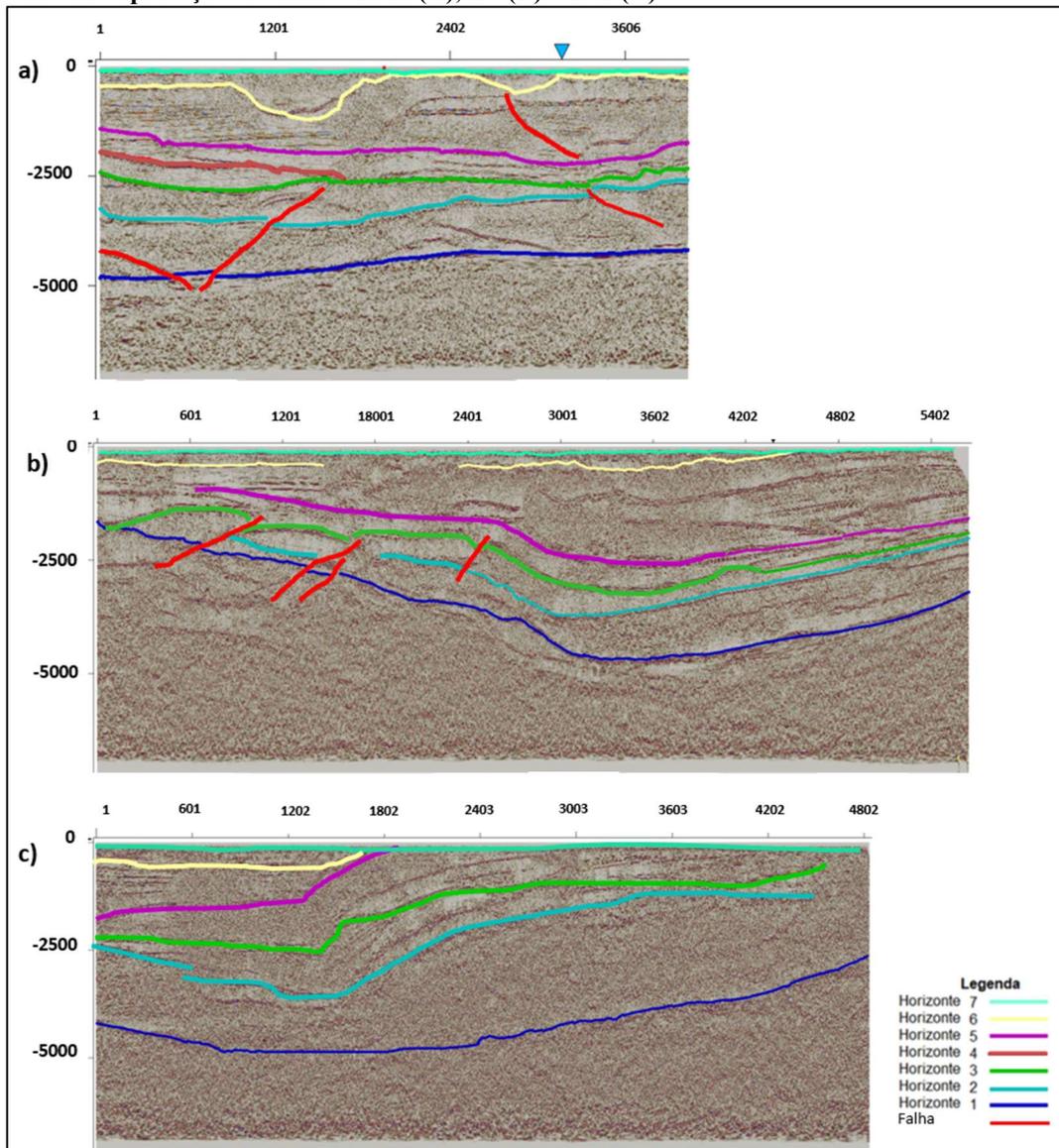
No poço U, foram identificadas duas unidades litológicas, constituídas pelo corpo intrusivo do Gabro Anortosítico, na base, e o material sedimentar arenoso com intercalações de argila, na porção superior (Formação Araracuara). De acordo com as amostras de calha, ao longo do trecho identificado como o contato entre essas unidades, a aproximadamente 1520 metros (5000 pés), é encontrado o registro de material sedimentar que passou por um aquecimento causado pela intrusão do Gabro Anortosítico, gerado pelo metamorfismo de contato no material sedimentar acima. Após a limitação das unidades, foi feita a classificação das fácies sedimentares, onde as mesmas foram definidas apenas de acordo com os critérios litológicos e o tamanho dos grãos descritos durante a coleta do material da perfuração, como mostra a classificação da imagem anterior.

O poço S foi utilizado com fins de auxiliar na modelagem da geometria da bacia, enquanto isso o poço U, foi utilizado para a amarração poço-sísmica.

5.2. Seções Sísmicas

O primeiro procedimento feito com as seções sísmicas foi a realização da amarração com os dados de poços, tendo como objetivo a correlação com as informações dos dois materiais, a fim de analisar a conectividade das feições identificadas das seções com as informações mapeadas de topo e base dos pacotes sedimentares encontrados no poço. A interpretação das seções sísmicas foi feita considerando as geometrias dos refletores, associando as feições estruturais, tais como horizontes e falhas, de cada linha utilizada. Após o procedimento de amarração, foi realizada a etapa de mapeamento dos horizontes, onde foram identificados e rastreamento os horizontes sísmicos e as falhas (Figura 11):

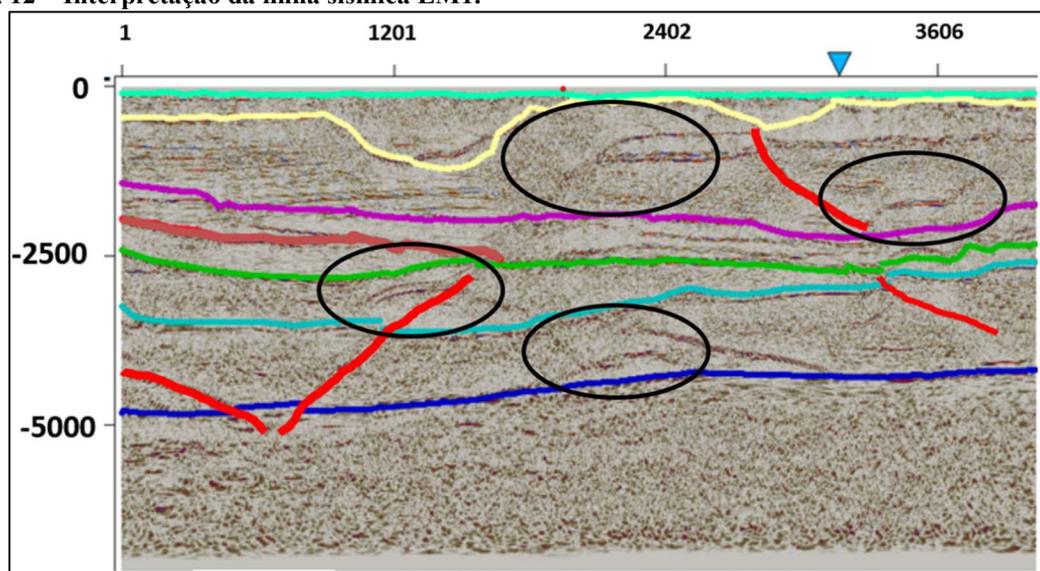
Figura 11 – Interpretação das linhas LM1 (A), LS (B) e LS2 (C).



Fonte: Autora (2022).

Ao analisar as seções sísmicas foram identificados os refletos segundo as suas continuidades, bem como os padrões de terminações dos mesmos. Com isso, foram delimitadas camadas que apresentavam a mesma característica entre si, tais como geometria, propriedade de amplitude e espessura sísmica dos refletos analisados. Devido às limitações do processamento é possível apreciar eventos fora do plano, artefatos e pouca continuidade nos refletos, que mascaram e afetam os dados sísmicos (Figura 12).

Figura 12 – Interpretação da linha sísmica LM1.



Fonte: Autora (2022).

A identificação dos horizontes foi baseada nas características intrínsecas do padrão das reflexões concordantes em uma série de reflexões, geométricas das sismofácies e a textura do entorno dos refletores, onde os elementos fundamentais do traço sísmico (amplitude e frequência) ajudam a definir tais características. Segundo o seguimento da continuidade de alguns refletores, foi possível mapear sete principais horizontes sísmicos, limitando 7 sequências sísmicas.

A unidade sísmica 1, localizada na base das seções, é limitada no topo pelo horizonte 1. Essa unidade corresponde ao embasamento cristalino, tem como delimitação um dos refletores mais fortes, associado ao contraste entre a rocha sedimentar e o embasamento cristalino. Abaixo deste horizonte, temos reflexões caóticas, de baixa amplitude e descontínuas, características de respostas de corpos cristalinos.

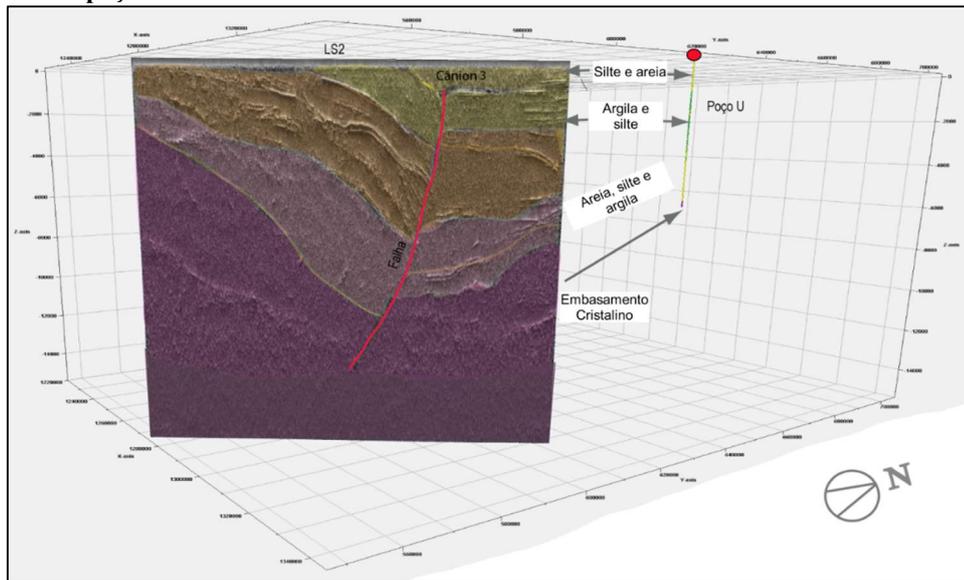
Os horizontes superiores 2 e 3, limitam a Formação Araruama, definidos pela presença de seus refletores fortes e pelas texturas que ambos apresentam. As sequências das reflexões do interior dessa unidade sísmica são, em sua maioria, paralelas com o horizonte da base dessas sequências (horizonte 1), outra parte dos seus refletores são semi contínuos e apresentam, em alguns trechos, feições com terminações do tipo *downlap* e *onlap*. Na LM1, apresentam-se com refletores paralelos entre si, cortados por três falhas e com terminações de refletores do tipo *downlap*, tanto superior quanto inferior. Já em LS1 e LS2, as mesmas apresentam refletores paralelos que seguem o formato do horizonte do embasamento e em LS1 três falhas cortam as ambas as camadas o que provoca uma perda da continuidade lateral dos refletores nos trechos

próximos a essas estruturas, sendo esses horizontes deslocados para as partes mais rasas da seção.

Limitada pelo horizonte 4, a unidade sísmica 4 aparece apenas na parte a esquerda da linha sísmica LM1, caracterizada por refletores horizontalizados, com estrutura paralela, e com terminações do tipo *onlap* na base. Já a unidade sísmica 5, possui refletores horizontais e paralelos com trechos onde os refletores são interrompidos, registrando o truncamento erosivo das camadas na porção superior e terminações *onlap* na porção inferior. A unidade sísmica 6 limitada pelo horizonte 6, na LM1, é composta por refletores planos paralelos bem marcados, no entanto apresentam grande quantidade de ruídos. Na região, são identificadas feições de grande extensão em forma de vales, definidos como paleocânions. Na linha LS1, este refletor encontra-se disposto horizontalmente na região, e na linha LS2 há presença de um vale e sua continuidade localiza-se bem próxima do horizonte 7. A unidade sísmica 7, do topo das seções sísmicas, é caracterizada pela baixa rugosidade do horizonte 7 e possui refletores que cobrem de forma homogênea toda a área mapeada de forma horizontalizada.

Na seção sísmica mais próxima ao poço U, a linha sísmica LS2, foi feita a identificação do perfil litológico e o seguimento dos horizontes correspondentes aos limites das unidades sísmicas da referida seção (Figura 13). Nessa figura, podemos observar a delimitação da falha (em vermelho) e a estruturação dos pacotes sedimentares que são afetados por esta estrutura. No lado direito da imagem temos a correlação das informações da seção sísmica LS2 com os dados do perfil de raio gama do poço U. De acordo com as informações geológica da região, acima das rochas do embasamento cristalino, há ocorrência de uma cobertura sedimentar de arenitos, composta predominantemente por quartzos, feldspatos e fragmentos de rocha, de tamanho médio a fino, com boa seleção e menor proporção de plagioclásio e líticos grossos, evidenciadas na análise das amostras de calhas do poço.

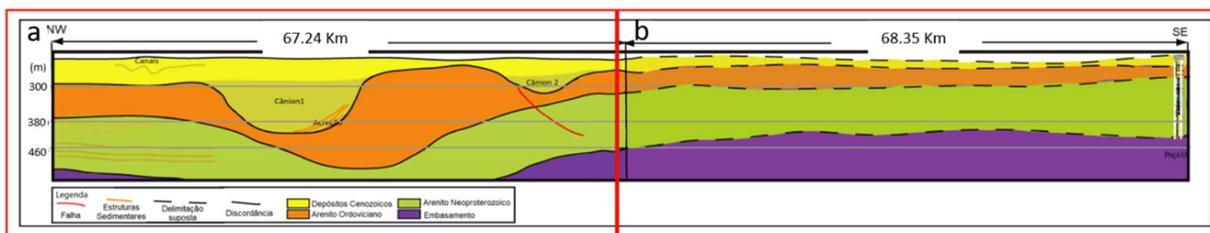
Figura 13 – Linha sísmica posicionada tridimensionalmente com a interpretação sismoestratigráfica e a correlação com o poço.



Fonte: Autora (2022).

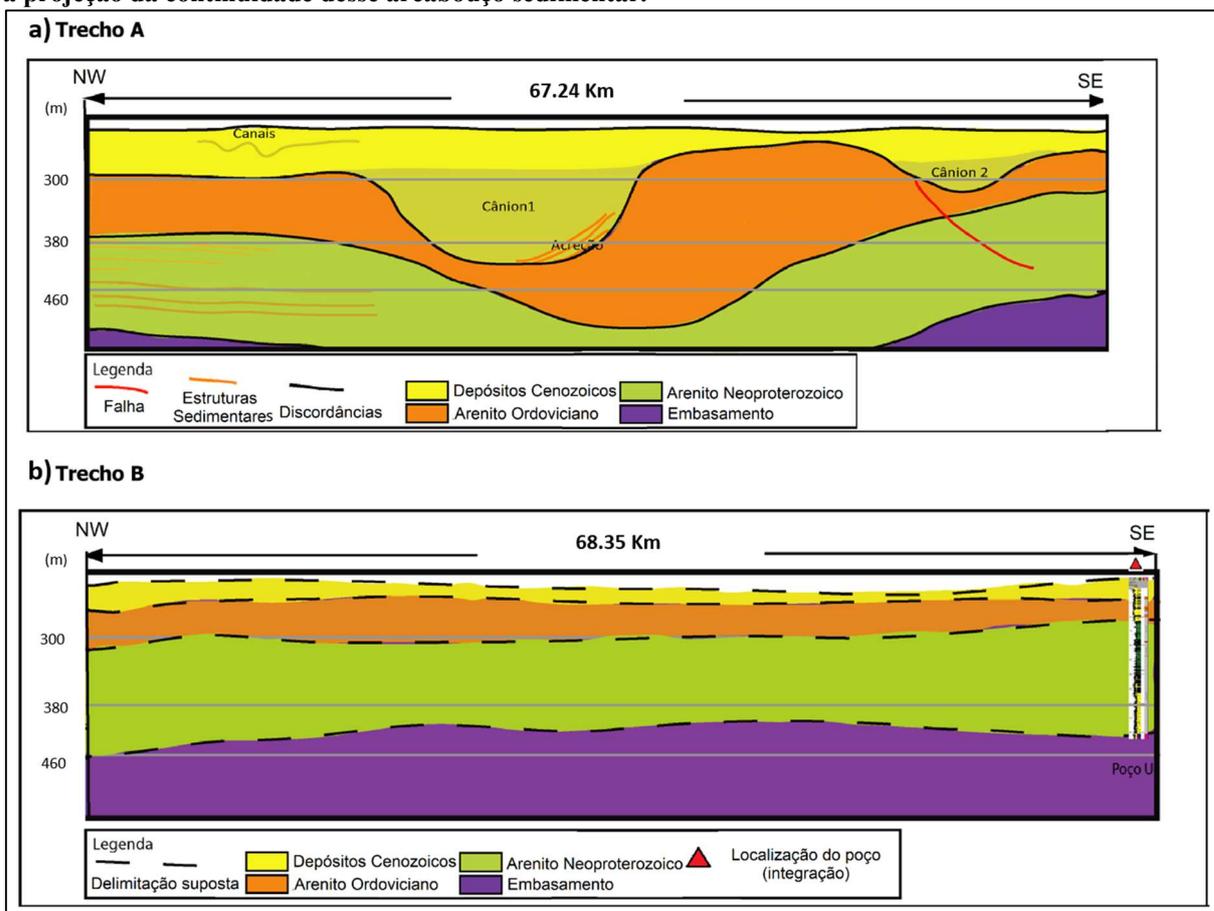
Além dos arenitos, na Bacia Vaupés-Amazonas também predominam pequenas intercalações de camadas de argila registradas nos dados do poço. As camadas mais rasas, são preenchidas com arenitos de textura fina e dispostos em camadas delgadas, além de intercalações com camadas de material argiloso. Esporadicamente tem-se presença de siltitos. No setor sudeste da área de estudo, as expressões geomorfológicas registradas nos dados sísmicos variam de sequências quase horizontais para geformas erosivas com vales incisos e maduros de grandes dimensões, até a área noroeste, onde tais feições se estende por quilômetros de comprimento, com depocentros de centenas de metros de profundidade e cobertura de depósitos espessos possivelmente associados a ambientes fluviais (Figuras 14 e 15).

Figura 14 – Seção esquemática baseada em horizontes interpretados LM1 (a) e a projeção dos limites de camada até os dados do perfil geofísico do poço U (b).



Fonte: Autora (2022).

Figura 15 - Detalhes do esquema: (a) Esboço esquemático do detalhamento dos 67 km da seção sísmica e (b) a projeção da continuidade desse arcabouço sedimentar.



Fonte: Autora (2022).

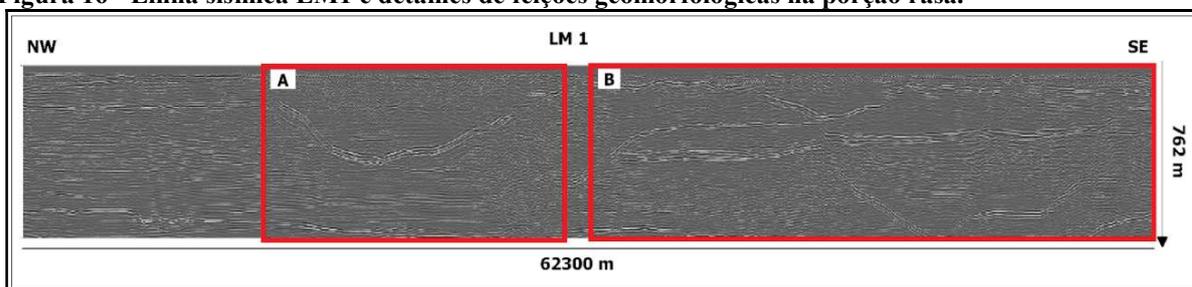
No trecho A, o detalhamento esquemático tem litoestratigrafia baseada nas respostas das características físicas do pacote rochoso identificados pela linha sísmica 2D, onde os refletores contrastantes associado a discordância seguintes foram definidos como o limite das unidades geológicas presentes. No trecho B, foi realizada a projeção da continuidade lateral das camadas até o poço U a um intervalo de aproximadamente 70 km, até a conexão com os dados do poço U. As escalas verticais das seções registradas ao longo do trabalho estão em profundidade, com exagero vertical de 6 vezes.

Na porção mais rasa são identificadas feições que cortam as sequências Neógenas até o recente, interpretadas como cânions de diferentes portes. Na linha sísmica LM1, tem-se dois paleocânions, um deles é bastante expressivo possuindo cerca de 16 km de comprimento com 380 metros de profundidade. Apresenta, na sua base, reflexões interpretadas como respostas de acreção lateral, os refletores internos correspondem a um preenchimento uniforme e paralelo horizontalmente das camadas de sedimento mais jovens. O segundo cânion, identificado na LM1, tem uma dimensão menor, com aproximadamente 12 km de comprimento e 160 metros

de profundidade, possui uma estrutura de falha na sua base, que provavelmente foi reativada e influenciou na estruturação desta feição antes do Neógeno. Já a terceira feição de paleocânion identificada na linha LS2, com tamanho similar às dimensões do cânion 2 e amarrada com os dados das linhas LM1 e LS1 a partir da interpolação de dados para dimensionar e projetar a disposição espacial das feições na área de estudo.

Para ressaltar as feições identificadas nas linhas sísmicas, foi aplicado o atributo TECVA nas linhas sísmicas (Figura 16 e 17). Com isso, foram visualizadas feições com maior detalhe de relevo, facilitando a identificação de maiores detalhes dos refletores e de feições registradas, que auxiliou na identificação/confirmação da descrição das nas primeiras sequências.

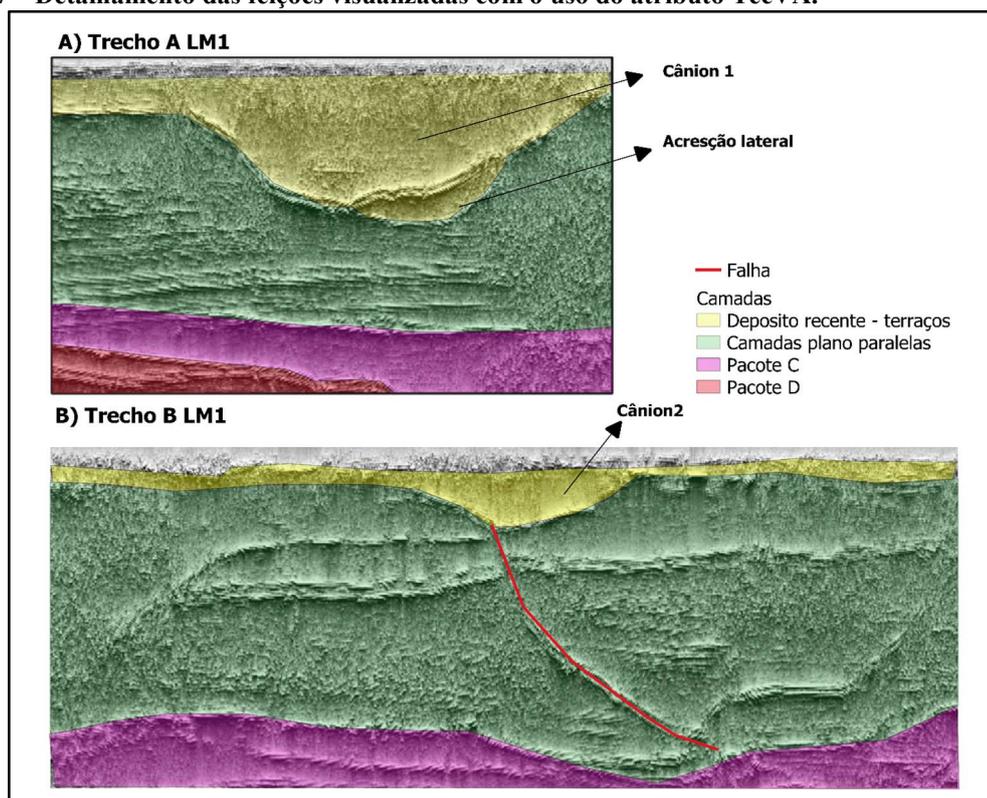
Figura 16 - Linha sísmica LM1 e detalhes de feições geomorfológicas na porção rasa.



Fonte: Autora (2022).

Com os dados da superfície é difícil fazer seguimento das geoformas, mas os dados sísmicos permitem a identificação das diferentes feições geomorfológicas em profundidade. Em profundidade, destacam-se elementos arquitetônicos como cânions, vales e canais que constituem domínios tectono-estratigráficos e geomorfológicos do Rio Uaupés. Na figura a seguir (Figura 17), podemos observar com clareza as feições de relevo ressaltadas pelo atributo TECVA, tanto a definição da forma do paleocânion, quanto os destaques da continuidade lateral dos horizontes sísmicos abaixo, possibilitando a compreensão de como as camadas de sedimentos dessa área estão estruturadas em profundidade.

