



<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>

REVISTA BRASILEIRA
DE GEOMORFOLOGIA



Publicação da
UNIAO DA GEOMORFOLOGIA BRASILEIRA

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: 12/08/2021; Aceito: 27/06/2022; Publicado: 01/10/2022

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 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 evidências 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).

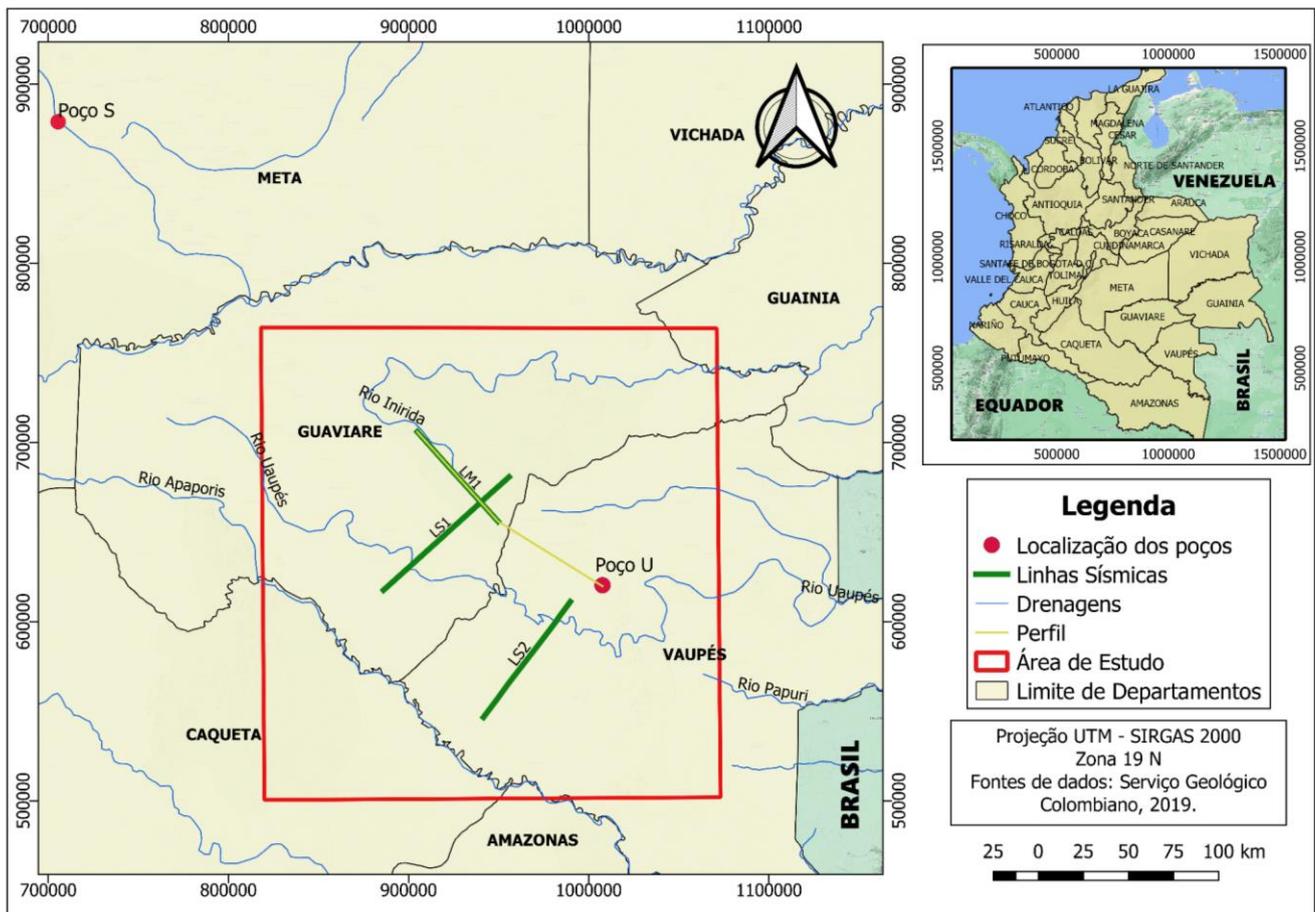


Figura 1. No canto superior direito, temos o mapa de localização regional da área de estudo. A área está situada na porção sudeste da Colômbia, próximo da área de fronteira com o Brasil, dentro dos limites dos departamentos Vaupés, Guaviare e Caquetá. E no mapa em destaque, temos a localização dos principais 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).