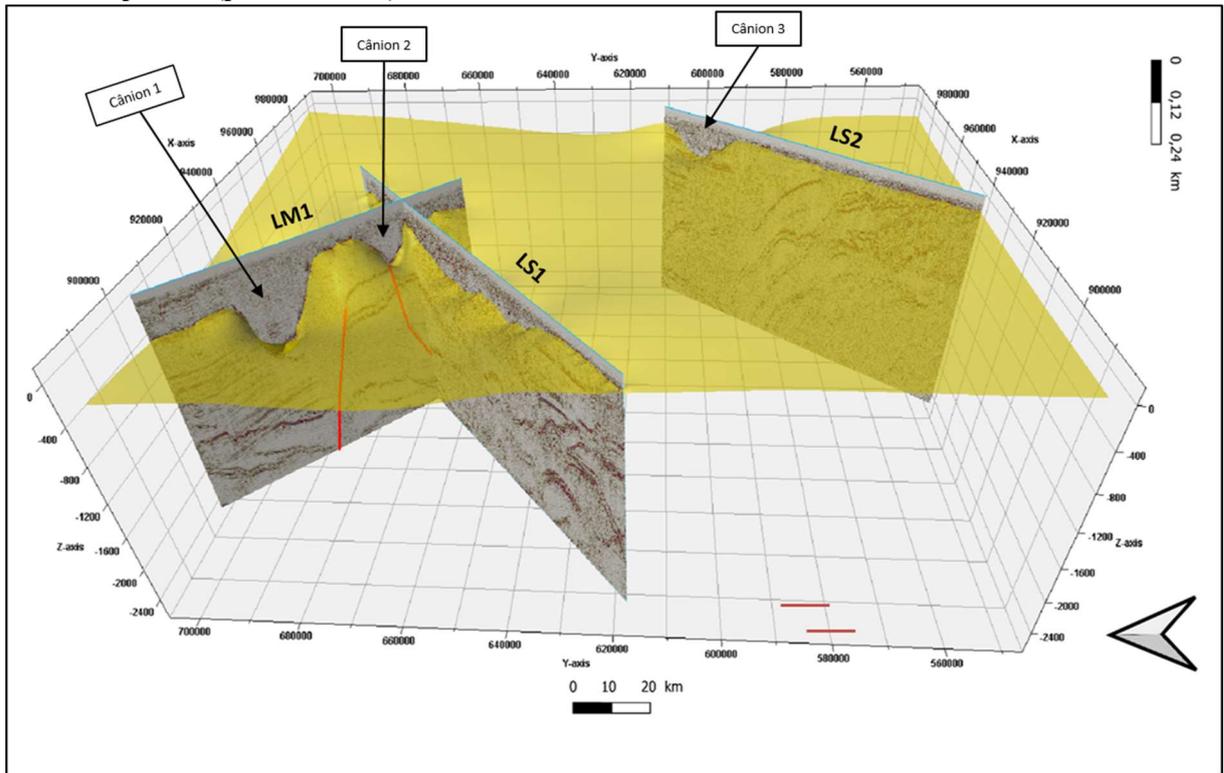
Figura 17 – Detalhamento das feições visualizadas com o uso do atributo TecVA.



Fonte: Autora (2022).

Após o mapeamento dos horizontes nas 3 seções sísmicas, foi realizada a interpolação dos mesmos para a geração das superfícies. Na região mais rasa, na camada que representa as feições geomorfológicas do Neógeno, é observado o destaque da forma do paleocânion 1 da LM1, que mede aproximadamente 16 km de comprimento e média de 380 m de profundidade (Figura 18). Esta feição é caracterizada por uma concavidade homogênea pouco angulosa, bastante arredondada, denotando a maturidade erosional do mesmo. Na sua lateral direita é possível identificar feições e terminações dos refletores que indicam que houve preenchimento lateralmente ao longo do tempo e seu talvegue é pouco pronunciado e estendido lateralmente. No paleocânion 2 (LM1) e 3 (LS2), os refletores dos seus interiores estão estruturados plano paralelamente, similar ao cânion 1, com terminações do tipo *onlap*, no entanto sem feições adicionais de possível acreção lateral.

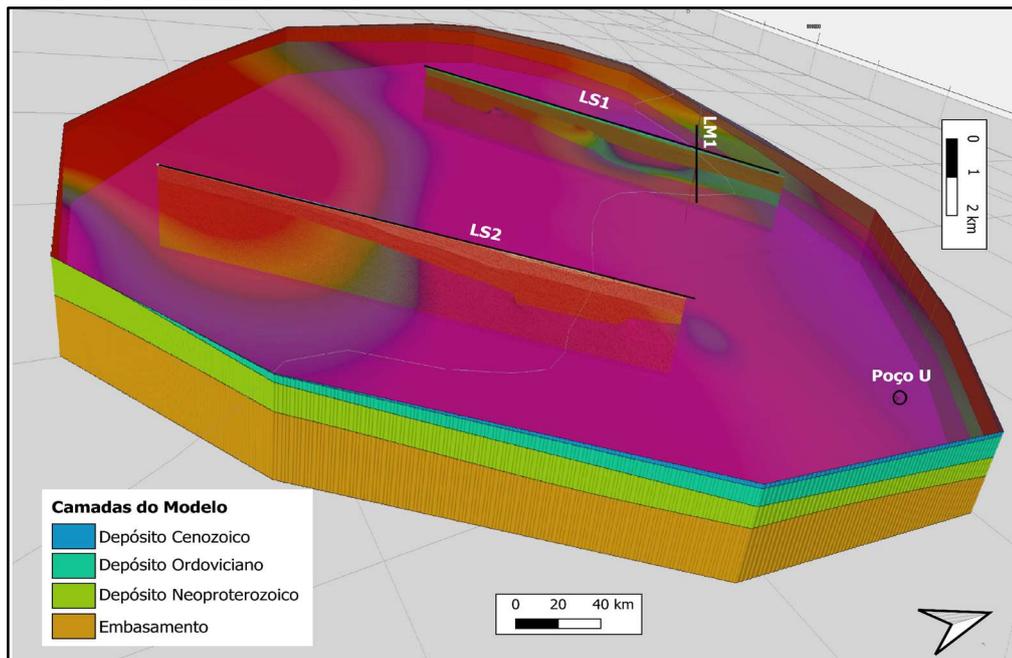
Figura 18 - Linhas sísmicas com as superfícies correspondentes às feições dos paleocânions da camada mais rasa e a superfície (plano amarelo).



Fonte: Autores (2022)

A partir dos dados obtidos dos horizontes e superfícies originados pelo método sísmico e de perfilagem, foi elaborado um modelo determinístico, que demonstra a distribuição dos pacotes sedimentares baseados na configuração das superfícies sísmicas (Figura 19).

Figura 19 - Modelo determinístico da área de estudo.



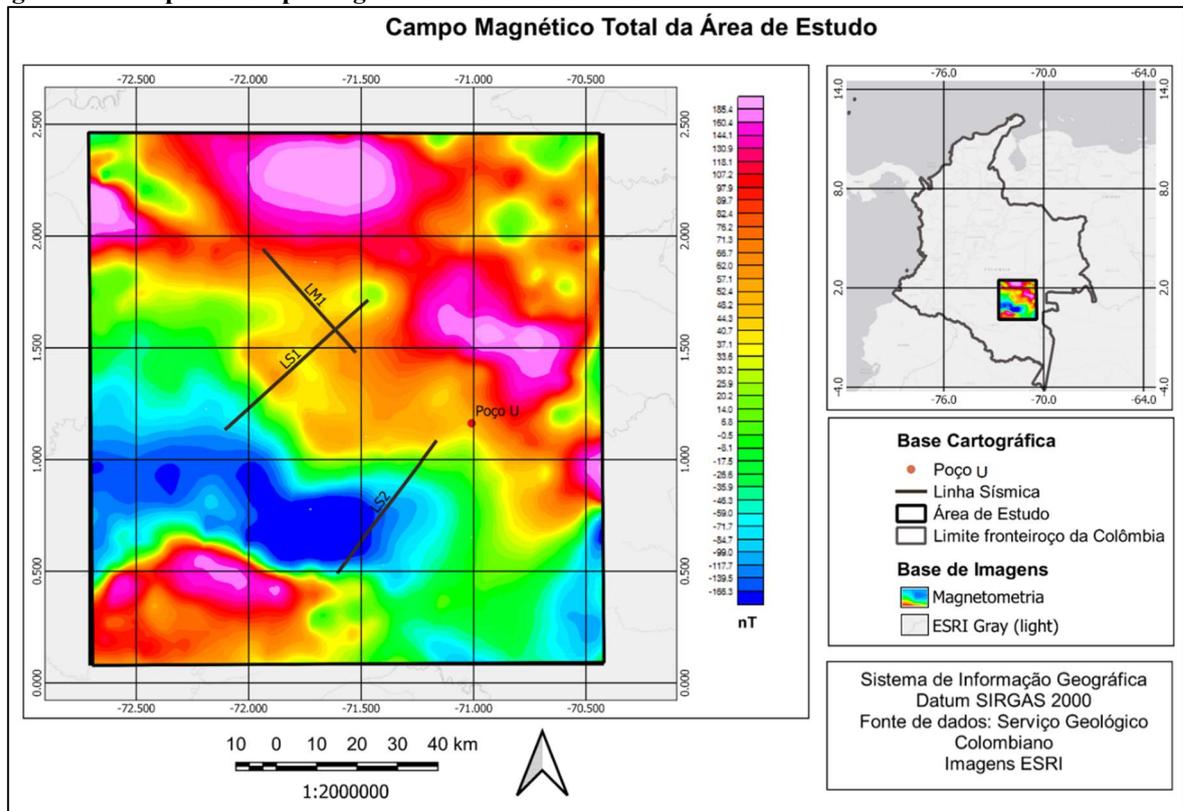
Fonte: Autora (2022).

Os dados de superfície e de subsuperfície, com a integração, permitem estabelecer um volume que possibilita a representação da geologia contida na área. O modelo gerado é do tipo determinístico e corresponde a um arcabouço estrutural com camadas dispostas de forma plano paralelas. Uma vez tendo as fácies ou a litologia pode ser preenchido, sendo possível incluir informações de tendências e populações litológicas, como as fácies predeterminadas dos poços.

5.3. Dados Aeromagnéticos

Visando obter mais informações de subsuperfície para o modelo, foram utilizados dados aeromagnéticos da área de estudo, incluindo dados de Intensidade Magnética Total da área de estudo (Figura 20):

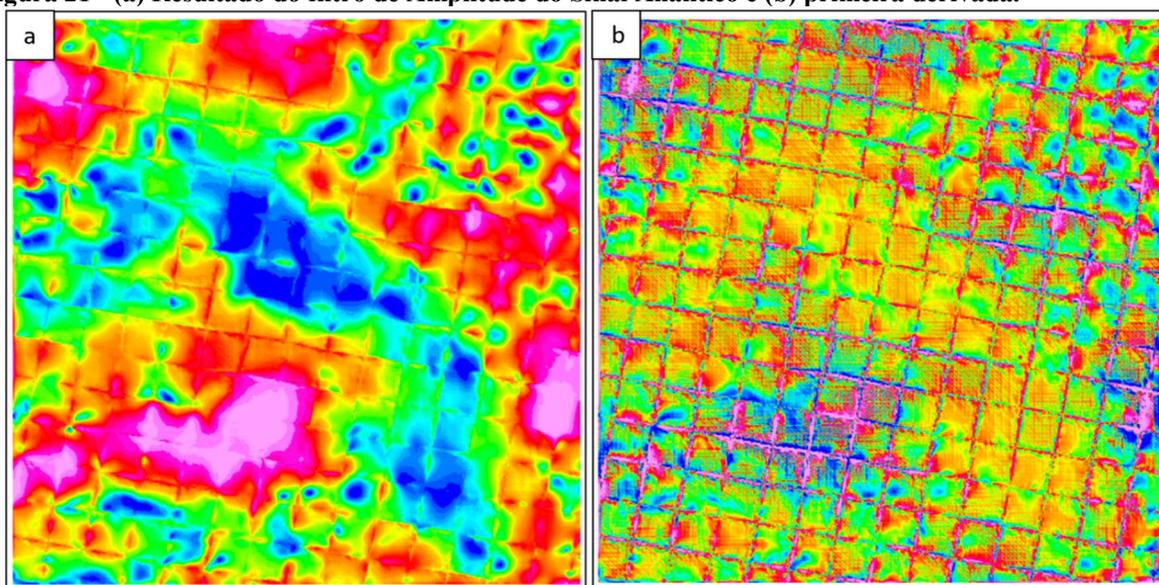
Figura 20 – Mapa do campo magnético da área de estudo.



Fonte: Autora (2022).

Ao dar continuidade ao processamento dos dados, na aquisição do Campo Magnético Residual e do filtro de Amplitude de Sinal Analítico, foram identificados a presença acentuada de ruídos periódicos correspondentes a marcas de aquisição (Figura 21).

Figura 21 - (a) Resultado do filtro de Amplitude do Sinal Analítico e (b) primeira derivada.

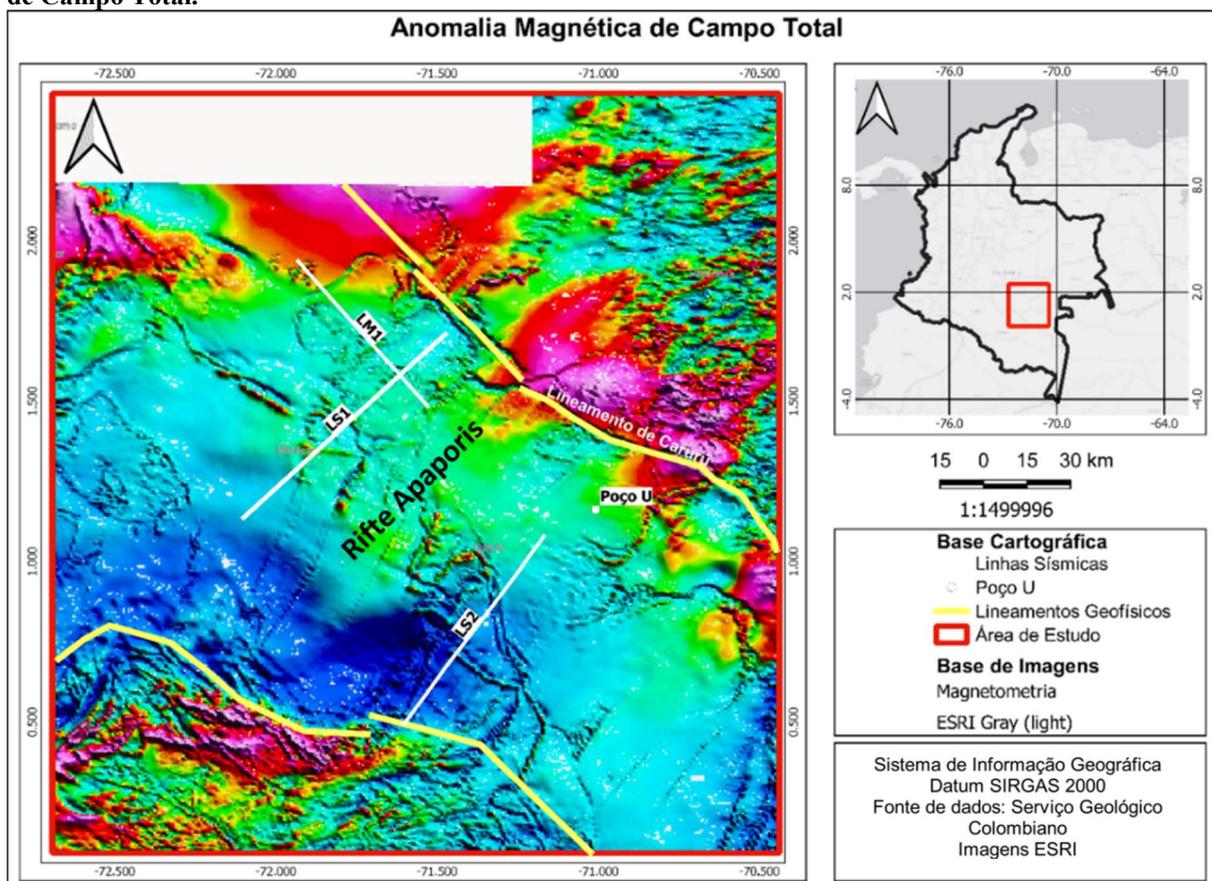


Fonte: Autora (2022).

Os resultados de processamento dos dados e aplicação de filtros aos dados iniciais apresenta a estrutura de um grid que aparentemente pode ser correlacionado aos registros da linha de voo e linhas de controle do levantamento. Dada a circunstância e a ausência dos dados brutos, no formato (.XYZ) do aerolevanteamento, não houve a possibilidade de continuidade do processamento dos dados para avanços no estudo das informações de subsuperfície das estruturas registradas em superfície. No entanto, visando a observação dos dados aeromagnéticos pré-existentes foram utilizadas as imagens dos grids dos mapas elaborados e compilados pelo SGC, para fins de identificação de algumas feições encontradas, bem como eventuais contribuições.

Ao georreferenciar as imagens dos produtos aerogeofísicos do aerolevanteamento do Bloco 9 da Guainia, da Amazonia-Orinoquia, procura-se no possível sobrepor as feições lineares já mapeadas, que correspondem a delimitação caracterizadas pelas variações de suscetibilidade magnética na crosta, como lineamentos e falhas, definidas como lineamentos primários. Foram identificadas duas grandes feições (Figura 22), que ao correlacionar com outros estudos (ETAYO *et al.* (1983), CEDIEL, 2019 e MOYANO-NIETO *et al.* (2022)), e realizar a sobreposição dos dados de lineamentos primários, foram identificados a falha de Carurú, que possuem a direção preferencial NWW-SEE, na porção ao norte e a lineamento ao sul contornando a rochas de idades paleozoicas que afloram na região.

Figura 22 – Lineamentos geofísicos principais (amarelo) obtidos a partir do mapa de Anomalia Magnética de Campo Total.

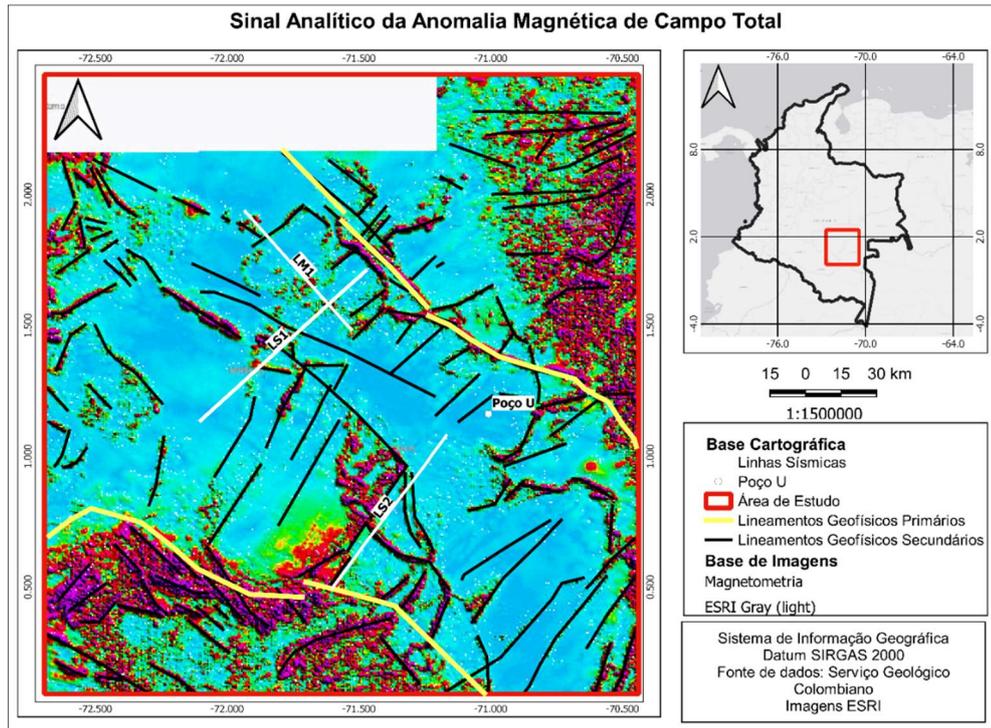


Fonte: Autora (2022).

As falhas e feições estruturais interpretadas, estão associadas aos limites do “Rifte do Apaporis” que apresenta direção preferencial NW-SE (MOYANO-NIETO *et al.*, 2022), tais feições foram primeiramente identificadas através de imagens de radar e com dados geofísicos e geológicos (DE BOORDER (1981) e ETAYO *et al.*, (1983)).

As anomalias observadas na imagem anterior foram melhor identificadas com a aplicação do filtro de Amplitude do Sinal Analítico (ASA), onde se destacaram fontes magnéticas com os maiores valores positivos, proveniente das rochas metamórficas e ígneas da região. Em sua maioria, os mesmos apresentam direção preferencial NW-SE e NWW-SEE e secundariamente na direção NE-SW, conforme as orientações preferenciais descritas para a região (Figura 23).

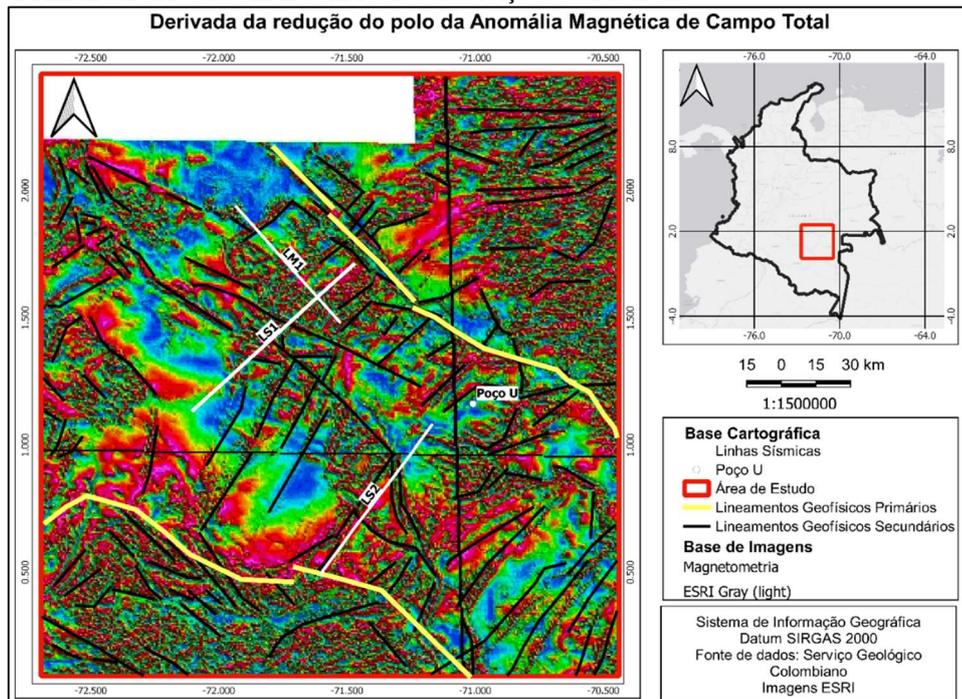
Figura 23 - Lineamentos geofísicos secundários (preto), extraídos com o auxílio no mapa da ASA dos dados magnéticos.



Fonte: Autora (2022).

Analisando a imagens da primeira derivada da redução do polo da Anomalia Magnética, foi observado o realce de algumas das continuidades das feições lineares, similares às identificadas anteriormente e que foram mapeadas (Figura 24).

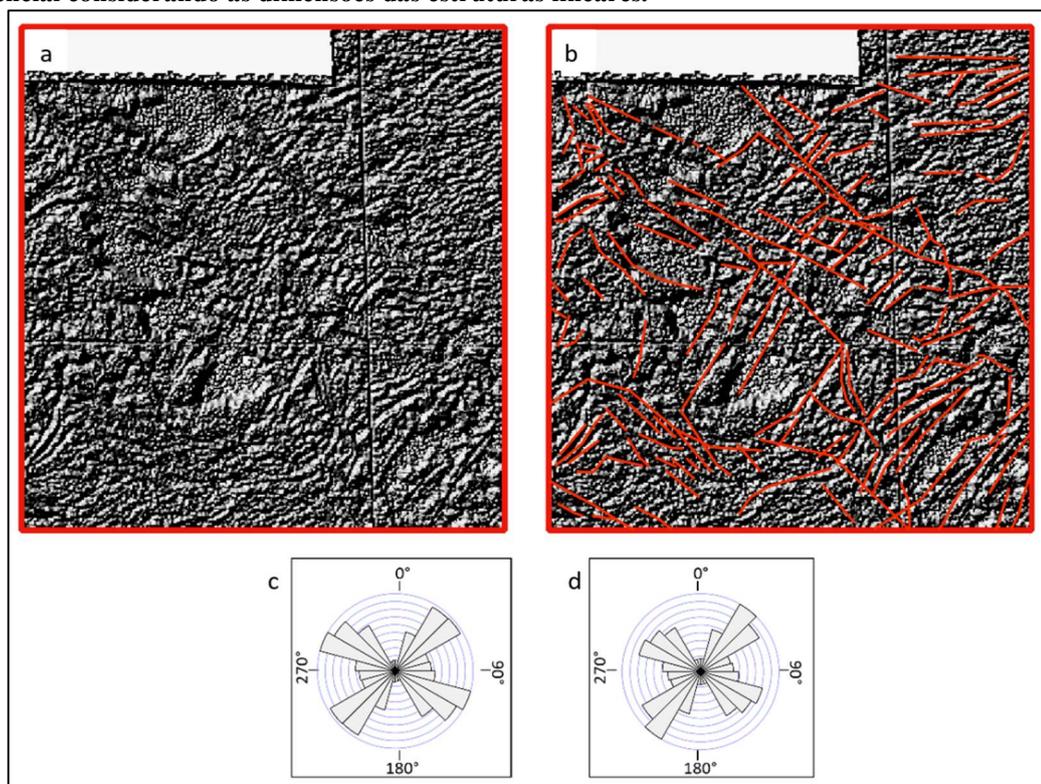
Figura 24 - Primeira Derivada em Z com realce das feições estruturais.



Fonte: Autora (2022).

Para a realização da interpretação das estruturas mapeadas, foi aplicado o filtro de sombreamento sintético com direção de iluminação distintas, com o objetivo de realizar o mapeamento de forma manual das feições a partir do realce das feições e estruturas presentes na área. Após a extração dos lineamentos, foi elaborado os diagramas de rosetas, no qual foi diagnosticado a direção preferencial NW-SE e NE-SW levando em consideração a dimensão dos lineamentos (figura 25c) e a direção preferencial das estruturas levando em consideração apenas a quantidades de feições mapeadas (figura 25d).

Figura 25 – (a) sombreamento sintético aplicado ao produto da 1ª derivada, (b) mapeamento dos lineamentos (vermelha), (c) o diagrama de roseta indicando a direção preferencial das feições e (d) direção preferencial considerando as dimensões das estruturas lineares.



Fonte: Autora (2023).

Na figura 25 (b, c e d), é observado uma tendência na direção preferencial para NNE-SSW e EW para os lineamentos secundários. Na porção superior direita da área de estudo (Figura 25b), é registrado a concentração dos lineamentos na direção E-W, direções preferenciais somente presentes nesta porção. Tão constatação pode ser interpretada como características de terrenos distintos, sendo os mesmos separados pelo lineamento de Carurú.

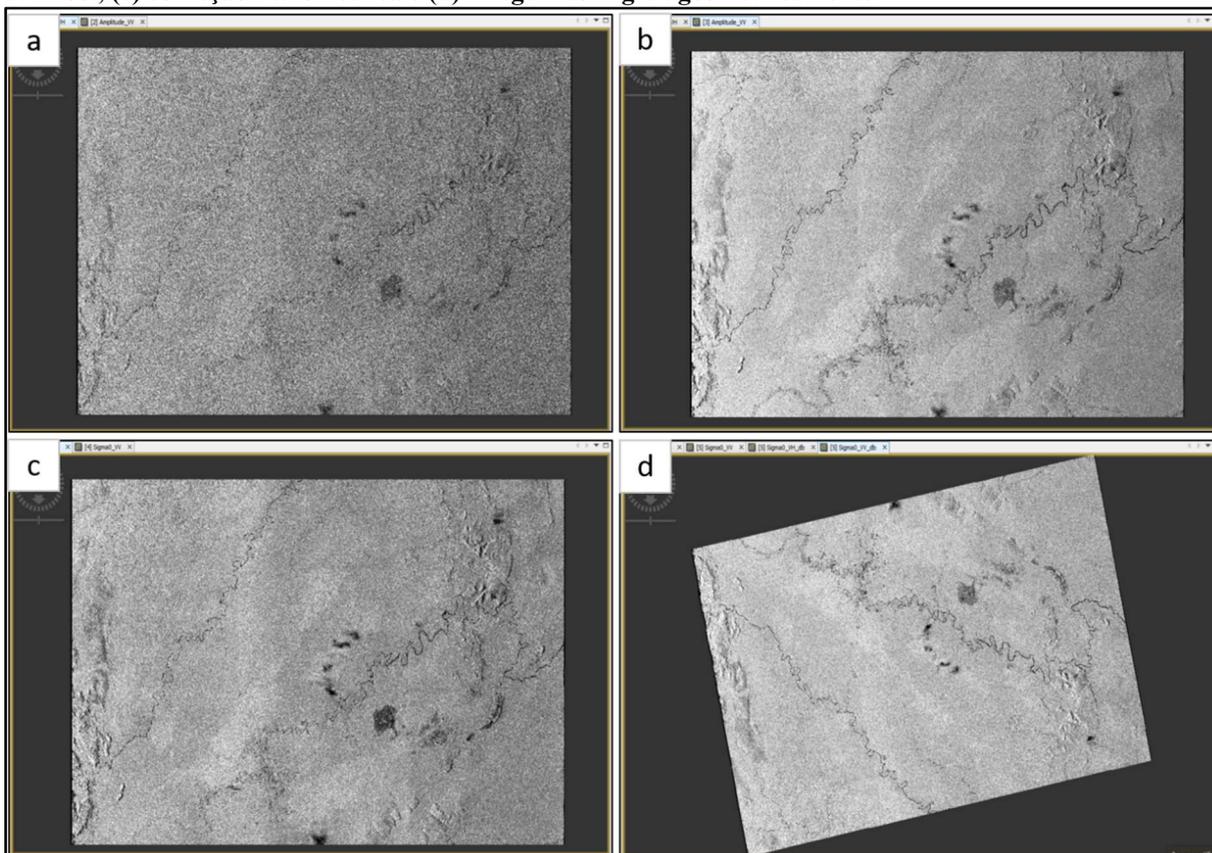
O terreno pertencente a Faixa Vaupés, localizado abaixo do lineamento de Carurú, tem feições estruturais na direção predominante NE-SW e apresenta episódios de magmatismo importantes relacionados a orogenia Atabalo e Vaupés (MOYANO-NIETO *et al.*, 2022). Durante a perfuração do poço U, foram encontradas rochas pertencentes a uma intrusão máfica

de idade neoproterozóica no embasamento cristalino o que corrobora esta interpretação (KROONEMBERG, 2019). No centro, entre esses dois terrenos, com respostas magnéticas bem distintas, tem-se o Graben Apaporis, interpretado como uma bacia preenchida por material sedimentar de baixa susceptibilidade magnética, onde as direções preferenciais das feições mapeadas nesse trecho tendem a NW-SE. A formação deste domínio se deu em um ambiente extensional intracontinental dentro do Cráton Amazônico, associada inicialmente as atividades de subducção do período extensional do ciclo orogênico de Putumayo e depois suas estruturas foram reativadas na fase de colisão do Putumayo e a fragmentação do continente Rondínia no Neoproterozoico.

5.4. Imagens Sentinel-1A

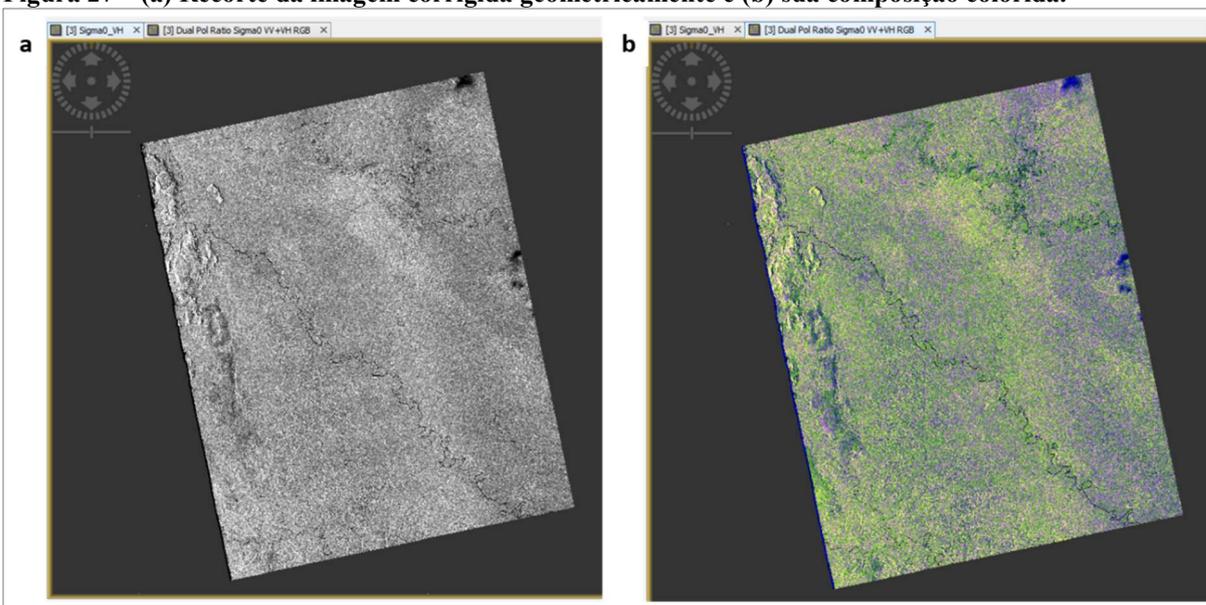
Com a finalidade de entender a geologia de superfície, foram utilizadas as imagens de radar do sensor Sentinel 1 A e do Copernicus para a obtenção de dados de lineamentos da região. As imagens Sentinel 1 A passaram pelo processamento digital de imagem (PDI). Na figura 26a tem-se a imagem de radar Sentinel 1 A bruta, após a sua obtenção no banco de dados da ESA, na figura 26b temos a imagem de radar com a aplicação do filtro *Frost* para a eliminação dos ruídos *Speckle*, na qual é identificada na imagem com pixels de tons claros e escuros, também conhecido como o efeito sal e pimenta. Após, foi realizada a correção radiométrica e geométrica da imagem (Figuras 26c e 26d, respectivamente). A correção radiométrica converte os números digitais dos pixels da imagem para valores de retrodispersão calibrados, que geram imagens com os valores de pixels diretamente relacionados ao retroespalhamento do radar na cena. Já a correção geométrica é necessária, tendo em vista da necessidade de configurar a imagem inclinada, característica de imagens de radar, para a posição geográfica adequada com base em um sistema de coordenadas do mapa, utilizando um modelo digital de elevação. E por fim, tendo em vista que as imagens de radar do sensor Sentinel 1 A são bem extensas, foram feitos recortes das imagens para auxiliar na manipulação e mapeamento das feições lineares das imagens (Figura 27).

Figura 26 - (a) Imagem Sentinel-1 A original, sem processamento digital, (b) resultado da aplicação do Filtro de Frost, (c) correção radiométrica e (d) imagem corrigida geometricamente.



Fonte: Autora (2022).

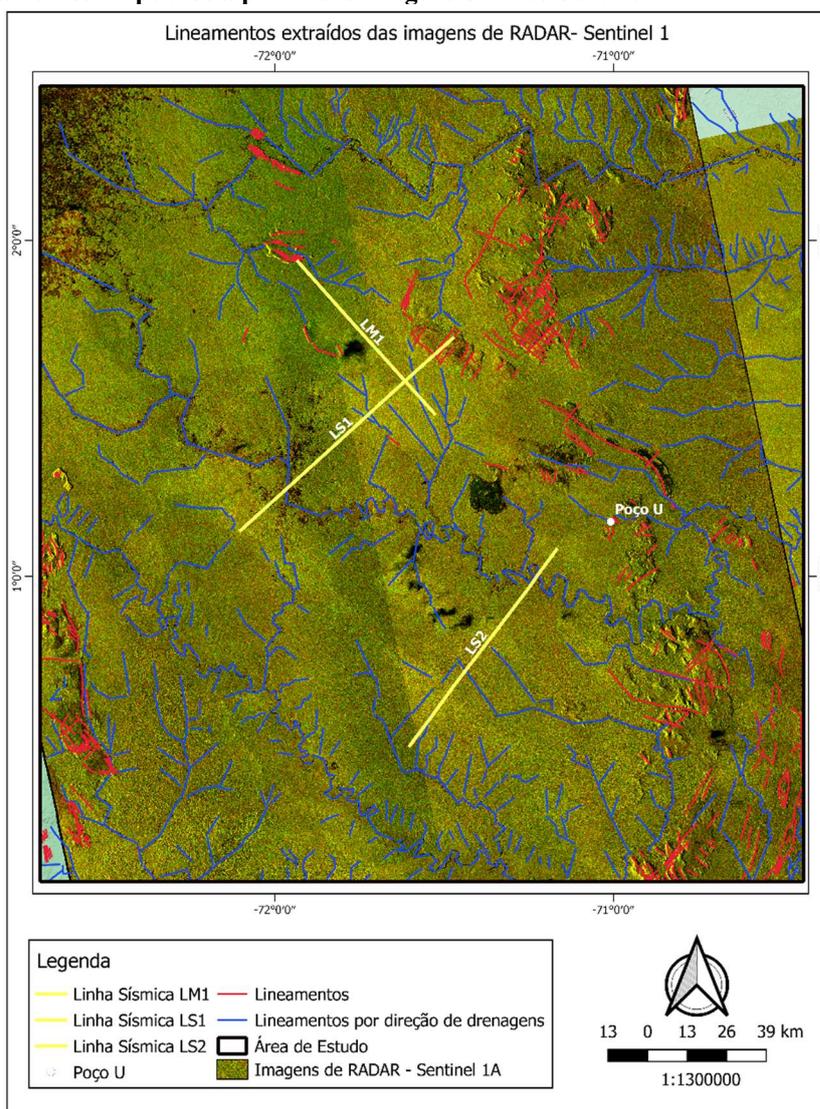
Figura 27 – (a) Recorte da imagem corrigida geometricamente e (b) sua composição colorida.



Fonte: Autora (2022).

Durante o processamento dos dados, para favorecer a manipulação e o mapeamento dos lineamentos nas imagens, foram feitos recortes considerando os limites da área de estudo, em seguida foram convertidas em formato GEOTIFF para análise e assim realizar o mapeamento dos lineamentos morfoestruturais de caráter regionais. As feições em superfície foram mapeadas (Figura 28), seguindo os critérios que os lineamentos são linhas de segmentos que correspondem a escarpas, alinhamento de cristas e vales, trechos de rios, depressões alongadas, bem como feições lineares que separem terrenos com feições texturais distintas (LIU, 1984).

Figura 28 - Lineamentos mapeados a partir das imagens SAR do Sentinel 1 A.



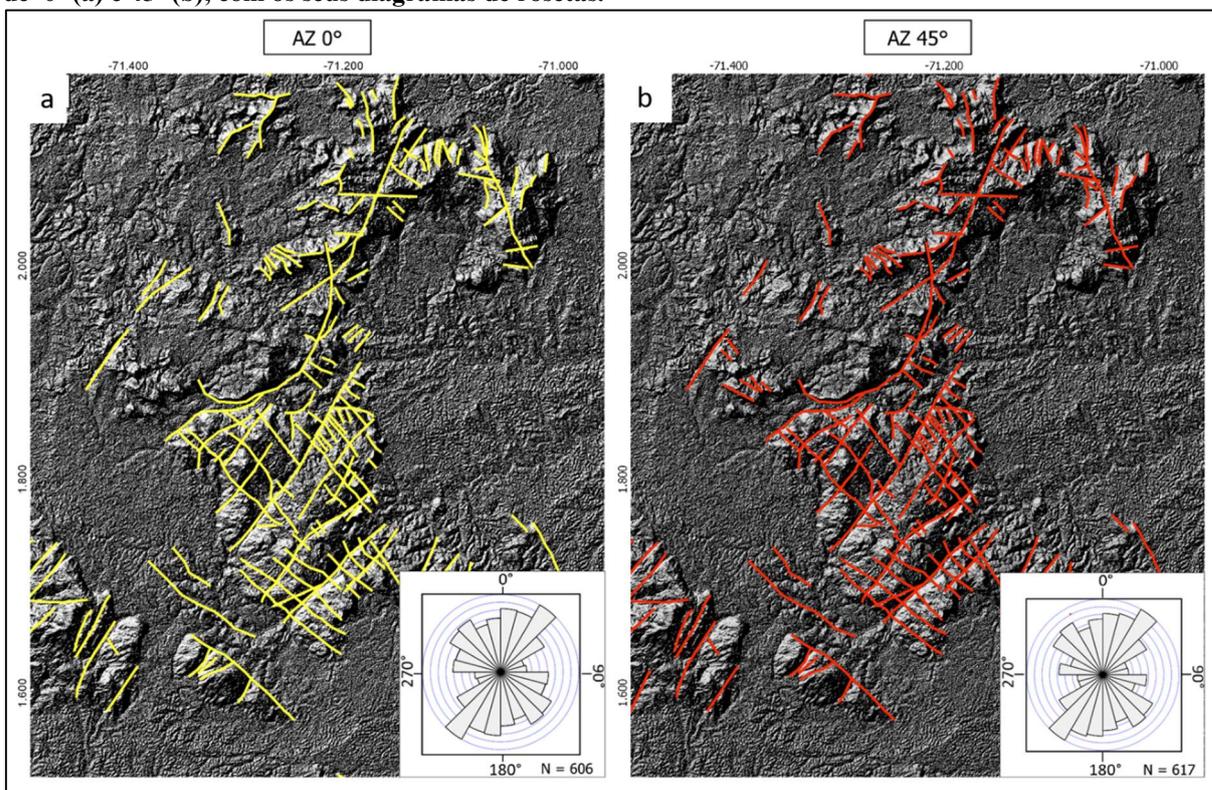
Fonte: Autora (2022).

Ao todo das imagens SAR foram extraídos 1.309 lineamentos morfoestruturais, dos quais 853 feições mapeados a partir das drenagens, com predomínio direcional de NE-SW e 456 lineamentos obtidos a partir das feições retilíneas registradas em altos topográficos, onde as mesmas possuem direção preferencial NW-SE e NE-SW, direções coincidentes às falhas e

lineamentos já mapeados pelo Serviço Geológico Colombiano para a região leste da frente da deformação andinas (GÓMEZ *et al.*, 2019).

Com o auxílio de dados do Modelo Digital de Elevação (MDE) da Copernicus, foi realizado o mapeamento dos lineamentos, bem como a comparação dos resultados das feições extraídas a partir das imagens Sentinel 1A. Além disso, utilizando o sombreado a partir da variação azimutal dos ângulos de incidência solar, foi possível a identificação de mais lineamentos como a delimitação dos já mapeados. O relevo sombreado nos azimutes de 0° e 45° (Figuras 29a e 29b) apresentam lineamentos com direção preferencial de NE-SW seguidos pela direção NW-SE. Essa variação de sombreado realça as feições já identificadas nas imagens Sentinel 1A, possibilitando o melhor mapeamento das suas prolongações dos lineamentos.

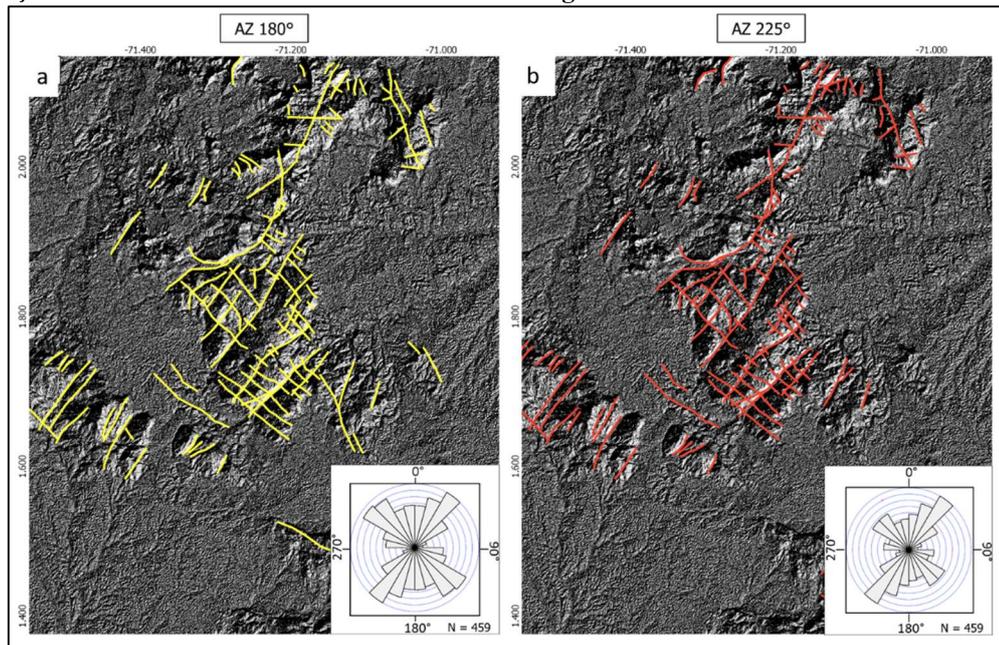
Figura 29 - Imagens do relevo sombreado com 30 metros de resolução espacial, obtidos por azimutes solares de 0° (a) e 45° (b), com os seus diagramas de rosetas.



Fonte: Autora (2023).

Nas imagens geradas com o sombreado de 180° e 225° (Figuras 30a e 30b), as feições que não estavam visíveis, tiveram maior destaque, possibilitando a sua delimitação. Ao todo foram localizados, com o sombreado de 180°, 459 lineamentos com direção preferencial de NE-SW e NW-SE, enquanto o sombreado de 225° foram extraídos 463 lineamentos com direção preferencial NE-SW e com direção secundária para NW-SE.

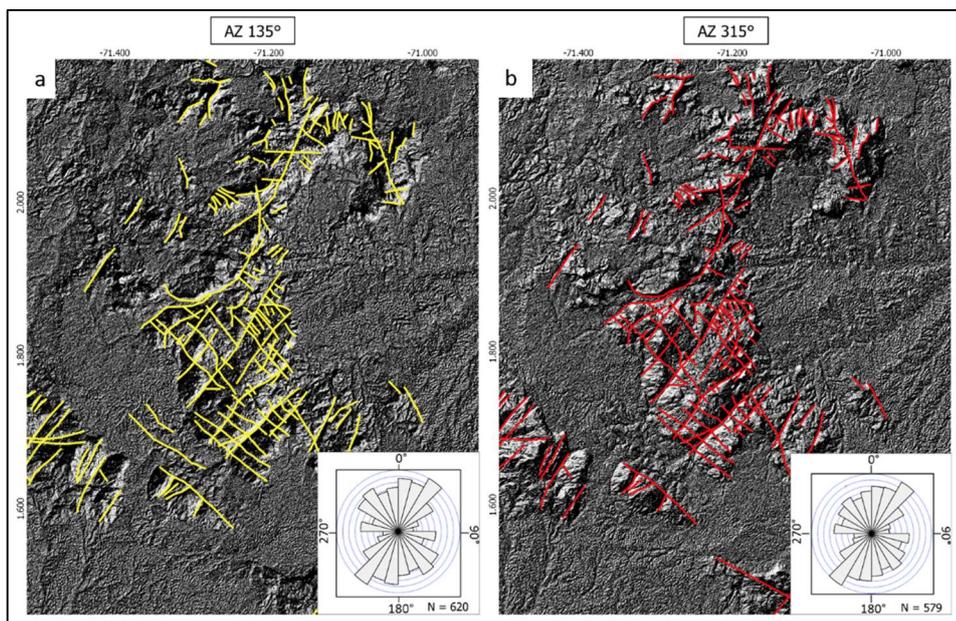
Figura 30 – (a) imagens do relevo sombreado para os azimutes solares de 180° e (b) 225°, com a interpretação dos lineamentos morfoestruturais e seus diagramas de rosetas.



Fonte: Autora (2023).

Assim como os lineamentos obtidos pelo sombreado de 0° e 45°, os dados obtidos pelo sombreado de 315° (Figura 31) indicam a direção preferencial para NE-SW e NW-SE, enquanto o produto gerado pelo mapeamento do sombreado de 135° indica a direção preferencial das feições para NE-SW, conforme a tendência preferencial encontrada, nos sombreados 180° e 225°, que tendem a realçar as feições encontradas nas zonas de sombra da imagem dos demais azimutes.