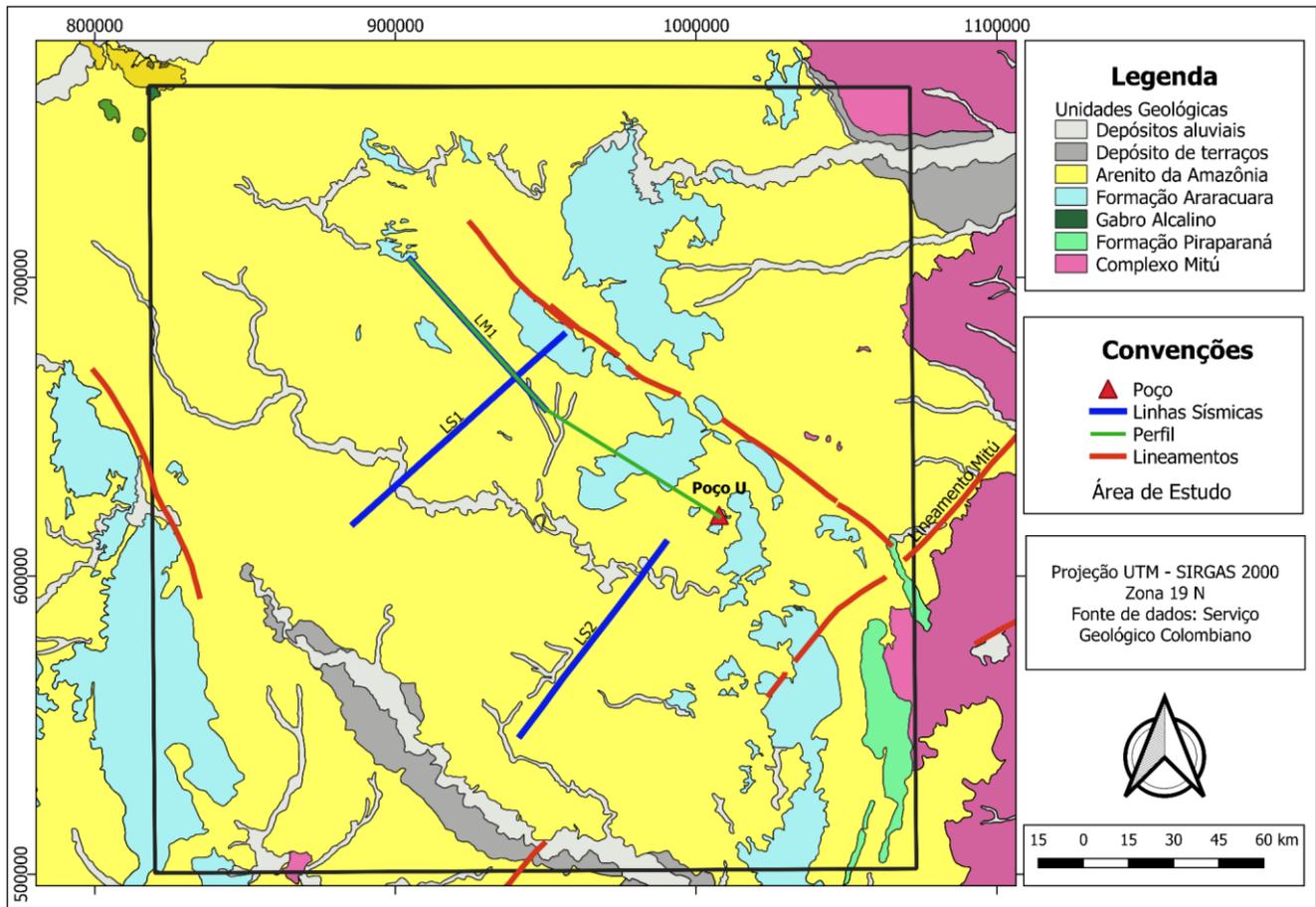


Figura 2. Mapa geológico-estrutural da porção noroeste da Bacia Vaupés-Amazonas, com destaque para os lineamentos representados na cor vermelha, bem como a localização das linhas sísmicas, o poço e a direção do perfil. Fonte: Modificado de Gómez et al. (2017).