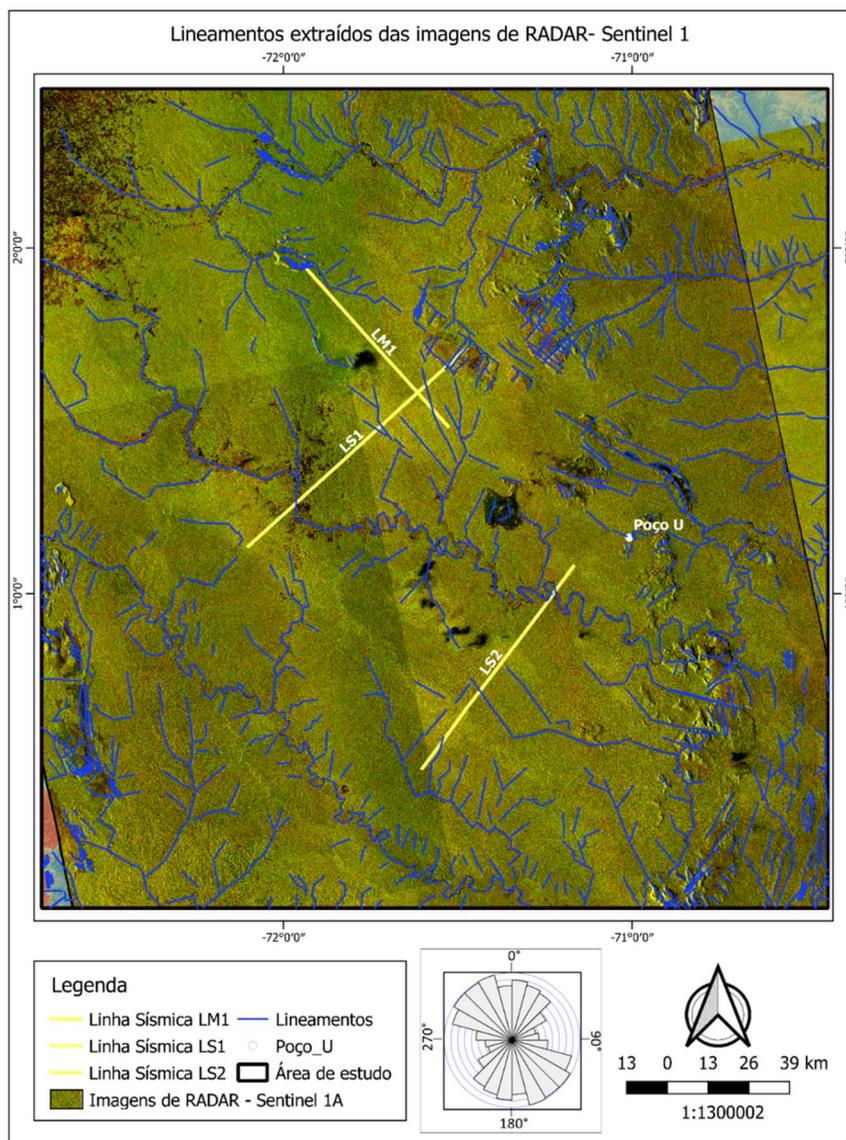
Figura 31 – (a) imagens do relevo sombreado para os azimutes solares de 135° (b) e 315° e seus diagramas de rosetas.



Fonte: Autora (2023).

Os lineamentos mapeados da área foram compilados e apresentam a direção preferencial geral NW-SE seguida de NE-SW (Figura 32). As imagens SAR Sentinel foram tratadas de forma individual, devido alta necessidade de capacidade computacional para a elaboração do mosaico das imagens da área de estudo, o que favoreceu a visualização dos limites das cenas na referida imagem.

Figura 32 - Produto final da extração dos lineamentos e a roseta indicando a direção preferencial dos mesmos.



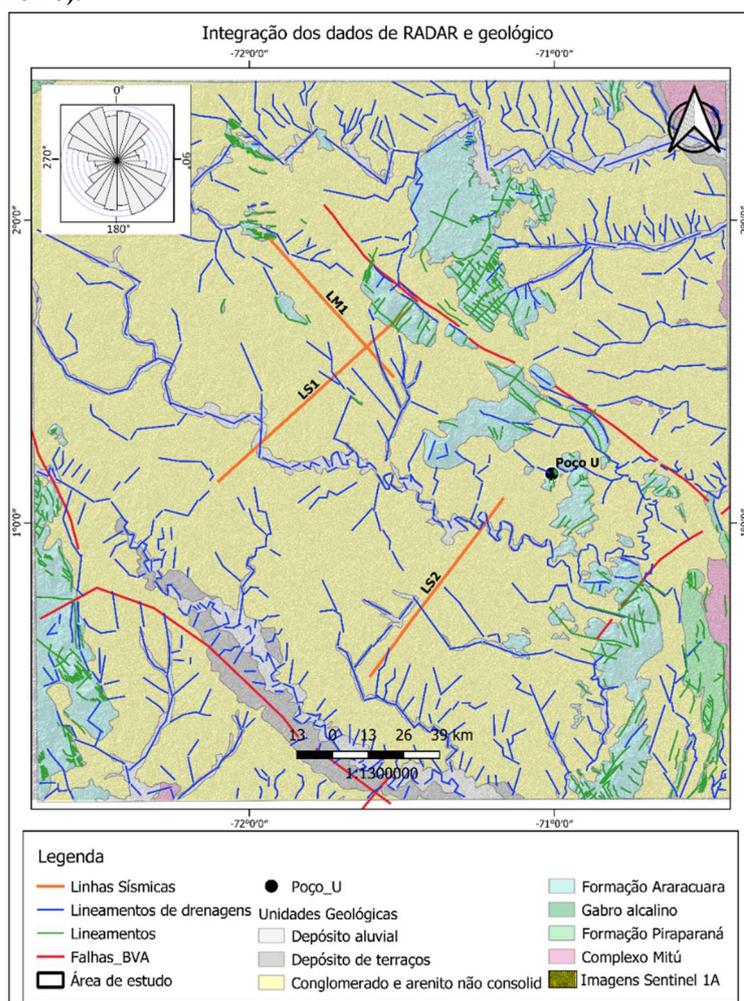
Fonte: Autora (2023).

5.5. Integração dos dados

Ao correlacionar os dados vetoriais dos lineamentos extraídos, a partir da análise das cristas e dos vales do relevo utilizando as imagens de radar, com os dados do mapeamento geológico da área e os dados do MDE, foi observado que as feições que se concentram nas

regiões topograficamente mais elevadas da bacia, que correspondem às rochas aflorantes das Formações Araracuara e algumas à Formação Piraparaná (Figura 33). Na primeira formação, são caracterizados diversos longos lineamentos que formam vales no formato de U. No entanto, de acordo com Galvis; Huguet; Ruge, (1979), tais lineamentos não são causados por falhas pois não são encontrados vestígios de deslocamento de estratos. É possível observar os padrões de direção dos lineamentos das rochas aflorantes na porção superior à direita, os quais diferem dos extraídos a partir dos padrões de drenagens do seu entorno à esquerda e na porção inferior. Essa característica reforça a interpretação morfoestrutural (MOYANO-NIETO *et al.*, 2022), que separa a região em dois terrenos tectônicos distintos: Graben Apaporis e a Faixa Atabapo.

Figura 33 - Correlação dos dados da geologia regional com os dados de lineamentos extraídos de cristas e vales do relevo (vermelho).

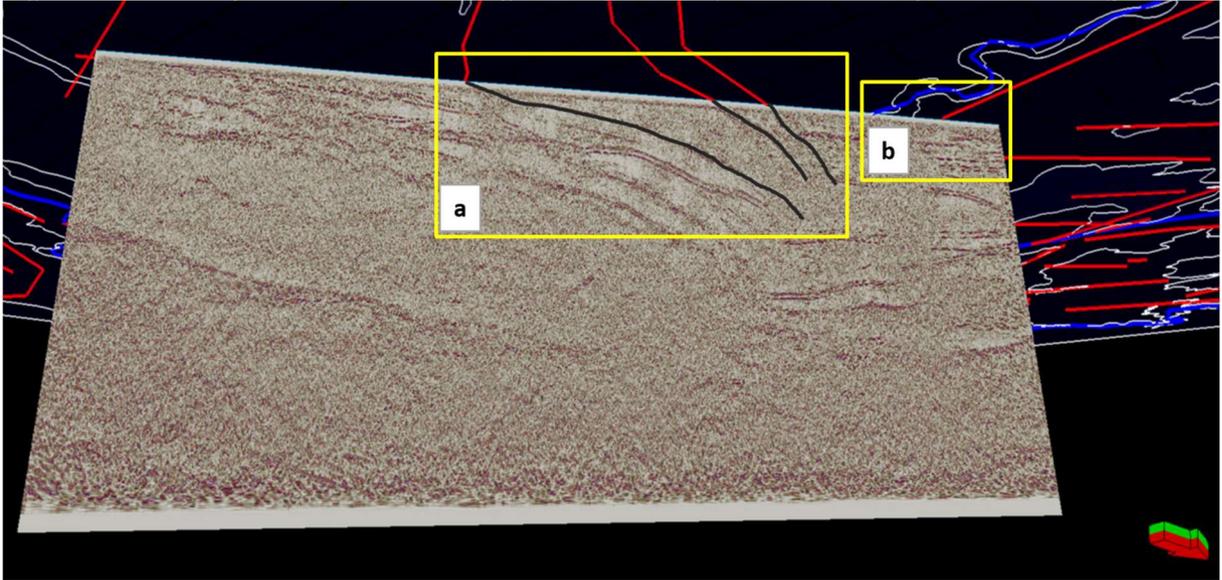


Fonte: Autora (2023).

Ao sobrepor os dados de lineamentos com os produtos gerados pela análise de subsuperfície, foram possíveis conectar alguns lineamentos registrados na superfície que se prolongavam para a subsuperfície, segundo a interpretação das linhas sísmicas, foram identificadas falhas situadas próximo à superfície (Figura 34). Alguns lineamentos mapeados

em superfície apresentam continuidade nas linhas sísmicas (quadro a), enquanto outros lineamentos não tiveram (quadro b). As informações do modelo determinístico preliminar, junto aos dados litológicos dos poços servem para criar o modelo estático, o qual corresponde a um modelo estatístico com todas as camadas preenchidas com propriedades litológicas.

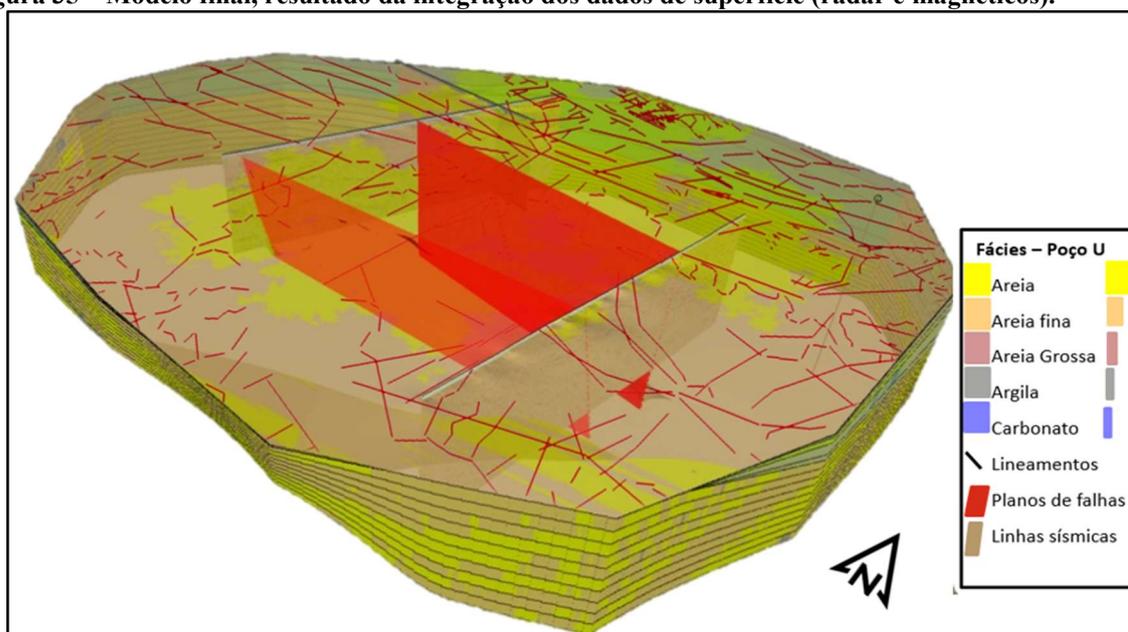
Figura 34 – Correlação dos lineamentos magnéticos (vermelho) e as falhas na seção sísmica LS2 (preto).



Fonte: Autora (2023).

Considerando o modelo conceitual, contendo as superfícies, as falhas e os lineamentos mapeados em subsuperfície, foram adicionados a ele os resultados dos lineamentos mapeados em superfície. Este dado vetorial apresenta o resultado compilado dos lineamentos extraídos das imagens de radar e dos dados de magnetometria. Ao realizar a junção dos referidos dados, foi feita a avaliação e o controle de qualidade para evitar as sobreposições/duplicidade de lineamentos, para posterior inserção dos dados no modelo. O produto dessa junção foi inserido no modelo tridimensional (Figura 35).

Figura 35 – Modelo final, resultado da integração dos dados de superfície (radar e magnéticos).



Fonte: Autora (2023).

Este modelo é preenchido estatisticamente, usando a interpolação dos dados para as áreas em que não possuem informações de poços ou dados sísmicos, seguindo o modelo de horizontes e superfície fornecidos dos pontos estratégicos de onde tem-se dados sísmicos ou de poço, correspondendo a um modelo de camadas simples. Já as litofácies definidas, as mesmas foram utilizadas para popular o modelo. A distribuição dos dados interpolados foi realizada por meio de Krigagem que se baseia nas correlações entre as medições existentes e a estimativa a realizar. A correlação depende da distância entre as amostras, onde as amostras próximas da variável tendem a ter maior influência do resultado.

6. DISCUSSÕES

A área do Vaupés-Amazonas é caracterizada predominantemente por sequências sedimentares sobrepostas a um embasamento cristalino do Complexo do Mitú, sendo elas a Formação Araracuara, a Formação Piraparaná e os depósitos do Neógeno e do Quaternário. De acordo com os resultados da análise de dados da subsuperfície do perfil de poço, a porção sudeste, é constituída apenas por três unidades geológicas, sendo elas a Formação Araracuara, o corpo intrusivo denominado Gabro Anortosítico e o embasamento cristalino, Complexo Mitú. Ao correlacionar os dados geológicos dessa área com a análise das seções sísmica para as demais porções da área de estudo é possível compreender que a disposição da estrutura da bacia é composta pelo embasamento cristalino do Complexo do Mitú, limitado ao topo pelo horizonte 1, coberto pelas rochas sedimentares da Formação Araracuara e sedimentos do Neógeno, limitadas pelos horizonte 6 e 7 respectivamente, além de porções que apresentam sedimentos

do Quaternário que devido a escala não foram delimitados pois estão a alguns metros da superfície. A Formação Piraparaná não foi registrada nesses dados devido à sua disposição geográfica estar mais distante da área de levantamento dos mesmos.

As feições geomorfológicas, permitem evidenciar efeitos de erosão, possibilitando a delimitação das discordâncias geradas possivelmente por eventos que combinam processos de subsidência, quedas eustáticas, e exposição subaérea ou a não deposição de sedimentos. Além dos paleocânions, os níveis superiores também estão caracterizados por pequenas feições erosivas discretas, com dezenas de metros de comprimento, podendo ser interpretadas como paleocanais.

Ao analisar as imagens de sensoriamento remoto da área de estudo, em especial os dados do MDE do Copernicus, são identificadas estruturas geomorfológicas caracterizadas pela presença de três tipos de relevo: morros residuais, morros baixos dissecados, e planícies denudacionais. Na parte central estão as duas unidades de morro em uma planície residual, produtos de material arenoso da erosão dos arenitos da Formação Araracuara. Nessas planícies surgem colinas residuais com alturas relativas entre 100 e 150 metros. Esses morros apresentam formas irregulares e dimensões diferentes com orientação NW-SE, onde as camadas de rochas arenosas formam bordas locais e declives estruturais. Essas formas se destacam sobre a planície arenosa residual. As zonas montanhosas ocorrem nas bordas sudoeste e nordeste da área de estudo. As colinas do setor sudoeste caracterizam-se por apresentarem uma altura relativa com cotas entre 20 e 30 metros de altura com bordas abruptas e dissecadas. Os morros do setor nordeste são de altura relativa menor, de 10 a 15 metros, altamente dissecados com densos sistemas de drenagem dendrítica. O rio Vaupés na área de estudo apresenta um canal ativo sinuoso com a formação de algumas ilhas fluviais, cujo leito principal sobre o qual o canal ativo vagueia e pode atingir uma largura de 10 a 15 km.

Ao analisar os lineamentos mapeados com as imagens de radar e a contribuição dos dados aeromagnetométricos, observa-se que o terreno apresenta tendências distintas de direção de lineamentos agrupadas na área, indicando que as mesmas são características de terrenos tectônicos distintos. Tal constatação é identificada em estudos recentes que propõem a compartimentação da área em 3 domínios tectônicos: a Faixa Vaupés, Faixa Atabapo e o Graben Apaporis. O terreno pertencente a Faixa Vaupés, fica localizado abaixo do lineamento de Carurú (limite/sutura do cinturão magmático Atabapo e Vaupés), que tem feições estruturais na direção predominante NE-SW e apresenta episódios de magmatismo importantes relacionados a orogenia Atabapo e Vaupés (MOYANO-NIETO *et al.*, 2022; KROONEMBERG, 2019). Tais registros foram identificados no levantamento dos dados, bem

como realização do mapeamento de um maior número de lineamentos que nos trabalhos anteriores, além da identificação de amostras de rochas intrusivas na base do poço U, o que corrobora tais informações. Na porção superior, à direita da área de estudo, aparecem lineamentos na direção E-W e NNE-SSW, direções essas distintas dos lineamentos identificados nas demais áreas de estudo, sendo os lineamentos representativos do domínio tectônico da Faixa Atabapo.

No centro, entre os terrenos da Faixa de Vaupés e Faixa de Atabapo, com respostas magnéticas bem distintas, tem-se o Graben Apaporis, interpretado como uma bacia preenchida por material sedimentar de baixa susceptibilidade magnética, onde as direções preferenciais das feições mapeadas nesse trecho tendem a NW-SE. No Graben Apaporis, estão localizados as linhas sísmicas e o poço. Sua formação se deu em um ambiente extensional intracontinental, dentro do Cráton Amazônico, associado inicialmente às atividades de subducção do período extensional do ciclo orogênico de Putumayo, onde mais tarde sofreu reativação desde a colisão do orógeno Putumayo até a fragmentação do continente Rondínia durante o Neoproterozoico.

7. CONCLUSÃO

Os modelos tridimensionais, precisam da integração de ferramentas, técnicas e métodos multidisciplinares, como neste caso de estudo. A Bacia do Vaupés-Amazonas, apresenta geomorfologia dominada por feições estruturais registradas na superfície, como o lineamento de Carurú e os lineamentos secundários com estruturas de direções distintas, além de apresentar em seu arcabouço de subsuperfície, camadas sub-horizontais e feições que indicam que os pacotes sedimentares passaram por fortes eventos erosivos. Tais evidências de erosão são identificadas a partir das formas dos horizontes superiores das sismofácies, definidas como discordâncias, estruturas de grandes dimensões, paleocânions com registro de acreção lateral, bem como o arranjo da terminação dos refletores nos estratos.

A partir dos dados sísmicos é possível obter informações relevantes para o conhecimento geológico da área, i.e., feições estruturais e geomorfológicas correspondentes a paleocânions, paleocanais, preenchimento de canais, discordâncias e falhas. Assim a interpretação de dados geofísicos permite evidenciar feições de diferentes tamanhos, presença de cânions, vales, *scours* e canais. Tais estruturas são caracterizadas pelas descontinuidades laterais dos refletores. Os paleocânions presentes se estendem por quilômetros, com presença de vales incisivos e alguns paleocanais.

O uso de métodos indiretos possibilitou o entendimento e a maior compreensão da geologia de subsuperfície. Embora, as análises tenham sido realizadas com sísmica 2D, estas

proporcionaram um bom resultado na identificação das estruturas e feições encontradas na porção rasa da bacia. Ao analisar o produto da integração dos dados, foi constatado que as evidências geomorfológicas estão relacionadas com a formação do Gráben Apaporis e a evolução do Alto do Vaupés, que ocorrem desde o Paleógeno até o recente, com episódios tectono-estratigráficos associados.

Os dados de radar e aeromagnéticos possibilitaram a identificação e a extração de lineamentos estruturais, de diferentes comprimentos e disposições sendo as mesmas classificadas como feições estruturais primárias e secundárias segundo as características apresentadas. As feições estruturais apresentam três tipos de padrões estruturais agrupados na região com as direções: NW-SE, E-W e NE-SW. Essas informações permitem a compartimentação da área em domínios tectônicos distintos e auxiliam na compreensão da evolução tectônica da região.

Sugere-se que sejam realizados estudos utilizando imagens de radar e dados aerogeofísicos para que as feições estruturais registradas em superfície, sejam mapeados em maior escala de detalhe, possibilitando maior detalhamento do mapeamento da região bem como a identificação dos seus padrões estruturais, o que possibilitará a interpretação dos eventos que ocorreram durante a evolução geológica e um detalhamento da compartimentação tectônica da área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁLVAREZ, J. Determinación de la edad Rb-Sr en rocas del Macizo de Garzón, Cordillera Oriental de Colombia. **Geología Norandina**, v. 4, 1981, p. 31-38.
- AMINZADEH F., DASGUPTA S. **Geofísica para engenheiros de petróleo**. Rio de Janeiro: Campus, Ed. 1, 2015, p, 304.
- ARAÚJO NETO, J. F. DE; SANTOS, G. L., SOUZA; I. M. B. DE A. E; BARRETO, S. DE B.; SANTOS, L. C. M. DE L.; BEZERRA, J. P. S.; CARRINO, T. A. Integração de sensoriamento remoto, aerogeofísica e análise estrutural no mapeamento geológico: estudo de caso da região de Vieirópolis, Província Borborema, Nordeste do Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, 18(3), p. 89-103, 2018.
- AYRES NETO A. Uso da Sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 18, Ed. 3, 2001, p. 241- 256.
- BALDIS, B.A. Posibilidades de correlación del Ordovícico de Los Llanos Colombianos y La Alta Amazonia – Brasileño - Equatoriana. In *Latinamerican Congress of Sedimentology*, Pará, Brazil. **Abstracts**, SBG, 1988, p.500-506.
- BLUM, M. L. B. **Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil Central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral**. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de Brasília, UNB, Brasília, 1999.
- BOGOTÁ, J. Estratigrafía del Paleozoico Inferior en el área amazónica de Colômbia. **Geología Norandina**, (6), 1982, p. 29-38.

- BULHÕES, E. M.; AMORIM, W. N. Princípio da sismocamada elementar e sua aplicação à técnica volume de amplitudes (tecVA), In: **9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, 2005.
- BUSTAMANTE, S. G. H. **Previsão de medições geofísicas: pseudo-poços**. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, p. 204, 2012.
- CARNEIRO, M.A.; BARBOSA, M.S.C. Implicações geológicas e tectônicas da interpretação magnetométrica da região de Oliveira, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 1, p. 87-98, 2008.
- CEDIEL, F. Phanerozoic Orogens of Northwestern South America: Cordilleran-Type Orogens. Taphrogenic Tectonics. The Maracaibo Orogenic Float. The Choc'o-Panam'a Indenter. In: Cediél F., Shaw R. (Ed.), **Geology and Tectonics of Northwestern South America. The Pacific-Caribbean-Andean Junction**, p. 3-95, 2019.
- CELADA, C.M.; GARZÓN, M.; GÓMEZ, E.; KURAMA, S.; LÓPEZ, J.A.; MORA, M.; NAVAS, O.; PÉREZ, R.; VARGAS, O.; WESTERHOF, A. B. **Potencial de recursos minerales en el oriente colombiano: Compilación y análisis de la información geológica disponible (fase 0)**. Bogotá, Colômbia: Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), 2006. 232 p.
- CORDANI U.G.; TASSINARI C.G.G.; TEIXEIRA W.; KAWASHITA K.; BASEI M.A.S. Evolução Tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos. In: Congresso Geológico Chileno, 2, Arica (Chile). **Actas...** Santiago: Sociedad Geológica de Chile, 4, 1979, p. 134-148.
- COSTA, Solange dos Santos. **Delimitação do arcabouço tectônico do Cinturão Guiana Central, Estado de Roraima, com base na análise integrada dos dados geofísicos, geológicos, isotópicos e imagens de satélite**. Tese (Doutorado em Geociências) – Unicamp, Campinas, São Paulo, 2005.
- DE BOORDER, H. Structural-geological interpretation of SLAR imagery of the Colombian Amazonas. **Trans. Inst. Min. Metall.** 90, B145–B152, 1981.
- DE BOORDER, H. The La Trampa wedge (SE Colombia) revisited. 11th Inter Guiana Geological Conference, 2019.
- DGB. **Opentect version 6.4**. 2020. Disponível em: <<https://www.dgbes.com/index.php/download>>.
- DIAS, J. C.; MENDONÇA, A. P. **A adoção de metodologias ativas, software livres e repositórios gratuitos no ensino do processamento e interpretação de imagens de Radar Sentinel-1**. RENOTE, Porto Alegre, v. 18, n. 1, 2020. DOI: 10.22456/1679-1916.105994.
- ELLIS, D. V.; SINGER, J. M. Well Logging for Earth Scientists. Springer, **Netherland**, 2008, p. 699.
- EMBRAPA. **Sentinel – Missão Sentinel**. 2019. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/sentinel>>. Data de acesso: 15 junho de 2022.
- ENZILA, M. J. E. **Atenuação De Reflexões múltiplas e Uso de Atributos Sísmicos para Estudo De Reservatórios**. Dissertação de Mestrado. Salvador, Universidade Federal da Bahia, 2018.
- ESA. **Sentinel Online**. 2015. Disponível em: <sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>. Data de acesso: 22 julho de 2022.
- ETAYO, F., BARRERO, D., LOZANO, H., ESPINOZA, A., GONZALEZ, ' H., ORREGO, A., BALLESTEROS, I., FORERO, H., RAMÍREZ, C., ZAMBRANO, F., DUQUE-CARO, H., VARGAS, R., NUNEZ, ~ A., ALVAREZ, J., ROPAÍN, C., CARDOZO, E., GALVIS, N., SARMIENTO, L., ALBERS, J., CASE, J., GREENWOOD, W., SINGER, R., BERGER, B., COX, D., HODGES, C. Mapa de Terrenos Geológicos de Colômbia. Publ. Geol. Esp. **INGEOMINAS**, 1983, p. 139.
- FLORENZANO, T. G. **Iniciação e Sensoriamento Remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- FRANKS, P. C. Radiometric dating, petrography and termal history of core sample from Vaupes NO. 1 Well,

Leticia license, Colombia Amoco Production Company, 1988.