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.

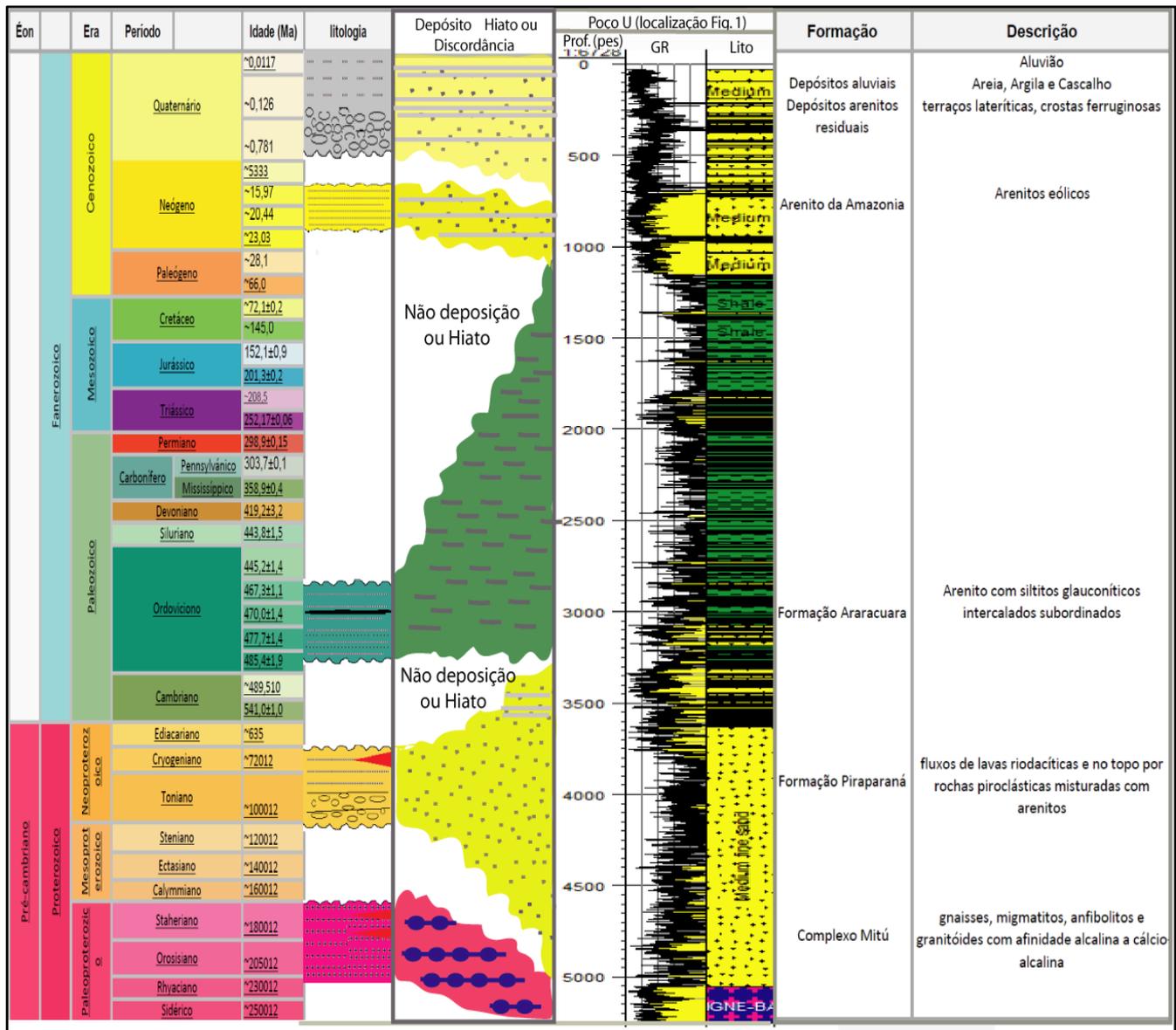


Figura 3. Coluna cronoestratigráfica da porção noroeste da Baía Vaupés-Amazonas, com ênfase na identificação e descrição das unidades geológicas presentes. Em adição, são apresentados os dados obtidos pelo perfil de Raio Gama (GR) do poço U e as principais discordâncias encontradas na área de estudo.