- GALVIS, J.; HUGUETT, A.; RUGE, P. Geología de la Amazonia Colombiana. **Boletín Geológico**, v. 22, n. 3, p.: 3 – 86, 1979.
- GARCIA, G. M.; CRUZ, L.; UMAÑA, R. Hydrocarbon prospectivity in the Vaupes-Amazonas basin, Colombia. **Boletín de Geología**, v. 35, p. 15-29, 2013.
- GARCÍA, G. BERMÚDEZ, J. RAMIREZ, C. RAMOS, K. ORTIZ, F. SEPÚLVEDA, J. SIERRA-ROJAS, M. Hierro oolítico en el área del municipio de Mitú (Departamento de Vaupes, Amazonía Colombiana). **Boletín de Ciencias de la Tierra**. P. 25-33, 2013.
- GÓMEZ, J., MONTES, N., NIVIA, A., DIEDERIX, H. **Atlas Geológico de Colômbia 2015**. Escala 1:500 000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá. 2015.
- GÓMEZ, J., SCHOBENHAUS, C., MONTES, N. **Geological Map of South America 2019**. Scale 1:5 000 000. Commission for the Geological Map of the World (CGMW), Colombian Geological Survey and Geological Survey of Brazil. Paris, 2019.
- GÓMEZ, Á. V. **Modelagem do embasamento e da geometria das bacias presentes na zona oeste da região amazônica da Colômbia e norte do Equador, aplicando magnetometria e técnicas de inversão gravimétrica tridimensional**. Universidade Nacional da Colombia, Unal, 2020.
- HUGUETT, A.; GALVIS J.; RUGE, P. Geologia. In: **La Amazonia colombiana y sus recursos**. Proyecto Radargrametrico del Amazonas, Bogotá, 1979, p. 29-92.
- IGAC. **Paisajes Fisiográficos de Orinoquía – Amazonía (ORAM) Colombia**. V. 27-28 **Análisis Geográficos**, Bogotá, Colômbia, 1999, p. 361. ISS 0120 – 8551.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**. Tradução: Maria Cristina Moreira Coelho. 2ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- KROONENBERG, S. A Grenvillian granulite belt in the Colombian Andes and its relation to the Guiana Shield. **Geologie in Mijnbouw**, v. 61, 1982, p. 325-333.
- KROONENBERG, S. B.; REEVES, C. V. **Geology and hydrocarbon potential Vaupés-Amazonas Basins**. In: CEDIEL, F. **Petroleum Geology of Colombia**. V. 15. Bogotá: ANH, 2011, p 94.
- KROONENBERG, S. The Proterozoic Basement of the Western Guiana Shield and the Northern Andes. In: Cediel F., Shaw R. (Ed.), **Geology and Tectonics of Northwestern South America. The Pacific-Caribbean-Andean Junction**, 2019. (pp 115-192). Switzerland. Springer.
- LIU, C. C. **Análise Estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação ao estado do Rio de Janeiro**. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 157p. 1984.
- LUIZ, J. G; SILVA, L. M. C. **Geofísica de Prospecção**. Vol 1. Belém: CEJUP, 1995.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T (Org). **Introdução ao Processamento de imagens de Sensoriamento Remoto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- MILLIGAN P.R., GUNN P.J. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, Ed. 2, 1997, p. 63- 75.
- MINTY, B. R. S. Simple micro-levelling for aeromagnetic data. **Exploration Geophysics**. V. 22, Ed. 4, 1991, p. 591-592.
- MIRANDA, L. B.; KJERFVE, B.; CASTRO, B. M. Circulation and Mixing due to Tidal Forcing in the Bertioga Channel, São Paulo, Brazil. **Estuaries and Coasts**, v. 21, 1998, p. 204- 211.

- MITCHUM, J. R. R. M.; VAIL, P. R.; THOMPSON, S. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 2: The Depositional Sequence as A Basic Unit For Stratigraphic Analysis. **AAPG Mem** 26:53–62. 1977.
- MORAIS, A. V., BLUM, L. B. **Mapa da Amplitude do Sinal Analítico do Brasil**. Universidade de Brasília. Brasília, 1999.
- MOYANO, I, CORDANI, R., CÁRDENAS, L., LARA, N., ROJAS, O, PUENTES, M., OSPINA, D., SALAMANCA, A., PRIETO, G. Contribution of new airborne geophysical information to the geological knowledge of eastern Colombia. In: Gomez, J. & Mateus–Zabala, D. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic*. Servicio Geológico Colombiano, **Publicaciones Geológicas Especiales** 35, 2020. p. 17–36. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.02>
- MOYANO-NIETO A. B; GERMAN, A; PRIETO, A; IBANEZ-MEJIA, C. M. Tectonic domains in the NW Amazonian Craton from geophysical and geological data. **Precambrian Research journal**. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106735>.
- NERY, G. G. Perfilagem Geofísica em Poço Aberto – Fundamentos básicos com ênfase em petróleo. - Rio de Janeiro: **SBGf**, 2013. 222p. ISBN: 978-85-88690-19-6.
- NOVO, E. M. L. M.; PONZONI, F. J. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. INPE. São José dos Campos, 2001.
- OPENTOPOGRAPHY, **Modelo de elevação digital global da Copernicus**. <https://doi.org/10.5069/G9028POB>, Disponível em <<https://portal.opentopography.org/datasetMetadata?otCollectionID=OT.032021.4326.1>>. 2021. Acesso em: 27 de maio de 2022.
- PRIEM, H. N. A.; ANDRIESSEN, P. A. M.; BOELRIJK, N. A. I. M.; DE BORDER, H.; HEBEDA, E. H.; HUGUETT, A.; VERDUMEN, E. A. T.; VERSCHURE, R. H. Geochronology of the Precambrian in the Amazonas region of southeastern Colombia (western Guiana Shield). **Geologie en Mijnbouw**, v. 61, Ed. 3, 1982, p. 229–242. ISSN 0016-7746.
- PUPIN, Josiana R. **Introdução às Séries e Transformada de Fourier e Aplicações no Processamento Digital de Sinais**. 2011. 65p.[s.n.], São Carlos, 2011.
- RAO, D. A.; BABU, H.V. R.; NARAYAN, P. V. Interpretation of magnetic anomalies due to dikes: the complex gradient method. **Geophysics**. v. 46, Ed. 11, 1981, p. 1572-1578.
- RIDER, M. *The Geological Interpretation of Well Logs*. 2 ed. Scotland. RiderFrench Consulting Ltd, Sutherland. 2002. p280.
- SANT’ANNA, S. J. S.; MASCARENHAS, N. Comparação do desempenho de filtros redutores de “speckle”. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, v. 8, p. 871-877, **Anais...**, 1996.
- SANTOS, J. O. S.; HARTMAN, L. A.; GAUDETTE, H. E.; GROVES, D. I.; MCNAUGHTON, N. J.; FLETCHER, I. R. A new understanding of the Provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U–Pb and Sm–Nd geochronolog. **Gondwana Research**, v. 3, 2000, p. 453-488.
- SANTOS, J. O. S.; HARTMANN, L. A.; FARIA, M. S. G.; RIKER, S. R. L.; SOUZA, M. M.; ALMEIDA, M. E. A Compartimentação do Cráton Amazonas em Províncias: Avanços ocorridos no período 2002– 2006. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 9, 2006, Belém. **Anais...**, 2006.
- SANTOS, J. O. S.; RIZZOTO, G. J.; POTTER, P. E.; MCNAUGHTON, N. J.; MATOS, R. S.; HARTMANN, L. A.; CHEMALE, F.; QUADROS, M. E. S. Age and autochthonous evolution of the Sunsás Orogen in West Amazon Craton based on mapping and U–Pb geochronology. **Precambrian Research**, v. 165, 2008, p. 120-152.
- SERRA, O. *Fundamental of Well-log Interpretation. The acquisition of Logging Data*. **Elsevier Science Publishers**, Amsterdam, Netherlands, Ed. 3, 1984.

- SEVERIANO RIBEIRO, H. J. P. **Estratigrafia de Sequência**: Fundamentos e aplicações. 1ª Ed. São Leopoldo, RS: UNISINOS, 2001.
- SORDI, D. A. **Aerogeofísica aplicada à compreensão do sistema de empurrão da Sequência Santa Terezinha de Goiás, Brasil Central**. Dissertação. Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- SOUZA, L. A. P. **Revisão Crítica da Aplicabilidade dos Métodos Geofísicos na Investigação de Áreas Submersas Rasas**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- SOUZA, B. P.; CASTILLO, L. A.; COSTA, S. S.; SALAZAR, S. P.; VARGAS, G. C. Geomorfologia e Tectono-estratigrafia do Neógeno do setor noroeste da Bacia Vaupés-Amazonas. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, 23(4), 1911–1928. (2022). <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i4.2154>.
- TASSINARI, C. G. C.; MACAMBIRA, M. J. B. Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. **Episodes**, v. 22, n. 3, 1999, p. 174-182.
- THERY, J.M. **Constitution du Nord-Quest du continent Suramericain avant les tectoniques Andines**. Tese - Université de Bourdeaux II, 1982, p. 1-100.
- THOMPSON, D.T. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. **Geophysics**. V. 47, n.1, 1982, p. 31-37.
- VECI, L.; BRAUN, A. **Sentinel-1 toolbox: SAR Basics Tutorial**. ESA. 2021.
- VESGA, C.; CASTILLO, L. Reconocimiento geológico y Geoquímica preliminar del Río Guaviare, entre la confluência con los ríos Ariari e Iteviare. **INGEOMINAS**, n. 1631, No publ. Bogotá, 1972, p. 1-180.

ANEXO

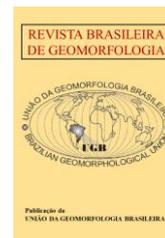


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 23, n° 4 (2022)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i4.2154>



Artigo de Pesquisa

Geomorfologia e Tectono-estratigrafia do Neógeno do setor noroeste da Bacia Vaupés-Amazonas

Geomorphology and Tectono-stratigraphy of the Neogene of the northwest sector of the Vaupés-Amazonas Basin

Beatriz Pinheiro de Souza¹, Luis Antonio Castillo López¹, Solange dos Santos Costa¹, Sonia Patricia Salazar², German Vargas Cuervo³

¹ Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Geociências, Manaus, Brasil. bpinheiro.ufam13@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1093-3739>

¹ Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Geociências, Manaus, Brasil. luiscastillo@ufam.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4872-3219>

¹ Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Geociências, Manaus, Brasil. solangecosta@ufam.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3262-7126>

² Consultora, Bogotá, Colombia. soniape@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8286-0834>

³ Universidad Nacional de Colombia Departamento de Geografía, Bogotá, Colombia. gvargasc@unal.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2489-3993>

Recebido: data; Aceito: data; Publicado: data

Resumo: A utilização de métodos geofísicos nas geociências, para estudos de superfície e subsuperfície na região amazônica, podem contribuir para o conhecimento sobre a geometria e disposição tridimensional das camadas de rocha localizadas a centenas de metros de profundidade. A integração de dados de superfície e de subsuperfície, abrange análises de estruturas geomorfológicas ainda não descritas na área. Neste estudo, o uso de seções sísmicas e de perfis de poço possibilitaram a geração de um modelo geológico em profundidade. As evidências geomorfológicas e tectono-estratigráficas na área foram obtidas a partir da avaliação sismoestrutural (falhas e dobras) e as sismoestratigráfica (canais, barras, vales, erosões e adelgaçamento de camadas). Com base nessas evidências, foi sugerido a ocorrência de feições associadas a cânions e vales, oriundos da reativação rúptil de estruturas preexistentes no embasamento Pré-cambriano. Além disso, são encontradas evidências de rochas pertencentes a depósitos com idades do paleógeno até o recente, bem como registro de sedimentação resultante da acreção lateral, erosão e adelgaçamento, influenciados por processos de subsidência e isostasia. Tais evidência podem ser relacionadas com a evolução do Alto do Vaupés, que ocorre devido a falhamentos do paleozóico inferior, que sofreram reativação, com episódios tectonoestratigráficos associados.

Palavras-chave: Amazônia; Bacia Vaupés-Amazonas; Cânions; Geomorfologia Sísmica.

Abstract: Using geophysical methods in geosciences for surface and subsurface studies in the Amazonas can contribute to the knowledge about the geometry and tridimensional disposition of layers located some hundreds of meters in depth. An integrating surface and subsurface data cover the analysis of structures geomorphological not yet described in the area. This study's seismic sections and well logs enabled in-depth preliminary model generation. Seismic and well data permits obtaining features like faults, canyons, and folds. Other geomorphological structures include channels, bars, valleys, erosions,

and thinning of layers. Geomorphologic features obtained from analysis and geometry characterization make it possible to delight and describe faults and folds' presence, also delighted canyons of different sizes and valleys from the brittle reactivation of pre-existing structures in the Precambrian basement. Features like Lateral accretion, erosion, and thinning, influenced by processes of subsidence and isostasy, were found. The sedimentary sequences established in this framework belong to deposits with ages from the Paleogene to the Recent. This evidence may be related to the evolution of Alto do Vaupés, which occurs due to faults from the Lower Paleozoic, which underwent reactivation during the Paleogene to the recent, with associated tectonostratigraphic episodes.

Keywords: Amazon; Vaupés-Amazonas Basin; Canyons; Seismic Geomorphology.

1. Introdução

As bacias sedimentares da Amazônia (Solimões, Vaupés-Amazonas, Amazonas, dentre outras) são extensas e necessitam de atenção devido as suas posições geográficas, ambientais, hidrológicas e paleogeográficas, além de seus potenciais recursos minerais e petrolíferos (KROONENBERG; REEVES, 2011; BAKER et al., 2015).

No Brasil, essas áreas localizam-se em regiões de difícil acesso, densa cobertura vegetal e pouca infraestrutura, dificultando o uso de métodos diretos para avaliação geológica dessas regiões. Na Colômbia, essa realidade não é diferente, as bacias sedimentares são menos conhecidas nas regiões de fronteira, principalmente no que diz respeito à sua geometria, sua estruturação interna e feições geomorfológicas. Dessa forma, faz-se necessário o uso de métodos indiretos, como a sísmica de reflexão e perfis geofísicos de poços, para realizar investigações com dados de subsuperfície.

Estudos geológicos e geomorfológicos são comumente baseados em imagens ópticas e de radar com ampla cobertura na Amazônia Colombiana (IGAC, 1999; GALVIS; GÓMEZ, 1998; VARGAS, 2011; VARGAS, 2017). Regularmente, os estudos da Bacia Vaupés-Amazonas apresentam poucas informações de subsuperfície. As pesquisas existentes são de escalas regionais (CINTRA; OLIVEIRA, 2014; CAPUTO; SOARES, 2016), com foco na geomorfologia (KHOBZI et al., 1980), mineração (RODRIGUEZ et al., 2013; LÓPEZ; CRAMER, 2012; LÓPEZ, 2012), paleogeografia (WINEMILLER; WILLS, 2011) e superfície (HOORN, 1993; LEITE, 2006; CAPUTO; SOARES, 2016; D'APOLITO, 2016; ALBERT; VAL; HOORN, 2018). Pesquisas de subsuperfície realizadas na região são focadas na análise das camadas mais profundas de caráter regional, com o objetivo de identificar e definir a capacidade prospectiva de hidrocarbonetos da região (KROONENBERG; REEVES, 2011; GARCIA; CRUZ; MIER, 2013). Com isso, os estudos geológicos das camadas mais rasas, como as feições geomorfológicas do Neógeno, são subutilizados, visto que não são considerados, para análise de tal finalidade prospectiva, pois se encontram nos primeiros quilômetros de profundidade.

Tendo em vista o exposto acima, este trabalho visa apresentar novas informações a respeito da estrutura geomorfológica e tectono-estratigráfica das camadas mais rasas, de idades Neógenas, da Bacia Vaupés-Amazonas, baseado em dados geofísicos. Esses dados incluem interpretações de seções sísmicas de reflexão, amostras de calhas e perfis geofísicos de poços, os quais permitem evidenciar a disposição do pacote sedimentar nas camadas superiores. Nessas sequências foram identificadas feições características de cânions de diferentes portes, além de feições como estruturas de canais, acreção lateral, adelgaçamento de camadas, acamamento horizontal, *onlaps*, truncamentos, estruturas erosionais e *scours*. Estas evidências estão relacionadas com a evolução do Alto do Vaupés, que ocorre desde o Paleógeno até o recente, com episódios tectono-estratigráficos associados.

2. Contexto Geológico e Geomorfológico da Bacia Vaupés-Amazonas

A área de estudo está localizada na porção sudeste da Colômbia, próximo à fronteira com o Brasil, dentro dos departamentos de Vaupés, Guaviare e Caquetá, e são banhados pelos rios Uaupés, Inirida, Querari, Papuri e Macaya/Apaporis (Figura 1). Essa região consiste na Amazônia Colombiana, uma área com densa cobertura de floresta tropical, pouco povoada, principalmente composta por grupos indígenas (KROONENBERG; REEVES, 2011). Nessa região encontra-se a Bacia Sedimentar Vaupés-Amazonas (GARCIA; CRUZ; MIER, 2013). Esta é uma das bacias intracratônicas mais extensas da América do Sul. Esta bacia limita-se a oeste com o Alto Rio de Yará e o Arco de Iquitos e a leste com o Complexo Migmatítico de Mitú e o Granito de Parguaza (GÓMEZ et al., 2017).

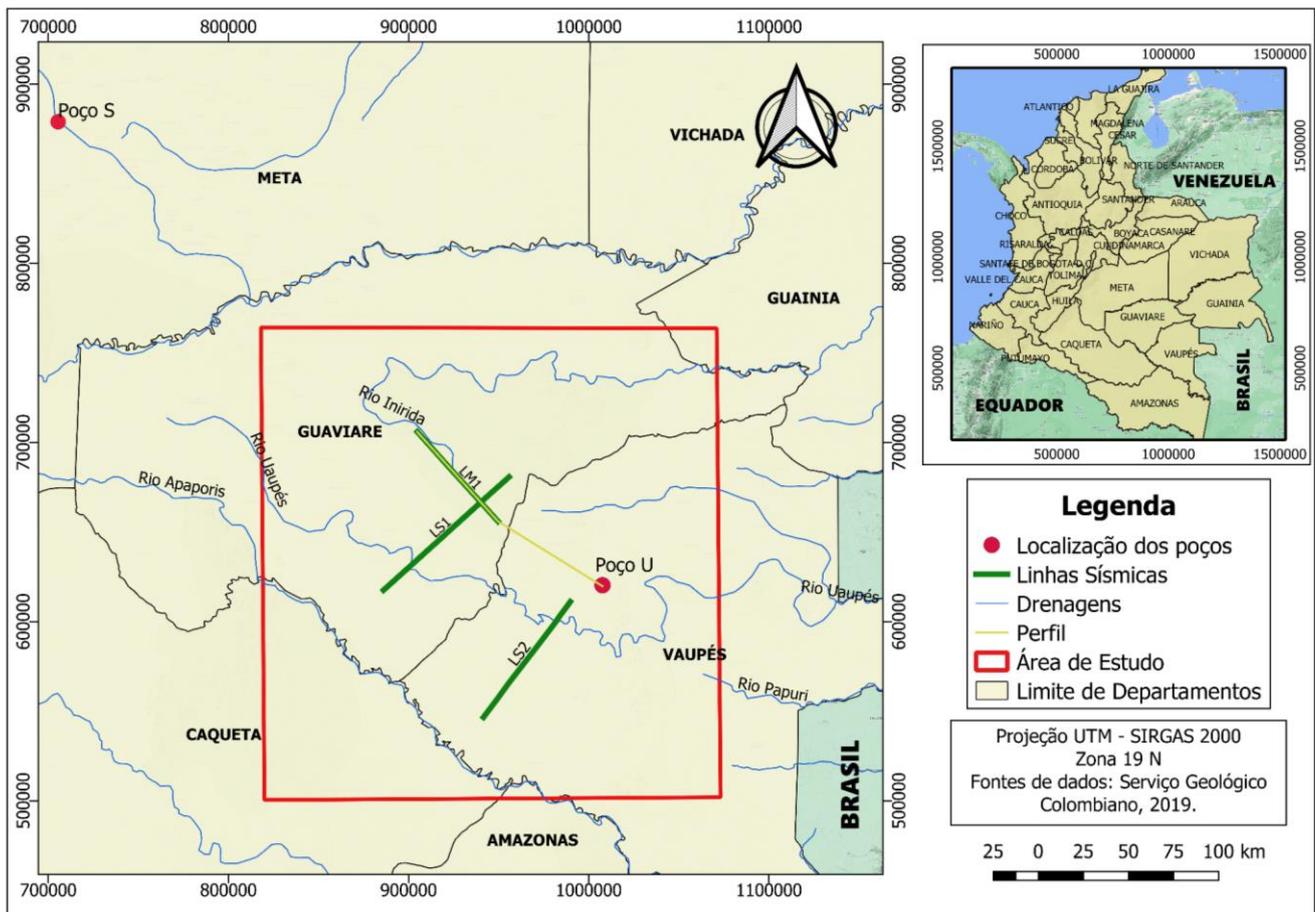


Figura 1. No canto superior direito, temos o mapa de localização regional da área de estudo. A área está situada na porção sudeste da Colômbia, próximo da área de fronteira com o Brasil, dentro dos limites dos departamentos Vaupés, Guaviare e Caquetá. E no mapa em destaque, temos a localização dos principais rios da área de estudo, os dados utilizados nesta pesquisa (linhas sísmicas e poços), bem como a delimitação da área de estudo.

Geologicamente, a área é composta por rochas de origem ígnea e metamórfica do embasamento cristalino do Crátom Amazonas que são cobertas parcialmente por Depósitos Quaternários (Figuras 2 e 3). Essas rochas mais antigas, localizadas no sudeste da Colômbia, correspondem às rochas do embasamento da província Rio Negro, representadas nessa área pelo Complexo de Mitú, que no Brasil são correspondentes às rochas do Complexo Cauaburi (TASSINARI; MACAMBIRA, 1999; CELADA et al., 2006; LÓPEZ et al., 2007; RODRÍGUEZ et al., 2011; LÓPEZ; CRAMER, 2012). Este complexo é constituído por gnaisses quartzo feldspático, migmatitos, anfibolitos com estruturas migmatíticas e granitóides com afinidade alcalina a cálcio-alcalina, com idades de U-Pb SHRIMP e Sm-Nd que variam entre 1.580 Ma a 1.520 Ma (CORDANI et al., 2016; TASSINARI et al., 1996; CELADA et al., 2006). Sobreposto às rochas deste complexo, estão as rochas da Formação Piraparaná, que é caracterizada por uma sequência dobrada de rochas vulcanosedimentares avermelhadas que apresentam mergulho para oeste (GALVIS; HUGUETT; RUGE, 1979). Estas rochas afloram em um arco na catarata Yaca-Yaca, no Alto de Carurú, nos rios Vaupés e Piraparaná ao sul e em trechos do rio Caquetá. As rochas da Formação Piraparaná formam mesetas não contínuas que apresentam uma tendência N-S (GÓMEZ et al., 2017). Esse pacote vulcanosedimentar não ultrapassa os 80 metros de espessura, é composto por derrames de lava riodacítica na base e depósitos piroclásticos misturados com conglomerados polimíticos e areia arcoseana que em direção ao topo é transformada em quartzo arenito. Dados preliminares de datação isotópica de Rb-Sr datam essa formação em 1.200 Ma (PRIEM et al., 1982). Dentro da área de estudo também está localizado um corpo máfico não metamorizado constituído por um dique de gabro, no entanto a datação desse corpo não pode ser confirmada sem dados adicionais pois dentro dos 15 corpos intrusivos básicos que ocorrem dentro da bacia, apenas cinco foram datados obtendo a idade de 826 Ma por K-Ar. Essas idades estariam correlacionadas com na mesma faixa de idades dos diques de diabásio de 900 Ma e as lavas de 920 Ma de Yaca-Yaca (KROONENBERG; REEVES, 2011).