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 Baía dos Llanos (WINEMILLER; WILLIS, 2011). Outras pesquisas estabelecem este arco ao Mioceno Médio, concomitante ao soerguimento dos Andes (CAPUTO; SOARES, 2016).

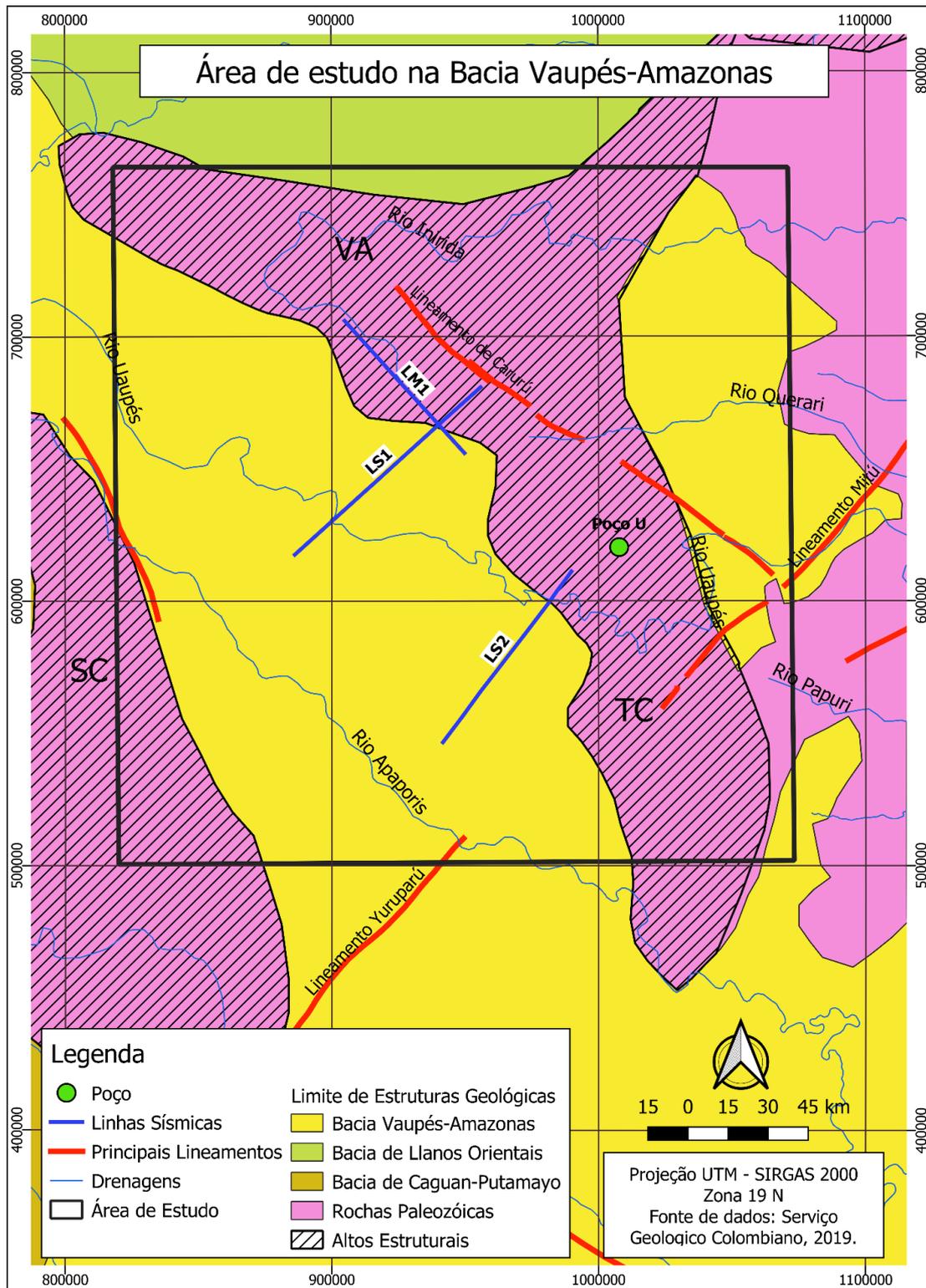


Figura 4. Localização da área de estudo na região da Bacia Vaupés-Amazonas. Em destaque são observados os lineamentos Carurú, Mitú e Yuruparí (em vermelho), os rios que banham a área, bem como as delimitações das bacias adjacentes e as rochas Paleozóicas aflorantes. Nos limites direito e esquerdo da 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. O poço U, localizado a cerca de 20 km de distância da seção sísmica mais próxima e aproximadamente 80 km da seção seguinte, possui dados que 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.

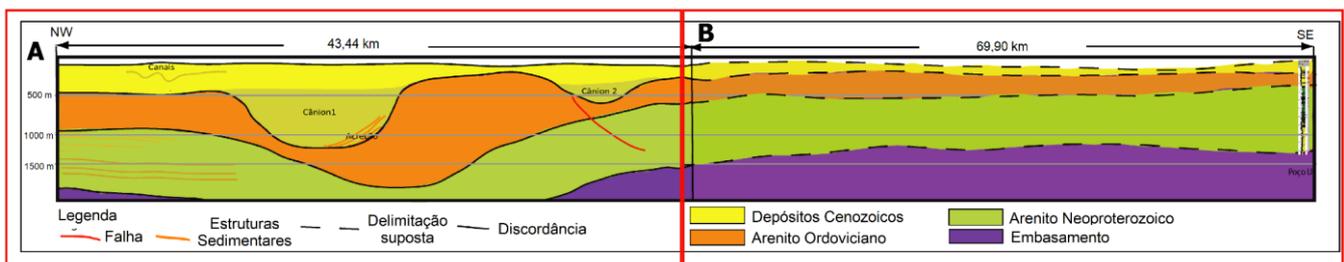


Figura 5. Correlação litoestratigráfica baseada nas respostas dos refletores da seção sísmica LM1 e a projeção dos limites de camada até os dados do perfil geofísico do poço U.

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 descontínuas, 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.