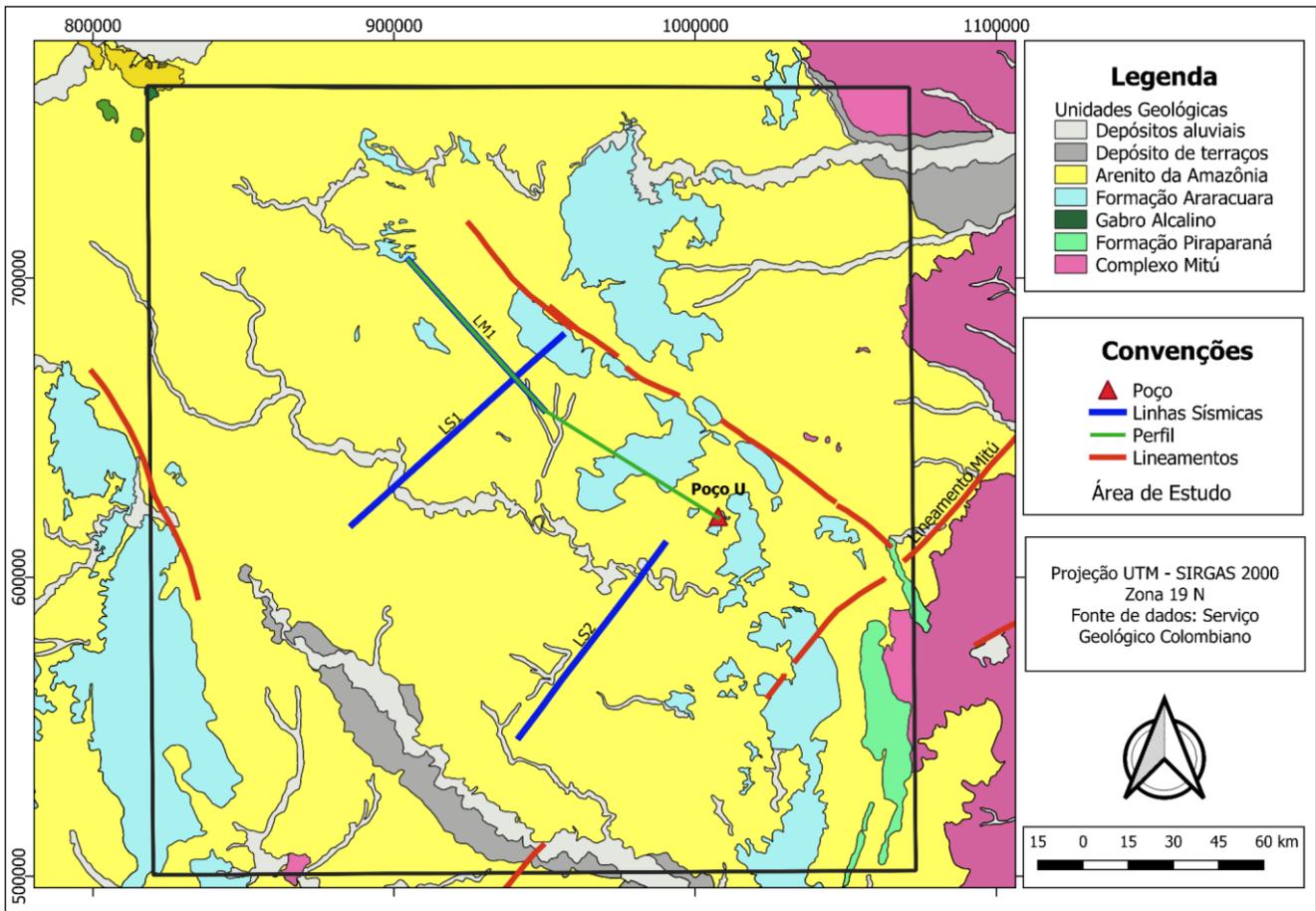


Figura 2. Mapa geológico-estrutural da porção noroeste da Bacia Vaupés-Amazonas, com destaque para os lineamentos representados na cor vermelha, bem como a localização das linhas sísmicas, o poço e a direção do perfil. Fonte: Modificado de Gómez et al. (2017).

As rochas sedimentares do Paleozóico são representadas pela Formação Araracuara que é composta por uma sequência de rochas predominantemente arenosas. As rochas dessa formação são representadas por duas grandes faixas de planalto alinhadas e descontínuas na direção norte-sul, mergulhando para oeste, que cobrem as rochas do Complexo Mitú e Formação Piraparaná, além de ser intrudida pelo Sienito Nefelínico de São José del Guaviare. Sua estratigrafia é composta por conglomerados na base, em contato com o Complexo Mitú, arenitos com granulação média, intercalações de argilitos e siltitos e mais próximo ao topo predomina areia com presença de conglomerados intraformacionais. Sua espessura varia entre 80 m e 100 m e é identificada por estratificação cruzada. Segundo Celada et al. (2006), dados paleontológicos confirmam a idade do Ordoviciano Inferior a Médio e origem marinha. Segundo Baldis (1988), a Formação Benjamin Constant da Bacia do Solimões, localizada próximo a Letícia, estaria correlacionada com a Formação Araracuara, devido a influência da presença de um corredor marinho contínuo que conectava as duas bacias.

Os Depósitos Cenozóicos são compostos por arenitos eólicos, terraços lateríticos, crostas ferruginosas e sedimentos aluviais recentes que cobrem a área. O Arenito da Amazônia (Figura 2), denominado informalmente de “Terciário Superior Amazônico” por alguns autores, identificado apenas como N1Sc nos mapeamentos dos arenitos da amazônia colombiana, cobre a parte ocidental da Bacia Vaupés-Amazonas e é composto por conglomerados e arenitos pouco consolidados com matriz ferruginosa e argilosa de idade do Mioceno (GALVIS; HUGUETT; RUGE, 1979). Segundo IGAC (1999), os Depósitos de Terraços são compostos por sedimentos antigos das planícies aluviais que foram dissecados durante o período de estabilidade das correntes. São compostos de cascalho fino, areia grossa e argila e sua idade provável é do Pleistoceno. Os depósitos não consolidados de origem fluvial correspondem a grandes depósitos formados pelos rios atuais, nas áreas de planície de inundação, devido ao processo de depósitos laterais (barras laterais), são constituídos principalmente por areia e argila.

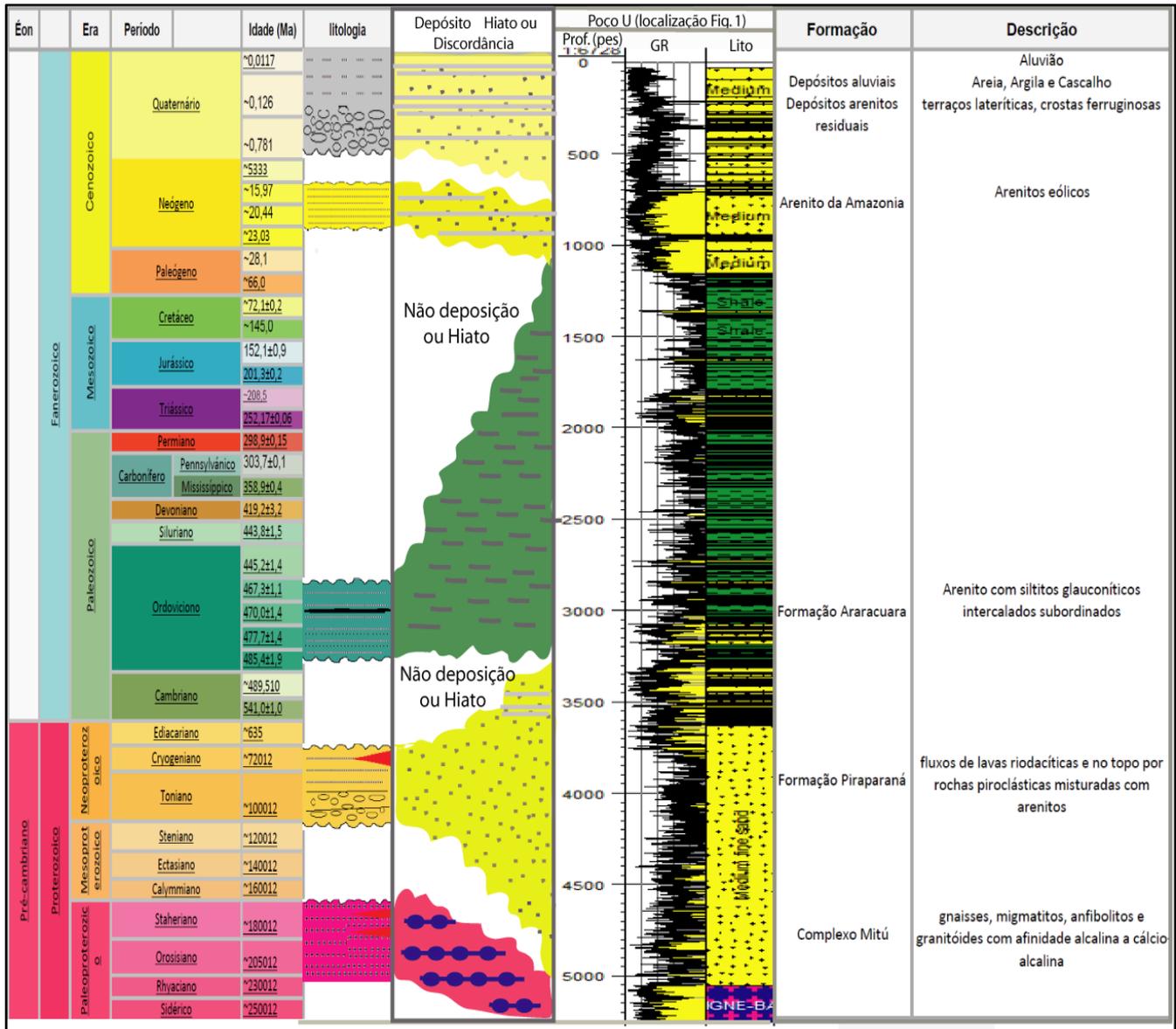


Figura 3. Coluna cronoestratigráfica da porção noroeste da Bacia Vaupés-Amazonas, com ênfase na identificação e descrição das unidades geológicas presentes. Em adição, são apresentados os dados obtidos pelo perfil de Raio Gama (GR) do poço U e as principais discordâncias encontradas na área de estudo.

As rochas Paleozóicas estão sobrepostas a um embasamento de rochas do Pré-cambriano, separados por altos estruturais, deslocando blocos e com registros de reativações neotectônicas (BAKER et al., 2015). Um desses altos corresponde à área de estudo, conhecido como Arco do Vaupés (VA), como mostra a Figura 4, o qual apresenta grande influência na geomorfologia da região, especialmente nas direções de drenagens, na incidência dos sedimentos e na proveniência dos depósitos sedimentares. Essa feição é descrita como um alto estrutural de baixo relevo, que forma a bacia intracratônica Vaupés-Amazonas, que além de separar as bacias Vaupés-Amazonas e de Llanos, ela divide os paleorios Amazonas e Orinoco em duas drenagens separadas, com o Orinoco em sentido N-NE e o Amazonas para E (IBAÑEZ-MEJIA, 2010; ECHEVERY; GALLO, 2015; ALBERT; VAL; HOORN., 2018). A geometria e idade de formação do Alto do Vaupés ainda estão em discussão, no entanto, alguns estudos sugerem que essa feição data de 8 a 10 Ma, com uma rede de drenagens, dividindo o limite sudoeste da extensão da Bacia dos Llanos (WINEMILLER; WILLIS, 2011). Outras pesquisas estabelecem este arco ao Mioceno Médio, concomitante ao soerguimento dos Andes (CAPUTO; SOARES, 2016).

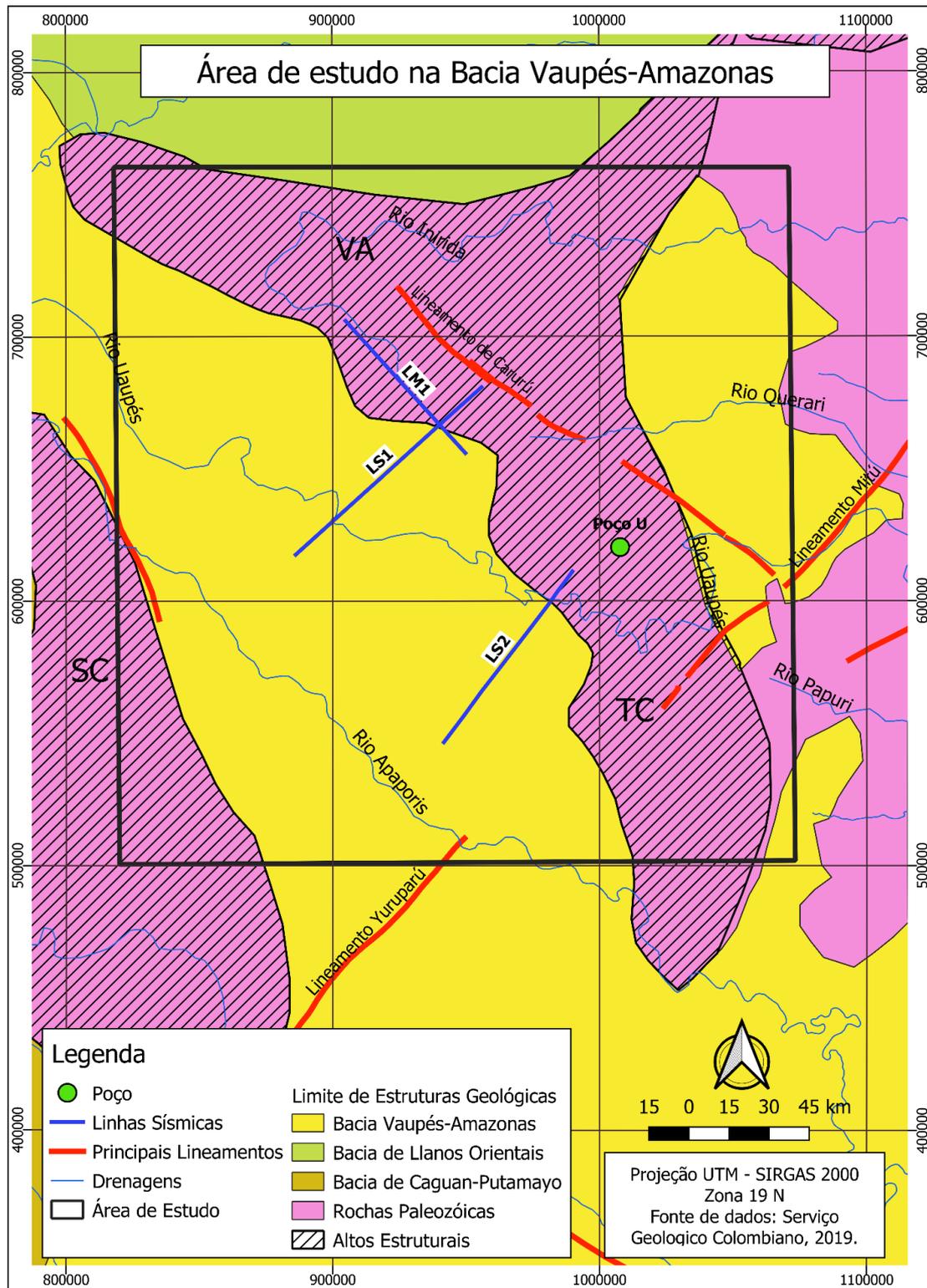


Figura 4. Localização da área de estudo na região da Bacia Vaupés-Amazonas. Em destaque são observados os lineamentos Carurú, Mitú e Yuruparí (em vermelho), os rios que banham a área, bem como as delimitações das bacias adjacentes e as rochas Paleozóicas aflorantes. Nos limites direito e esquerdo da bacia, temos os altos estruturais Alto do Vaupés (VA), Serra de Chiribique (SC) e o Alto de Carurú (TC) (Modificado de GARCIA; CRUZ; MIER, 2013).

A evolução geológica da região da Bacia Vaupés-Amazonas durante o Cenozóico foi provavelmente influenciada pela Orogenia Andina, devido à reativação de uma rede de lineamentos regionais de idades Pré-cambrianas. Esses lineamentos têm direção preferencial em duas direções sendo a primeira NNE-SSW e a

segunda NW-SE (GALVIS; HUGUETT; RUGE, 1979; GARCIA; CRUZ; MIER, 2013) e sua compreensão é de suma importância para o entendimento da geomorfologia e geologia das bacias amazônicas. A densa cobertura vegetal, da zona sudeste da Colômbia, cobre os afloramentos e dificulta a identificação das características estruturais da superfície, embora alguns lineamentos sejam identificados de forma regional, devido estes afetarem a cobertura sedimentar e controlarem a direção das redes de drenagem da área.

Algumas feições estruturais mapeadas na área de estudo controlam os canais dos rios, como os rios Inírida e partes do setor do rio Vaupés, por exemplo, que sofrem influência do Lineamento Carurú, que apresenta um rumo aproximado de N30°W. Esse lineamento consiste em um registro marcante de escarpas presentes nas mesas bem definidas da Formação Araracuara, que estão situadas fora da área de estudo (DE BOORDER, 1980; CELADA et al., 2006). Ao sul da área, apresentam-se outros lineamentos com rumo aproximado de N30°W que controlam as partes altas dos rios Caquetá e Apaporis. O Lineamento Mitú e o Yuruparí com rumo aproximado N40°E afetam rochas sedimentares Ordovicianas e vulcanossedimentares da Formação Piraparaná (Figura 4), de idade Proterozoica, sendo claramente identificáveis ao nível regional e local.

3. Materiais e Métodos

A integração de métodos e ferramentas geológicas e/ou geofísicas, de superfície e subsuperfície, para o mapeamento de feições estruturais, estratigráficas ou geomorfológicas têm sido fortalecidas com o advento da tecnologia, disponibilidade de maior capacidade computacional e de implementação de módulos de modelagem e interpretação. Desta forma, a utilização de sísmica de reflexão e perfis geofísicos de poço, permite gerar modelos aproximados da disposição geomorfológica das camadas rochosas (CAPUTO; SOARES, 2016). Neste trabalho, foram integrados dados de perfil de poço, sísmica e dados de superfície para estabelecer a disposição espacial das unidades geológicas em subsuperfície, na procura de identificar feições estratigráficas, estruturais e, no possível, geomorfológicas.

Na área de estudo, estão presentes três linhas sísmica 2D, oriundas do banco de Informações Petroleiras da Agência Nacional de Hidrocarburos (ANH), que abrangem cerca de 240 km de linhas migradas pós-empilhadas, bem como dados de amostras de calha e perfis geofísicos (raio gama, sônico e densidade) de um poço. Os dados foram visualizados, analisados e integrados usando os *softwares* OpendTect e *script* de *Python*, considerando as ferramentas e técnicas modernas de geologia e de computação apropriadas para esses tipos de avaliações. Além desses dados, também foram realizadas revisões de mapeamento e geoquímica preexistentes (GALVIS; HUGUETT; RUGE, 1979; KROONENBERG; REEVES, 2011; CELADA et al., 2006), incluindo dados sísmicos e registros de poços. Os dados do poço U, que estão localizados a cerca de 20 km da seção mais próxima aproximadamente 80 km da seção seguinte, foram analisados e suas informações, tais como litologia, limite de contato de pacotes sedimentares distintos e resposta do perfil de raio gama, foram correlacionadas e amarradas com as linhas sísmicas em profundidade através de uma projeção, na qual foi obtido uma imagem de subsuperfície, as quais com técnicas de interpretação sismoestratigráfica e sismoestrutural foram possíveis gerar um modelo do arcabouço tectono-estratigráfico e geomorfológico da área.

Para caracterizar o arcabouço tectono-estratigráfico da Bacia Vaupés-Amazonas foi necessário definir as técnicas e processos utilizados para as análises de dados: estratigrafia sísmica e estratigrafia. Assim, os dados sísmicos 2D e sua interpretação sismoestratigráfica, onde tem-se melhor resolução (no setor do Neógeno) está condicionada às velocidades, litologia, estratigrafia, e geoformas que são parâmetros chaves para caracterizar a imagem de subsuperfície. Foi necessário realizar o ajuste, incluindo interações como: análises geofísicas (poços e sísmica), análises estratigráficas (testemunhas, afloramento ou amostragem) e integração dos resultados nas técnicas empregadas.

A utilização de dados geofísicos requer o entendimento da resposta da rocha a diferentes características ou parâmetros físicos, além de considerar os limites pela qualidade das seções sísmicas utilizadas para as análises. Fazendo uso dos dados geofísicos, considerando o limite de detecção e de resolução que podem alcançar até 45m no caso das linhas sísmicas e de alguns centímetros nos poços, foi realizada a preparação, otimização e melhora da qualidade das imagens, onde tais procedimentos incluem a determinação da aplicação de filtros, análises de atributos, velocidades, conversão ou alteração de domínio (frequência ao espaço ou temporal e espacial). Estas análises auxiliam na integração (amarração) sísmica-poço, processo prévio às análises ou interpretação, assim os dados do registro de *Checkshot* (Tabela 1), ajuda na conversão dos dados ao domínio da profundidade, isto considerando as velocidades intervalares, além de apresentar outra informação como as velocidades de

processamento sísmico. As velocidades de processamento constituem dados que possibilitam a geração de um modelo ou função de velocidade intervalar considerando os dados de velocidades e tempo. Com isso é possível determinar a profundidade, isto para as seções sísmicas correspondentes. Tais dados são obtidas considerando aproximações clássicas (DIX, 1995) e para obter as velocidades intervalares é usada a Equação 1, como mostra a seguir:

$$V^2_{Interv} = \frac{V^2_{i+1} * t_{i+1} - V^2_i * t_i}{t_i - t_{i+1}}, \tag{1}$$

onde:

V^2_{interv} = velocidade do intervalo;

t_1 = tempo de viagem para o primeiro refletor;

t_{i+1} = tempo de viagem para o segundo refletor;

V^2_i = velocidade da raiz quadrada (V_{rms}) média para o primeiro refletor;

V^2_{i+1} = velocidade da raiz quadrada (V_{rms}) média para o segundo refletor.

Sendo V_i e t_i as velocidades RMs e os tempos i -ésimos do processamento das camadas superior e a seguinte, com as quais se define a espessura (E) aproximada:

$$E = \frac{V_{interv} * 2 * (Z_i - Z_{i+1})}{t_i - t_{i+1}}, \tag{2}$$

onde:

E = Espessura da camada;

V_{interv} = velocidade do intervalo;

t_1 = tempo de viagem para o primeiro refletor;

t_{i+1} = tempo de viagem para o segundo refletor;

Z_1 = profundidade média do primeiro refletor;

Z_{i+1} = profundidade média para o segundo refletor.

Com Z_i e t_i como as profundidades e tempos para os intervalos i -ésimos das camadas i -ésimas, respectivamente.

Com base nessas informações, a amarração dos dados foi crucial para realizar a análise em conjunto com as feições de discordância, horizontalidade, continuidade lateral, terminação das feições identificadas nas linhas sísmicas juntamente com a litologia descrita nas amostras de calha e dos dados das respostas dos perfis geofísicos de raio gama. Baseado nesses dados foi possível estabelecer uma aproximação da geologia da área, podendo-se definir a presença de unidades do Paleógeno e Depósitos do Quaternário, relacionados a solos residuais arenosos, sedimentos fluviais e de planícies de inundação nos vales, bem como rochas cristalinas, tanto ígneas quanto metamórficas, devido à disposição dos grandes contrastes observados nas seções sísmicas.

Tabela 1: Parâmetros do registro de disparo (*checkshot*) empregado para a geração do modelo de velocidades e para conversão à profundidade de superfícies, horizontes, falhas e da informação sísmica.

Profundidade do Kelly Buch (m)	Tempo (us)
152	37.73
329	76.01
448	103.26
573	126.62
685	153.18
804	179.76
923	205.36
1082	241.65
1200	267.69

Fonte: Adaptada de Schlumberger (1989).

Os dados sísmicos disponíveis apresentam elementos espúrios, os quais mascaram os eventos, tais como imagens com reflexões fora do plano, queda do cobrimento, sem reflexões, difrações (*bow ties*), sub-migração, pouco colapso dos eventos. Para uma melhor visualização e análise dos dados sísmicos foram feitas previamente análises de atributos, típicos para o entendimento da sísmica, onde se incluem: atributos de processamento, estratigráficos, estruturais e geomorfológicos. Alguns requerem análises especiais, por exemplo, as técnicas de *rendering* e a de pseudo-relevo ou Volume de Atributos (TECVA). O *rendering* permite estabelecer as reflexões e o segmento ao longo de toda a seção. Este último consiste em identificar a Sismo Camada Elementar (SCE) ou camadas de maior frequência definida como atributo TECVA (BULHÕES; NOGUEIRA, 2005; SILVA, 2016). A técnica TECVA, é uma análise multiatributo, corresponde ao RMS (*Root Mean Square*), remoção da deconvolução (remove bias) e rotação de 180° (*fase shift*), para ressaltar feições estruturais, estratigráficas ou geomorfológicas (DGB, 2020).

4. Resultados

4.1. Assinatura Sísmica da Unidade Vaupés Amazonas

O ajuste dos dados foi baseado nas informações obtidas dos perfis e registros de poço. Previamente a análise das imagens sísmicas, foi realizada análises dos perfis geofísicos, bem como a perspectiva da sua correlação na seção sísmica com o poço U (Figuras 5 e 6), considerando os perfis de raios gama e litologias, que mostram a predominância da presença de arenitos e folhelhos.