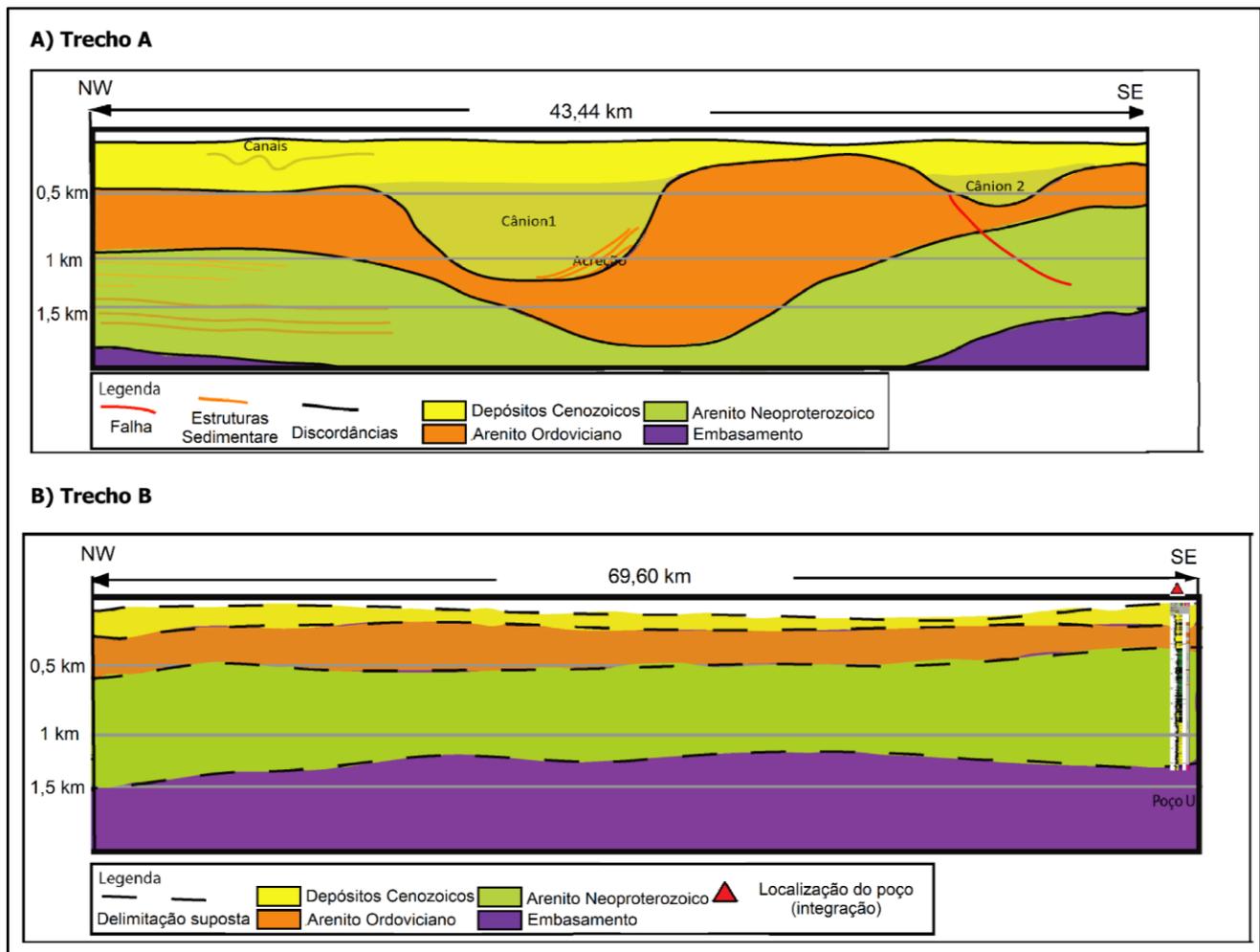


Figura 6. Detalhes da figura 5. No trecho A, temos o esboço esquemático do detalhamento dos primeiros 43 km da seção sísmica tendo as limitações da litoestratigrafia baseada nas respostas das características físicas do pacote rochoso identificados pela seção sísmica 2D, onde os refletores contrastantes 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.