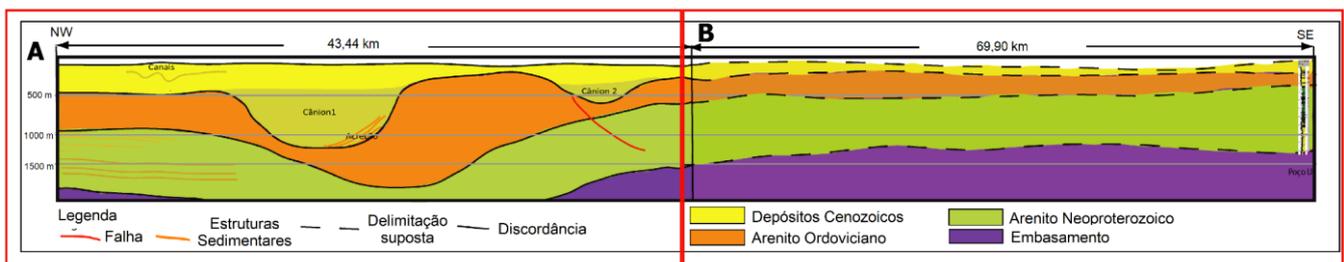


Figura 5. Correlação litoestratigráfica baseada nas respostas dos refletores da seção sísmica LM1 e a projeção dos limites de camada até os dados do perfil geofísico do poço U.

Segundo as informações dos perfis de poços, o embasamento cristalino compreende as rochas ígneas, identificadas na porção inferior do poço U, na profundidade de 1.570m. A partir dessa correlação é sugerido que ocorra um adelgaçamento das camadas da bacia no setor Noroeste.

Ao analisar as seções sísmicas foram identificados os refletores que mais se destacavam, a presença de feições contínuas e descontinuidades, bem como os padrões dessas descontinuidades. Ao correlacionar as informações prévias das seções sísmicas com as informações do perfil de raio gama de poço com o auxílio das descrições das amostras de calha, foi possível amarrar as informações na mesma unidade de medida. A sua identificação foi baseada primeiramente na descrição litoestratigráfica no poço, onde tem se os marcadores, além disso, são consideradas as características intrínsecas e geométricas das sismofácies, onde são consideradas as características primárias, próprias do refletor sísmico (amplitude e frequência), dos quais se seguem outras como continuidade, coerência e rugosidade. Estes parâmetros são baseados no traço e também nas relações que ocorrem entre os traços na qual permitem estabelecer as geometrias, como por exemplo, as terminações ou truncamentos entre refletores que possibilitam a determinação dos horizontes associados a discordâncias. Diante disso foi possível identificar cinco horizontes bem definidos.

O primeiro deles foi identificado como o embasamento devido seu padrão de reflexão ser um dos refletores mais marcantes da linha sísmica. Este pacote é caracterizado pela ausência de reflexões ou formas irregulares descontínuas na porção inferior da camada, o que contrasta com as unidades sedimentares situadas logo acima. Além do embasamento foram delineados nas seções os horizontes superiores, correspondentes às diferentes sismofácies dentro dos pacotes sedimentares. Estes foram definidos a partir da geometria, feições de truncamento dos refletores e expressões típicas das geoformas, como no caso dos cânions, canais e preenchimentos. O segundo e o terceiro horizontes rastreados apresentam características de refletores semelhantes com direção plana paralela, cortados por um plano de falha e com terminações truncando as camadas, tanto superior quanto inferior. A sua

separação em dois pacotes se deu a parte de um refletor com traço sísmico contrastantes com os refletores adjacentes, indicando que aquela era uma área de contraste na estrutura do pacote rochoso. O quarto horizonte, apesar de conter dentro da sua geometria feições planas paralelas, é marcado por respostas de refletores que apresentam formas muitas rugosas e irregulares ao longo da sua continuação, com terminações interrompidas registrando o truncamento das camadas. O último horizonte é composto por refletores planos paralelos que cobrem todo o pacote sedimentar registrado pelas assinaturas sísmicas. Na região dos vales do horizonte quatro, os traços sísmicos representam o tipo de truncamento de base *onlap*, com característica na lateral do vale que indicam um acúmulo de material naquele trecho, o que foi interpretado como área de acreção lateral. O refletor de limite dessa geometria é caracterizado pela baixa rugosidade do horizonte e com refletores que caracterizam que esta camada mais rasa cobre de forma homogênea toda a área mapeada.

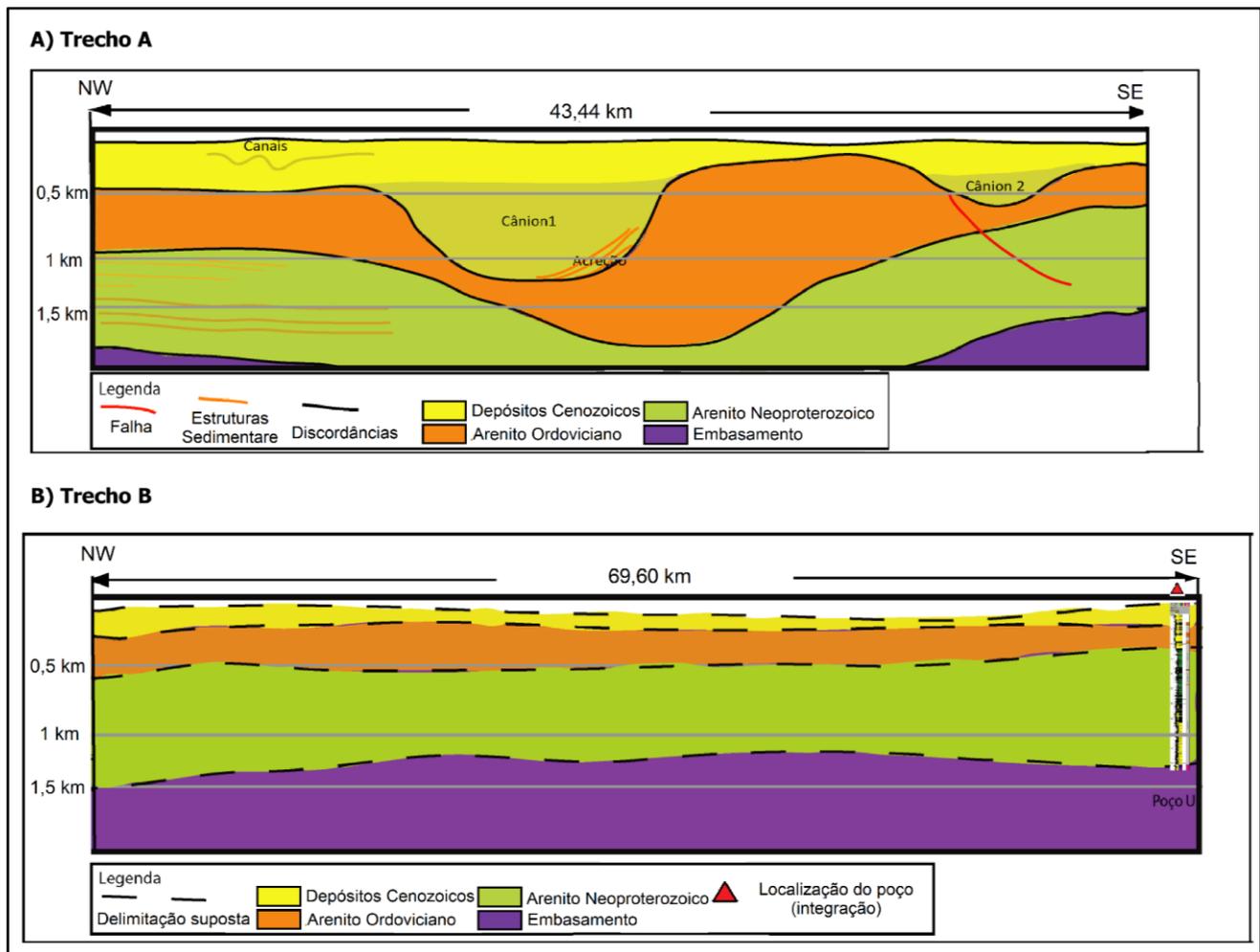


Figura 6. Detalhes da figura 5. No trecho A, temos o esboço esquemático do detalhamento dos primeiros 43 km da seção sísmica tendo as limitações da litoestratigrafia baseada nas respostas das características físicas do pacote rochoso identificados pela seção sísmica 2D, onde os refletores contrastantes associado a discordância dos refletores seguintes foram definidos como o limite das unidades geológicas presentes. E no trecho B, temos a projeção da continuidade desse arcabouço sedimentar sendo, ao longo do intervalo de aproximadamente 70 km, até a conexão com os dados do poço U. As escalas verticais das seções registradas ao longo do trabalho estão em profundidade, com exagero vertical de 6 vezes.

4.2. Feições geomorfológicas

Após o tratamento dos dados e a realização da análise dos dados sísmicos, como os de pseudo-relevo, foi possível dar destaque para algumas feições registradas nas linhas sísmicas. A primeira superfície a ser definida foi a do embasamento, como mostra o contorno em vermelho traçado nas três linhas sísmicas (Figura 7). Essa

superfície é destacada pela presença do Alto de Vaupés, que é demarcado por falhamentos normais, resultado da tectônica distensiva cujas superfícies de falha se apresentam no detalhe em vermelho na Figura 8.

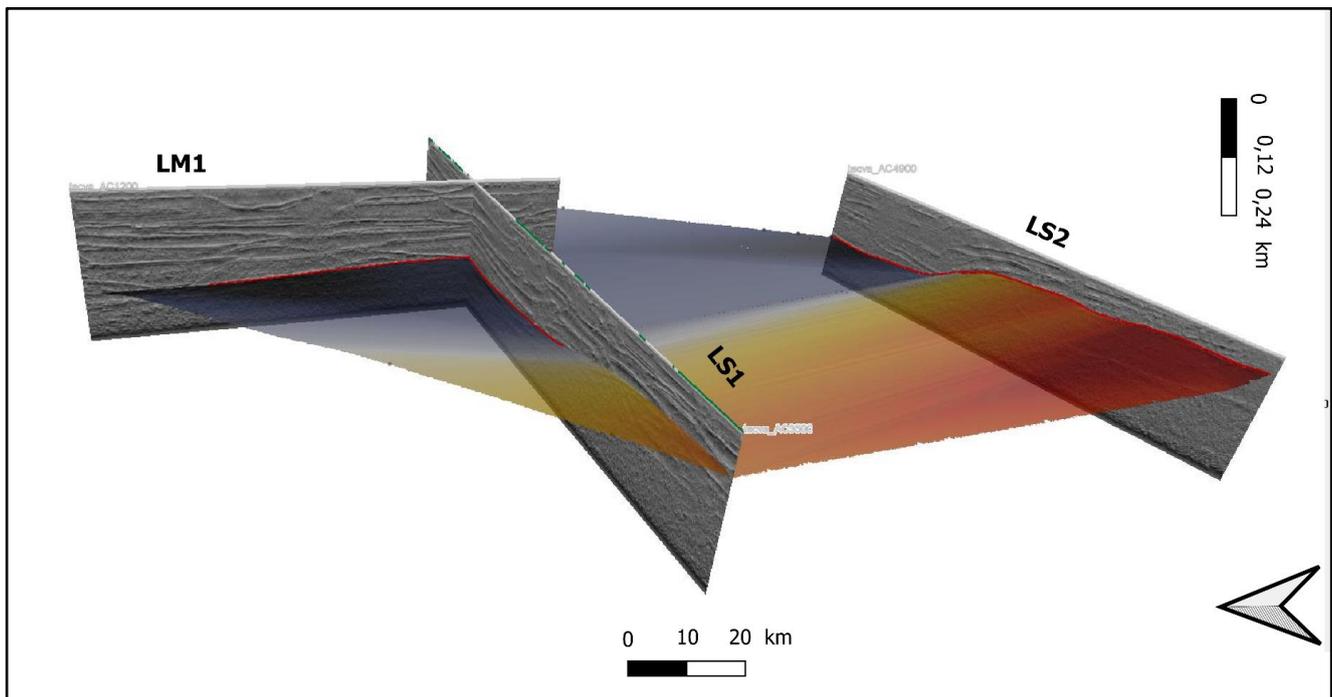


Figura 7. Nesse esquema temos o horizonte, linha em vermelho, traçado nas linhas sísmicas e a superfície gerada a partir desse horizonte na qual foi identificado como sendo o topo do embasamento. A escala vertical das seções apresentadas neste artigo esta em profundidade.

Na região mais rasa, ao traçar um horizonte e fazer a sua interpolação de superfície, é destacado a forma externa do cânion 1, que de acordo com a escala, mede aproximadamente 16 km de comprimento e média de 380 m de profundidade (Figura 8). Esta feição é caracterizada por uma concavidade homogênea pouco angulosa, bastante arredondada, denotando a maturidade erosional do mesmo. Na sua lateral direita é possível identificar feições e terminações dos refletores que indicam que houve preenchimento lateralmente ao longo do tempo e seu talvegue é pouco pronunciado e estendido lateralmente (Figura 9).

Essas feições, definidas na porção rasa dos dados sísmicos, permitem evidenciar os efeitos da erosão, sendo possível a delimitação das discordâncias que podem ter sido geradas possivelmente por quedas eustáticas ou processo de subsidência, incluindo processos de exposição subaérea ou a não deposição de sedimentos, bem como erosão causada por uma drenagem. Além de feições de destaque, como o cânion 1, os níveis superiores também estão caracterizados por feições erosivas mais discretas, de menores extensões, medindo algumas centenas de metros de comprimento, e com menores profundidades, possuindo refletores dentro da geometria da camada com estrutura dos refletores de forma paralelas. Os pacotes sedimentares mais profundos, localizados entre o horizonte interpretado como a base do Neógeno até o embasamento, não foram analisados neste estudo, devido à presença de muitos ruídos oriundos do processamento os quais mascaram o sinal. Além disso, esses horizontes não consistem nas feições de interesse desse estudo: geomorfologia do Neógeno na Bacia Vaupés-Amazonas.

De acordo com os dados da bibliografia, acima das rochas do embasamento há ocorrência de uma cobertura sedimentar de arenitos, composta por quartzos (50%), feldspatos (23%) e fragmentos de rocha (27%), de tamanho médio a fino, com boa seleção e com menor proporção de plagioclásio e líticos grossos (PRIEM et al., 1982). Esses dados são evidenciados na descrição das amostras de calha e nas respostas do perfil geofísico de raio gama do poço (Figuras 3 e 9).

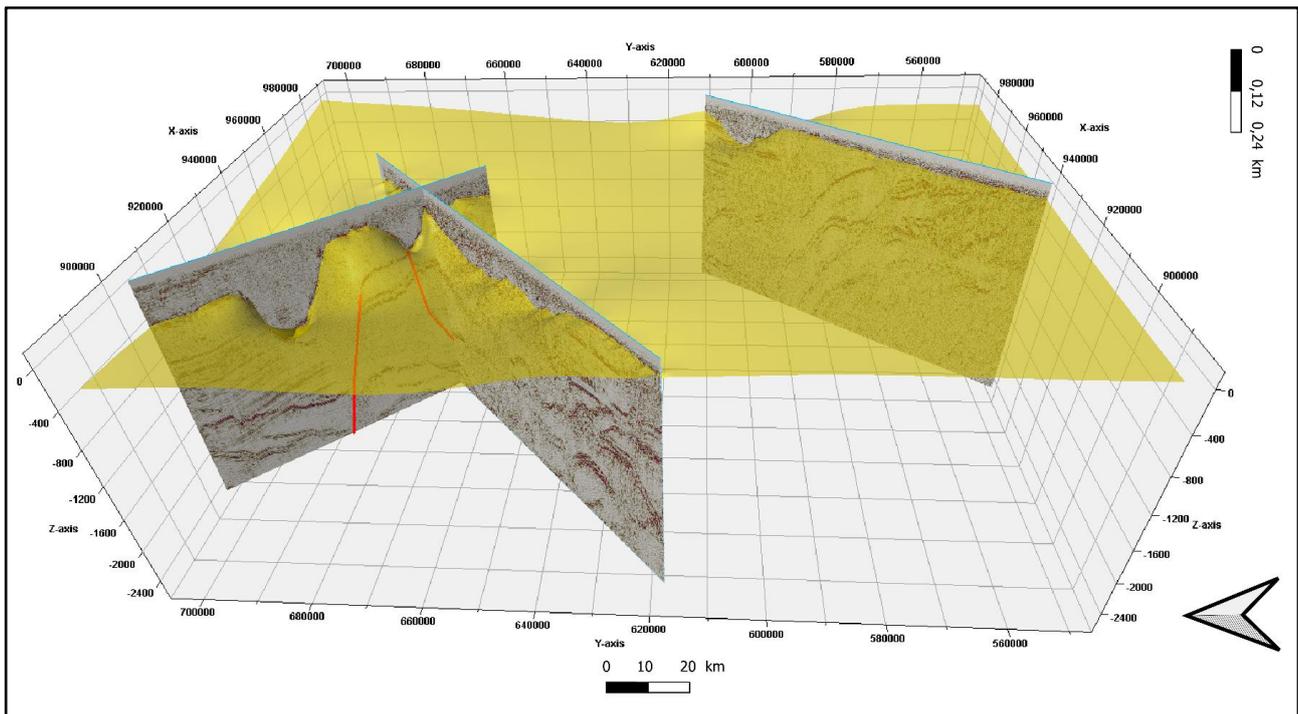


Figura 8. As seções sísmicas onde foram traçados os horizontes da camada mais rasa e em seguida foi feita a geração da superfície (plano de cor amarelo) que representa o topo da camada que apresenta feições geomorfológicas do Neógeno até o Recente. Na seção sísmica LM1 temos a superfície delimitada de dois cânions de dimensões distintas e a identificação de feições de estratificação plano-paralela.

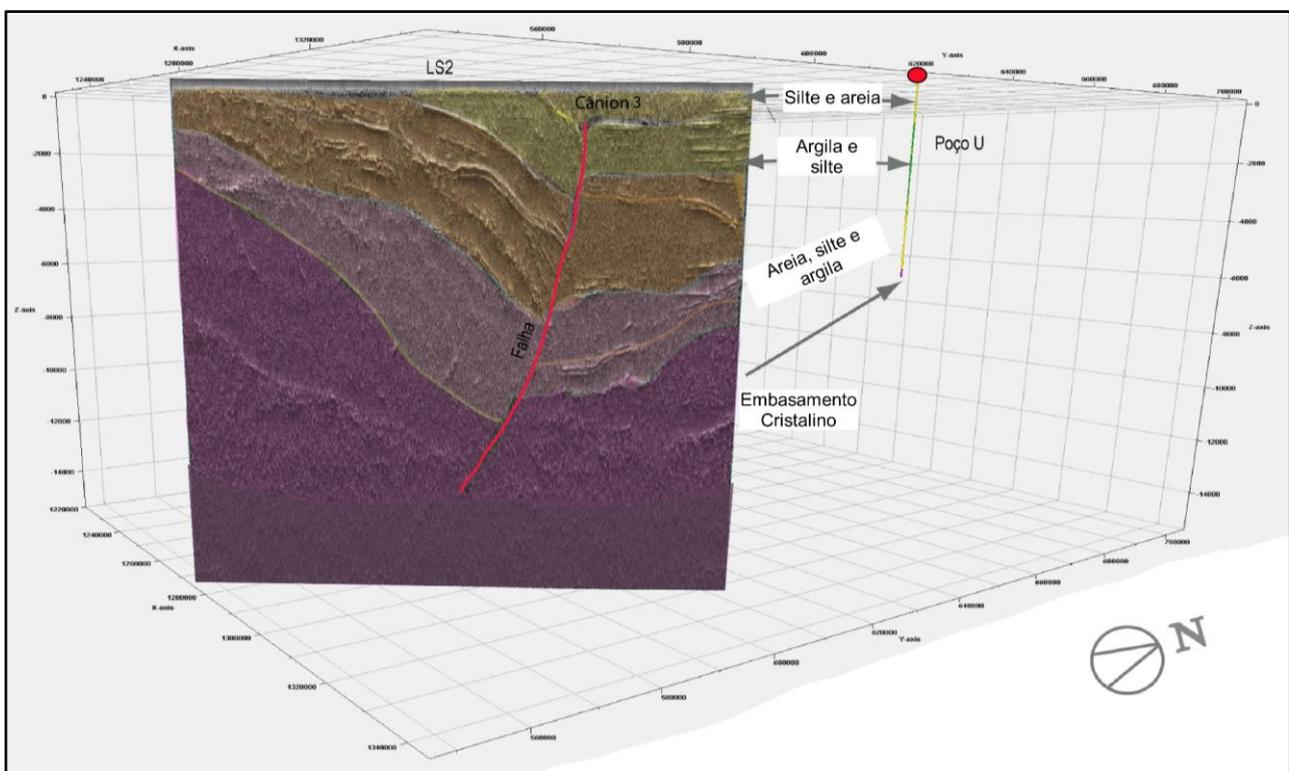


Figura 9. Delineação da falha (em vermelho) e a estruturação dos pacotes sedimentares que são afetados por esta estrutura na linha sísmica LS2. No lado direito da imagem temos a correlação das informações da seção sísmica LS2 com os dados do perfil de raio gama do poço U.

Além dos arenitos, predominam também pequenas intercalações de camadas de folhelhos. As camadas mais rasas, no topo, são preenchidas com arenitos com textura fina e disposição em camadas delgadas, e camadas de

folhelhos. Esporadicamente tem-se presença de siltitos. Segundo o perfil (Figura 5) e o registro palinológico obtido a partir dos poços, localizados nas regiões distais, permite estabelecer uma diferenciação entre as sequências Neógenas acima e as localizadas abaixo dos 320 m de profundidade, correspondem ao Paleozóico (Figura 6B). No setor sudeste da área de estudo, as expressões geomorfológicas variam de sequências quase horizontais para geofomas erosivas com vales incisos e maduros de grandes dimensões, na área noroeste, que se estende por quilômetros de comprimento, com depocentros de centenas de metros de profundidade e cobertura de depósitos espessos possivelmente associados a ambientes fluviais, de acordo com a interpretação das características dos refletores desse trecho, como mostra a figuras 5 e 6.

Nessa porção mais rasa do perfil sísmico são identificados cânions que cortam as sequências Neógenas até o recente. Ao todo são registrados três cânions de portes distintos. O primeiro e mais expressivo, está localizado juntamente com o cânion dois, na linha sísmica LM1. Esta feição apresenta comprimento de 18 km por cerca de 500 metros de profundidade e chama atenção por sua resposta sísmica na lateral direita da sua base que caracteriza um concentrado de reflexões que foi interpretado neste estudo como sendo respostas referentes a acreção lateral desta feição. Os seus refletores internos caracterizam um suposto preenchimento uniforme e paralelo horizontalmente das camadas de sedimento mais jovens. O segundo cânion, também localizado na LM1, tem uma dimensão menor, aproximadamente 12 km de comprimento com 160 metros de profundidade e possui uma estrutura de falha na sua base, que provavelmente a sua ativação influenciou na estruturação desta feição antes do Neógeno. Já a terceira estrutura de cânion descrita nestes dados, está localizada na linha LS2, mais distante de tamanho similar às dimensões do cânion 2. Sua correlação com os dados das linhas LM1 e LS1 foram feitas por interpolação de dados para conseguirmos alcançar os objetivos propostos neste trabalho.

Ao correlacionarmos todos estes dados com as informações geográficas e geomorfológicas da superfície, observamos que o curso dos rios, dominada pelo rio Vaupés e outros tributários, é um dos fatores da origem dos depósitos aluviais ao longo do leito dos corpos d'água, que são compostos predominantemente por areias e siltes, correspondendo morfologicamente a canais longitudinais e transversais, devido à dinâmica do curso ativo sobre seu leito (WINEMILLER; WILLIS, 2011). Nas sequências superiores do Neógeno, refletem-se a presença de feições geomorfológicas, como cânions, vales incisos, canais de grande porte e preenchimento de canais, com uma orientação preferencial de NE-SW.

Estas seções permitem fazer uma análise geomorfológica, onde é possível gerar um modelo preliminar, a partir dos registros *raws*, com esses dados obtém-se a seção sintética. Uma vez definida esta etapa, com os resultados da análise das seções, foram aplicados atributos de processo, estruturais e estratigráficos. A seção final (Figura 10 e 11), com a aplicação do atributo TECVA, que permite a visualização das feições com maior detalhe de relevo, facilitando o mapeamento de horizontes e falhas, auxiliou na identificação/confirmação da descrição das nas primeiras sequências.

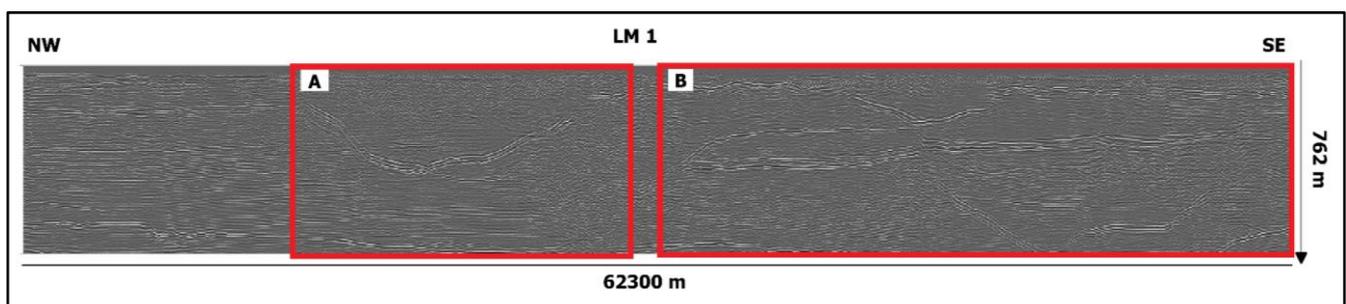


Figura 10. Seção sísmica com presença de vales escavados, cânions, canais e *scours* nas áreas mais superficiais da seção. Nessa imagem temos o resultado da análise de multi atributo (TECVA) que está realçando as principais feições morfológicas, dessa forma também é possível observar a orientação com acabamento plano paralelo no pacote sedimentar que está abaixo do cânion 1.

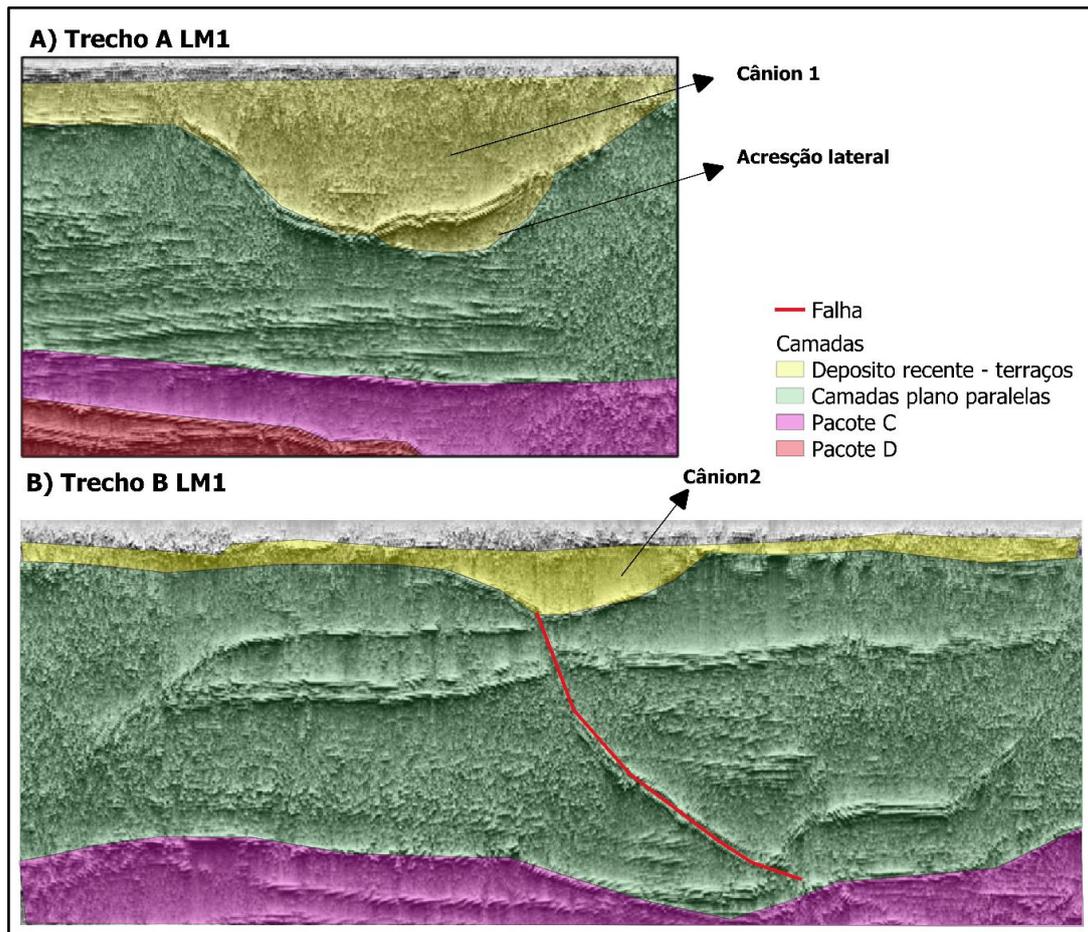


Figura 11. Seção sísmica com presença de vales escavados, cânions, canais e *scours* nas áreas mais superficiais da seção. Nessa imagem temos o resultado da análise de multi atributo (TECVA) que está realçando as principais feições morfológicas, dessa forma também é possível observar a orientação com acabamento plano paralelo no pacote sedimentar que está abaixo do cânion 1.

A caracterização e modelagem de feições geomorfológicas, em superfície são caracterizadas pela presença de três tipos de relevo, de origem principalmente denudacional e aluvial, associados ao leito do Rio Vaupés e planícies aluviais, as quais podem ser separadas em três geoformas ou unidades: (i) morros baixos dissecados, (ii) morros residuais e (iii) planícies denudacionais. As formas de origem aluvial podem ser distinguidas, principalmente os depósitos aluviais do leito maior do Rio Vaupés. As zonas montanhosas ocorrem nas bordas sudoeste e nordeste da área de estudo. As colinas do setor sudoeste caracterizam-se por apresentarem uma altura relativa maior entre 20 e 30 metros com topos convexos e bordas abruptas e dissecadas. Os morros do setor nordeste são de altura relativa menor, de 10 a 15 metros, altamente dissecados com densos sistemas de drenagem dendrítica. Na parte central estão as duas unidades de morro em uma planície residual, produtos de material arenoso da decomposição dos arenitos da Formação Araracuara. Nessas planícies surgem colinas residuais com alturas relativas entre 100 e 150 metros. Esses morros apresentam formas irregulares e dimensões diferentes com orientação Noroeste-Sudeste, onde as camadas de rochas arenosas formam localmente bordas e declives estruturais. Essas formas se destacam sobre a planície arenosa residual. O rio Vaupés na área de estudo apresenta um canal ativo sinuoso com a formação de algumas ilhas fluviais, cujo leito principal sobre o qual o canal ativo vagueia pode atingir uma largura de 10 a 15 km.

Embora na superfície as geoformas não sejam evidenciadas (Figura 2 e 4), em profundidade elas podem ser visualizadas. Em subsuperfície, destacam-se elementos arquitetônicos como cânions, vales e canais que constituem domínios tectono-estratigráficos e geomorfológicos do Rio Uaupés.

O modelo final, a partir da seção sísmica simulada sinteticamente, aparece com as reflexões sísmicas principais, resultando em eventos de baixa resolução, com presença de sequências espessas, interrompidas pela presença de cânions, vales e camadas basculantes e que são afetadas por possíveis quedas eustáticas (Figura 12).

O modelo de subsuperfície obtido da integração da estratigrafia e da sismoestratigrafia permite estabelecer uma seção. Considerando as feições geomorfológicas obtidas das seções, especialmente na seção *strike*, é possível delimitar geometrias com corpos de grande porte, caso do cânion localizado a 500 m de profundidade, o qual se sobrepõem a uma pilha de sedimentos, que se estende a quase 25 quilômetros (Figura 9). As sequências superiores estão marcadas por uma superfície discordante regional, (com cânions 1 e 2) como as expressões mais proeminentes, embora se apresentem na vizinhança outras de menor expressão (Cânion 2). Outras feições internas permitem visualizar o preenchimento lateral (Cânion 1). No extremo Este tem-se outro possível cânion o qual é mais antigo e proeminente, aliás sua geometria e dimensão não é determinada. Embora a feição exista, ela tem uma geometria aparente, que pode ser menor, mas ela se apresenta na área, sendo possível detectar mais não mapear.

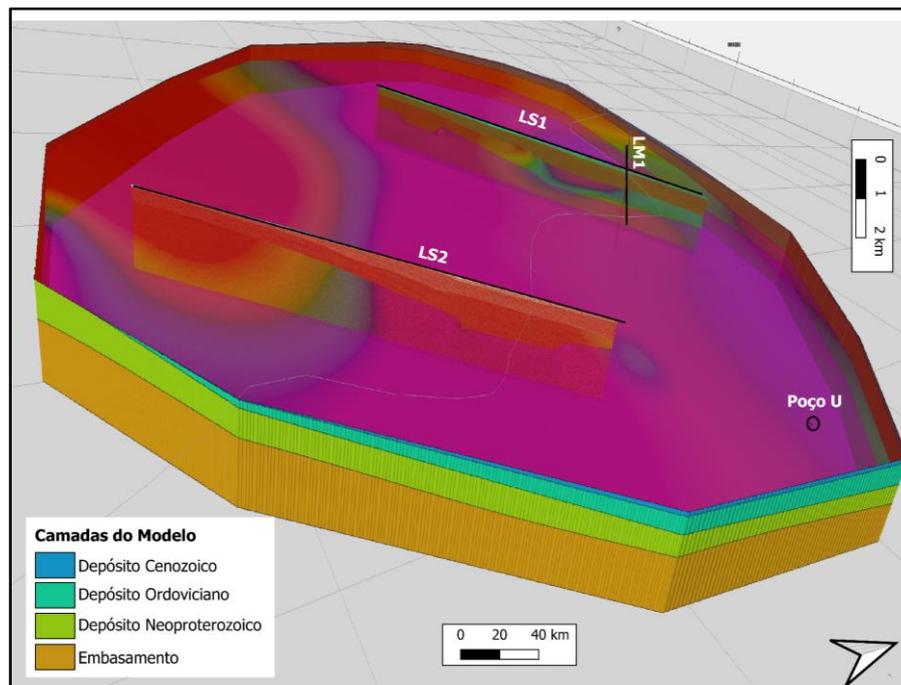


Figura 12. Visualização do modelo geral da área de estudo com as distribuições das camadas rochosas com ênfase para as rochas do embasamento e a delimitação do cânion na porção lateral da imagem.

5. Discussão

Com a integração desses dados é possível ter uma aproximação da estrutura tridimensional da subsuperfície do setor noroeste da Bacia de Vaupés-Amazonas. Apesar de estamos utilizando dados sísmicos 2D, foi possível realizar a calibração dos dados com o poço e construir a estrutura de um modelo. Uma vez tem-se a correlação e calibração dos dados é possível determinar ou pelo menos detectar a presença ou disposição do espaço temporal de feições localizadas a centenas de metros ou quilômetros de profundidade. Estas feições podem ser estruturais (falhas, dobras, discordâncias), estratigráficas e geomorfológicas (canyons, vales, scours).

Analisando a porção SE da área de estudo, no trecho mais raso do poço, próximo a superfície, é observada uma rugosidade paleotopográfica que apresenta unidades bem diferenciadas. Esses contrastes são resultado da competência litológica, que se manifestam nas expressões geomorfológicas, tais como colinas rochosas com estruturas residuais com alturas relativamente baixa (cerca de 200 metros), formas escarpadas a oeste com suave inclinação para leste com picos geralmente de forma irregular. Estas colinas emergem sobre as areias residuais, produto de sua meteorização, em formas individuais ou de cadeias na parte central da área de estudo. As rochas sedimentares menos competentes do Paleógeno da Amazônia, compõem-se predominantemente de arenitos, com zonas irregulares e rugosas. Rochas com essas características permitem que as drenagens de formas detríticas e densas se instalem, enquanto as rochas dominadas por argilas se apresentam drenagens mais homogêneas. O produto da degradação desses arenitos forma depósitos residuais dominados por areias quartzosas de grão grosso a fino, segundo a informação das eletrofácies e a descrição das amostras de calha e testemunhos (Figuras 5 e 6).

Na análise das feições identificadas nas seções sísmicas, associados aos dados do poço, é possível estabelecer que o preenchimento dos cânions, associados a paleocanais isolados, como as componentes principais, são caracterizados por uma cobertura sedimentar Neógena (DA SILVA; JANOMI; DOS SANTOS, 2015). Nos intervalos litoestratigráficos superiores, às características sísmicas diretas, tais como continuidade, coerência e similaridade, conseguem evidenciar geoformas semicirculares, de grande extensão (cânion 1 de tamanho 18 km de largura por 300m de profundidade), o qual interrompe a sequência estratigráfica, e pode se corresponder a um grande canyon. Além disso, no interior a imagem tem ausência ou poucos refletores internos, isto devido à baixa resolução ou a litologia branda que absorve a energia no local e não permite imagear a área. Estas unidades litoestratigráficas identificadas neste trabalho correspondem com as descritas em trabalhos anteriores como Celada et al. (2006), Kroonenberg e Reeves (2011) e Alcárcel e Gómez (2019).

6. Conclusões

O setor estudado da Bacia Vaupés-Amazonas, apresenta a estruturação geomorfológica dominada por feições, além de apresentar camadas sub-horizontais e feições que indicam que as camadas passaram por fortes eventos erosivos, evidenciados pelas variadas formas dos horizontes e arranjo dos refletores.

No setor oeste as geoformas apresentam diferentes tamanhos, embora, considerando análogos aos atuais, possuem uma topografia abrupta.

A partir da informação baseada na geofísica, com uma seção de rumo e dois de mergulho evidenciam a presença de cânions, vales, *scours* e canais, onde os refletores são interrompidos nas paredes laterais. Os cânions presentes estendem por quilômetros, com presença de vales incisos e alguns paleocanais, os quais se encontram imersos em cânions. Em áreas extensas e com poucos dados científicos, como esta Bacia Colombiana, os usos dessas ferramentas geofísicas contribuem para a identificação de feições geológicas importantes.

O uso de métodos indiretos permite a detecção da geologia de subsuperfície, ainda mais com a geomorfologia sísmica e a modelagem de blocos é possível, especialmente com dados 3D, onde a correlação dos dados sísmicos e de poços possibilita a caracterização de feições com comprimentos e profundidades diferentes, realizar um modelamento da área em subsuperfície em 3 dimensões. Embora, as análises foram feitas utilizando seções 2D, estas proporcionaram uma boa aproximação na identificação das estruturas e feições encontradas na porção rasa do subsolo dessa área, além do modelo tridimensional. Ao analisar o resultado da integração, foi constatado que tais evidências geomorfológicas estão relacionadas com a evolução do Alto do Vaupés que ocorre desde o Paleógeno até o recente, com episódios tectono estratigráficos associados.

A proposta da continuidade deste trabalho visa a integração desses dados com imagens de Sensoriamento Remoto para realizar a correlação das feições identificadas em subsuperfície com suas respectivas respostas em superfície, com o objetivo de compreender até em que momento as reativações tectônicas influenciaram na formação do relevo atual.

Contribuições dos Autores: B.P.S e L.A.C.L.: preparação de dados, metodologia, software e escrita de artigo; L.A.C.L.: revisão do artigo, validação e aquisição de financiamento; S.S.C.: validação, aquisição de financiamento e revisão do artigo; S.P.S.: validação dos dados estratigráficos e validação; G.V.C.: validação e análise formal. Todos os autores leram e concordam com a versão publicada no manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), através da concessão de bolsa de pesquisa de mestrado ao autor principal.

Agradecimentos: Os autores agradecem a Universidade Federal do Amazonas (UFAM) pelo amparo institucional, em especial ao departamento de Geociências que nos ofereceu estruturas para o desenvolvimento desta pesquisa.

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

Referências

1. ALBERT, J.S, VAL, P., HOORN, C. The changing course of the Amazon River in the Neogene: Center state for Neotropical diversification. *Neotropical Ichthyology*, Paraná, Brasil, 2018. V. 16, n. 3, p.: 1-24. DOI: 10.1590/1982-0224-20180033.
2. ALCÁRCCEL, F.A. GÓMEZ, J. Mapa **Geológico de Colombia 2019. Escala 1 : 2 000 000**. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá, 2019.
3. BAKER, P. A., FRITZ, S. C., SILVA, C. G., RIGSBY, C. A., ABSY, M. L., ALMEIDA, R. P., CAPUTO, M., CHIESSI, C. M., CRUZ, F. W., DICK, C. W., FEAKINS, S. J., FIGUEIREDO, J., FREEMAN, K. H., HOORN, C., JARAMILLO, C., KERN, A. K., LATRUBESSE, E. M., LEDRU, M. P., MARZOLI, A., MYRBO, A., NOREN, A., PILLER, W. E., RAMOS, M. I. F., RIBAS, C.

- C., TRNADADE, R., WEST, A. J., WAHNFRIED, I., WILLARD, D. Trans-Amazon Drilling Project (TARP): Origins and Evolution of the forest, climate, and hydrology of the South American Tropics. **Scientific Drilling**, v. 20, p.: 41-49, 2015. DOI: 10.5194/sd-20-41-2015.
4. BALDIS, B.A. Posibilidades de correlación del Ordovícico de Los Llanos Colombianos y La Alta Amazonia – Brasileño - Equatoriana. In Latinamerican Congress of Sedimentology, Pará, Brazil. , **Abstracts**, SBG, p.500-506, 1988.
5. BULHÕES, M. E.; NOGUEIRA, W. A. Princípio da Sismo Camada Elementar e sua aplicação à Técnica Volume de Amplitudes (tecVA). In: 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, 9, 2005, Salvador, Bahia, Brasil. **Anais**, SBGf, p. 11-14, 7p. 2005. DOI:10.1190/sbgf2005-275.
6. CAPUTO, M. V., SOARES, E. Eustatic and tectonic change effects in the reversion of the transcontinental Amazon River drainage system. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, n. 2, p.: 301-328, 2016. DOI: 10.1590/2317-4889201620160066.
7. CELADA, C.M., GARZÓN, M., GÓMEZ, E., KURAMA, S., LÓPEZ, J.A., MORA, M., NAVAS, O., PÉREZ, R., VARGAS, O. & WESTERHOF, A. B. **Potencial de recursos minerales en el oriente colombiano: Compilación y análisis de la información geológica disponible (fase 0)**. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), 2006. 232 p.
8. CINTRA, P. J., OLIVEIRA, R. H. Nicolas Sanson and his map: The course of the Amazon River. **Acta Amazônica**, v 44, n. 3, p.: 353-366, 2014. DOI: 10.1590/1809-4392201302944.
9. CORDANI, U. G., SATO, K., SPROESSNER, W. SANTOS-FERNANDES, F. U-Pb zircon ages of rocks from the Amazonas territory of Colombia and their bearing on the tectonic history of the NW sector of the Amazonian Craton. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, n. 1, p. 5–35, 2016. DOI:10.1590/2317-4889201620150012.
10. DA SILVA, F. C., JANOMI C. R., DOS SANTOS, L. J. Perfil Geológico e Metalogenético das Ocorrências de Nióbio no Complexo Carbonatítico Seis Lagos na Região de Gabriel da Cachoeira/Am. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 14, 2015, Marabá, Pará. **Anais...** Marabá, PA: SGA, 2015. 453-456p.
11. D'APOLITO, C. **Landscape evolution in western Amazonia: palynostratigraphy, palaeoenvironments and diversity of the miocene Solimões formation, Brazil**. Tese (Doutoramento em Geociências) – Universidade de Birmingham, Birmingham, Inglaterra, 2016.
12. DE BOORDER, H. Contribución preliminar al estudio de la estructura geológica de la Amazonia colombiana. **Revista CIAF**, v. 5, n. 1, p. 49– 96, 1980. ISSN 0120-2499.
13. DGB. **Opendtect version 6.4**. 2020. Disponível em: <<https://www.dgbes.com/index.php/download>>.
14. DIX, C. H. Seismic Velocities from surface measurements. **Geophysics**, v. 20, n. 1, p.: 68-86, 1955. DOI: 10.1190/1.1438126.
15. ECHEVERY, A., GALLO, V.. Historical relationship of the Caribbean and Amazonian Miocene ichthyofauna: A hypothesis reviewed under a biogeographical approach. **Geobios**, v. 48, n. 4, p.: 309-320, 2015. DOI: 10.1016/j.geobios.2015.06.001.
16. GALVIS, J., HUGUETT, A., RUGE, P. Geología de la Amazonia Colombiana. **Boletín Geológico**, v. 22, n. 3, p.: 3–86, 1979. ISSN 0120-1425.
17. GALVIS, J., GÓMEZ, L. Hierro Bandeado en Colombia. **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, v. 22, n. 85, p.: 485-496, 1998. ISSN 0370-3908.
18. GARCIA, R., CRUZ, L., MIER, R. Prospectividad de hidrocarburos en la Cuenca Vaupés-Amazonas, Colombia. **Boletín de Geología**, v. 35, n. 2, p.: 15-29, 2013.
19. GÓMEZ, J., MONTES, N. E., MELENDEZ, M.A. GUTIÉRREZ, F. A. MONTOYA, C. M., DIEDERIX, H. Geological Map of Colombia 2015. **Journal of International Geoscience**, v. 40, n. 3, p.: 201-2015, 2017. DOI:10.18814/epiugs/2017/v40i3/017023
20. HOORN, C. Miocene incursions and the influence of Andean tectonics on the Miocene depositional history of northwestern Amazonia: results of a palynostratigraphic study. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 105, n. 3,4, p.: 267–309, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(93\)90087-Y](https://doi.org/10.1016/0031-0182(93)90087-Y).
21. IBÁÑEZ-MEJIA, M. **New u-pb geochronological insights into the proterozoic tectonic evolution of northwestern south america: the mesoneoproterozoic putumayo orogen of amazonia and implications for rodinia reconstructions**. Dissertação (Master of Science). University of Arizona, Arizona, 2010.
22. IGAC. **Paisajes Fisiográficos de Orinoquia – Amazonía (ORAM) Colombia**. IGAC, Bogotá, Colombia, 1999. p.: 361. ISS 0120 – 8551.
23. KHOBZI, J., KROONENBERG, S., FAIVRE, P., WEEDA, A. Aspectos Geomorfológicos de la Amazonia y Orinoquia Colombianas. **Revista CIAF**, 1980. v. 5, n. 1, p. 97-126.
24. KROONENBERG, S. B., REEVES, C. V. **Geology and hydrocarbon potential Vaupés-Amazonas Basins**. In: CEDIEL, F. Petroleum Geology of Colombia Volume 15. Bogotá: ANH, 2011, p 94.
25. LEITE, F. P. R. **Palinologia da Formação Solimões, Neógeno da Bacia do Solimões, Estado do Amazonas: Implicações paleoambientais e bioestratigráficas**. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
26. LÓPEZ, I. J. A. Unidades, petrografia y composición química del complejo migmatítico de Mitú em los alrededores de Mitú: Réplica. **Boletín de Geología**, v. 34, n. 1, p. 101-103, 2012.

27. LÓPEZ, I. J. A., CRAMER, T. Ambiente geológico del complejo Mitú y perspectivas de ocurrencias minerales de niobio y tantalio en el territorio colombiano. **Geología Colombiana**, v. 37, p. 75-95, 2012. ISSN 0072-0992.
28. LÓPEZ, J. A., KHURAMA, S., BERNAL, L. E., CUÉLLAR, M. A. El Complejo Mitú: Una nueva perspectiva. In: CONGRESO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA, 11, 2007, Bucaramanga, Santander. **Anais, Bucaramanga**, 2007. DOI: 10.13140/2.1.3164.0968
29. PRIEM, H. N. A, ANDRIESEN, P. A. M. BOELRIJK, N. A. I. M., DE BORDER, H., HEBEDA, E. H., HUGUETT, A., VERDUMEN, E. A. T. VERSCHURE, R. H. Geochronology of the Precambrian in the Amazonas region of southeastern Colombia (western Guiana Shield). **Geologie en Mijnbouw**, v. 61, n. 3, p. 229–242, 1982. ISSN 0016-7746.
30. RODRÍGUEZ, G.; SEPÚLVEDA, J.; RAMÍREZ, C.; ORTIZ, F. H.; RAMOS K.; BERMÚDEZ, J. G.; SIERRA, M. I. Unidades, Petrografía y Composición Química del Complejo Migmatítico de Mitú en los alrededores de Mitú. **Boletín Geológico**. Vol 33, No 1. pp. 27 a 42. 2011 (b).
31. RODRÍGUEZ, G., BERMÚDEZ, J. G., RAMIREZ, C. RAMOS, K., ORTIZ, F., SEPÚLVEDA, J., SIERRA, M. Hierro Oolítico en el área del Municipio de Mitú (Departamento de Vaupés, Amazônia Colombiana). **Boletín Ciencias de la Tierra**, n. 34, p. 5-14, 2013. ISSN 0120-3630.
32. SILVA, C. H. J. **Correlação perfil-sísmica usando o sismograma sintético e aplicação de atributos do traço complexo em linhas sísmicas 2D, em time slices e dados de radar**. Monografia (Graduação em Geofísica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.
33. SCHLUMBERGER. Well Seismic Service Processing Summary. Internal Report, Amoco-Colombia. p. 60, 1989.
34. TASSINARI, C.C.G., CORDANI, U.G., NUTMAN, A.P., VAN SCHMUS, W.R., BETTENCOURT, J.S., TAYLOR, P.N. Geochronological systematics on basement rocks from the Río Negro–Juruena province (Amazonian Craton) and tectonic implications. **International Geology Review**, v. 38, n. 2, p. 161–175, 1996. DOI: 10.1080/00206819709465329.
35. TASSINARI, C. G. C. MACAMBIRA, M. J. B. Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. **Episodes**, v. 22, n. 3, p. 174-182, 1999.
36. VARGAS, C.G. Geologic study and exploration for iron and associated minerals in Vaupes, eastern Colombia, using remote sensing. **Technical Report**. GRUPO DE BULLET S.A. 2011.
37. VARGAS, C.G. Indicadores geológicos y geomorfológicos asociados a pinturas rupestres del Parque Nacional Natural Serranía de Chiribiquete. **Revista Colombia Amazónica**, v. 10, p. 29-46, 2017.
38. WINEMILLER, K. O. WILLIS, S. C. The Vaupes Arch and Casiquiare Canal: barriers and passages. Chapter fourteen. 225-242p. In: Albert, J. S., Reis, R. E. **Historical Biogeography of Neotropical Freshwater Fishes**. Berkeley, UCPress, 2011. P. 388.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.