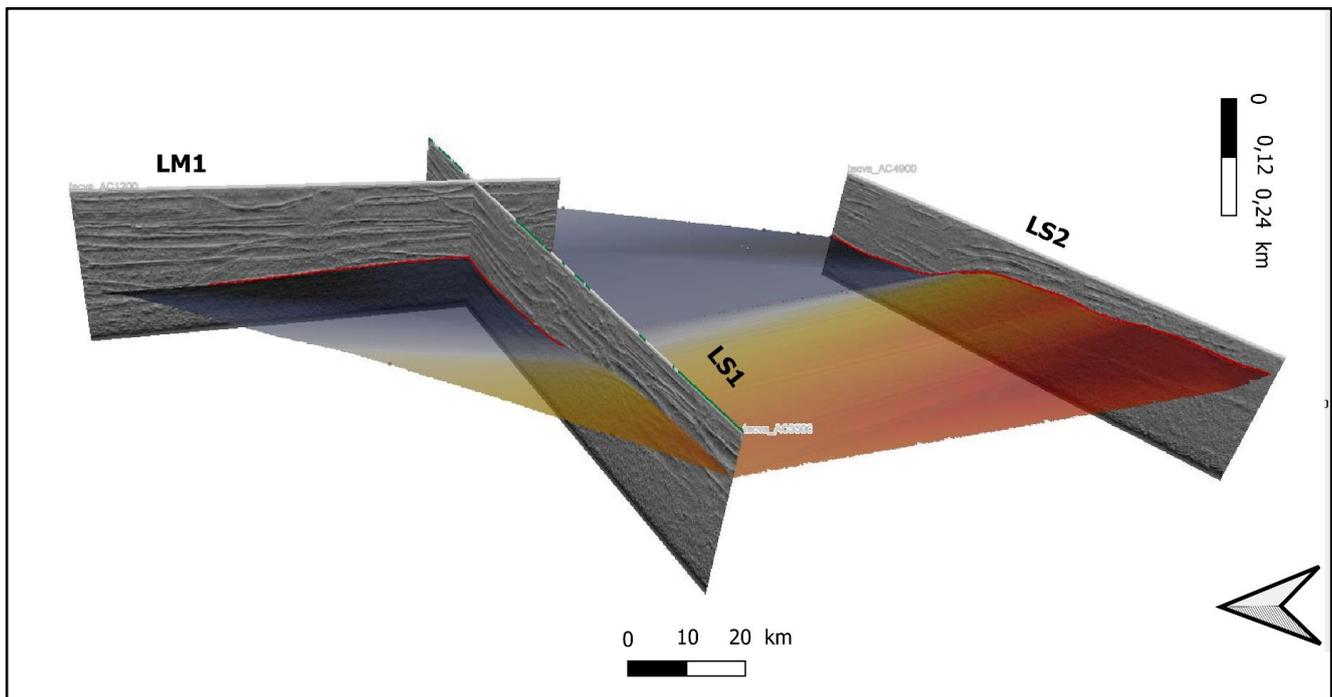


Figura 7. Nesse esquema temos o horizonte, linha em vermelho, traçado nas linhas sísmicas e a superfície gerada a partir desse horizonte na qual foi identificado como sendo o topo do embasamento. A escala vertical das seções apresentadas neste artigo esta em profundidade.

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).

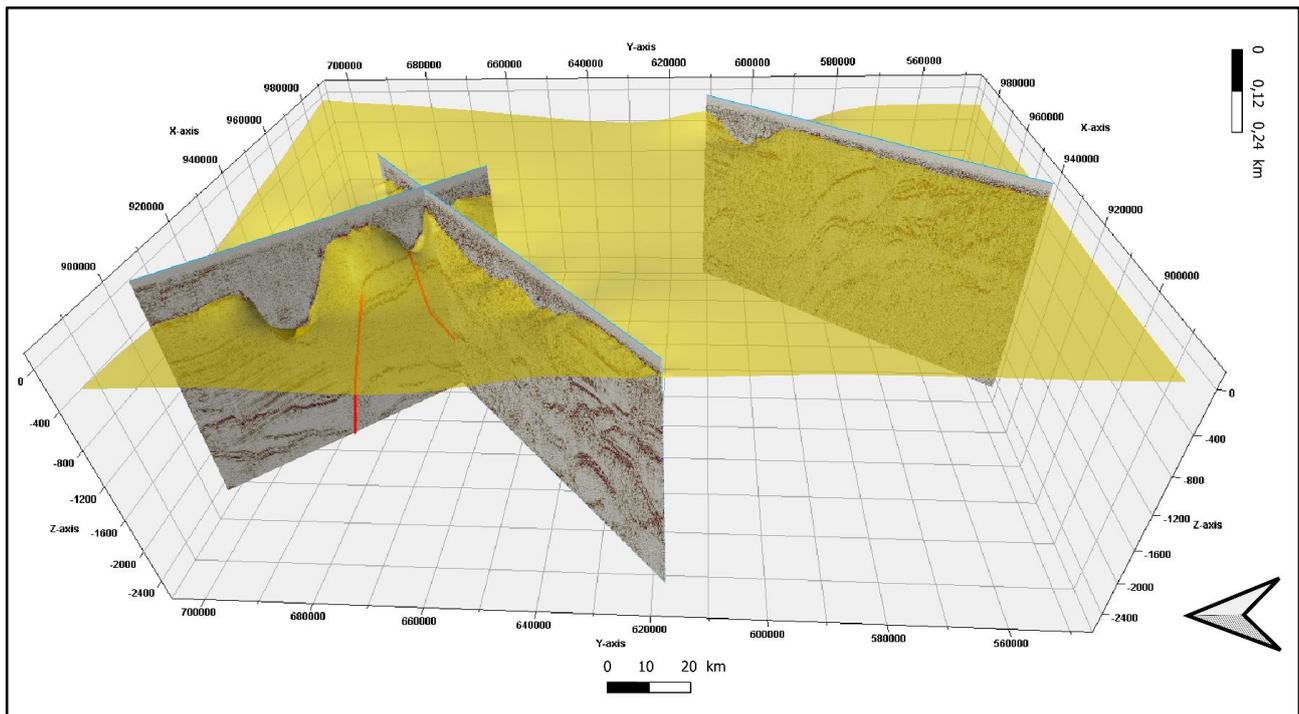


Figura 8. As seções sísmicas onde foram traçados os horizontes da camada mais rasa e em seguida foi feita a geração da superfície (plano de cor amarelo) que representa o topo da camada que apresenta feições geomorfológicas do Neógeno até o Recente. Na seção sísmica LM1 temos a superfície delimitada de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

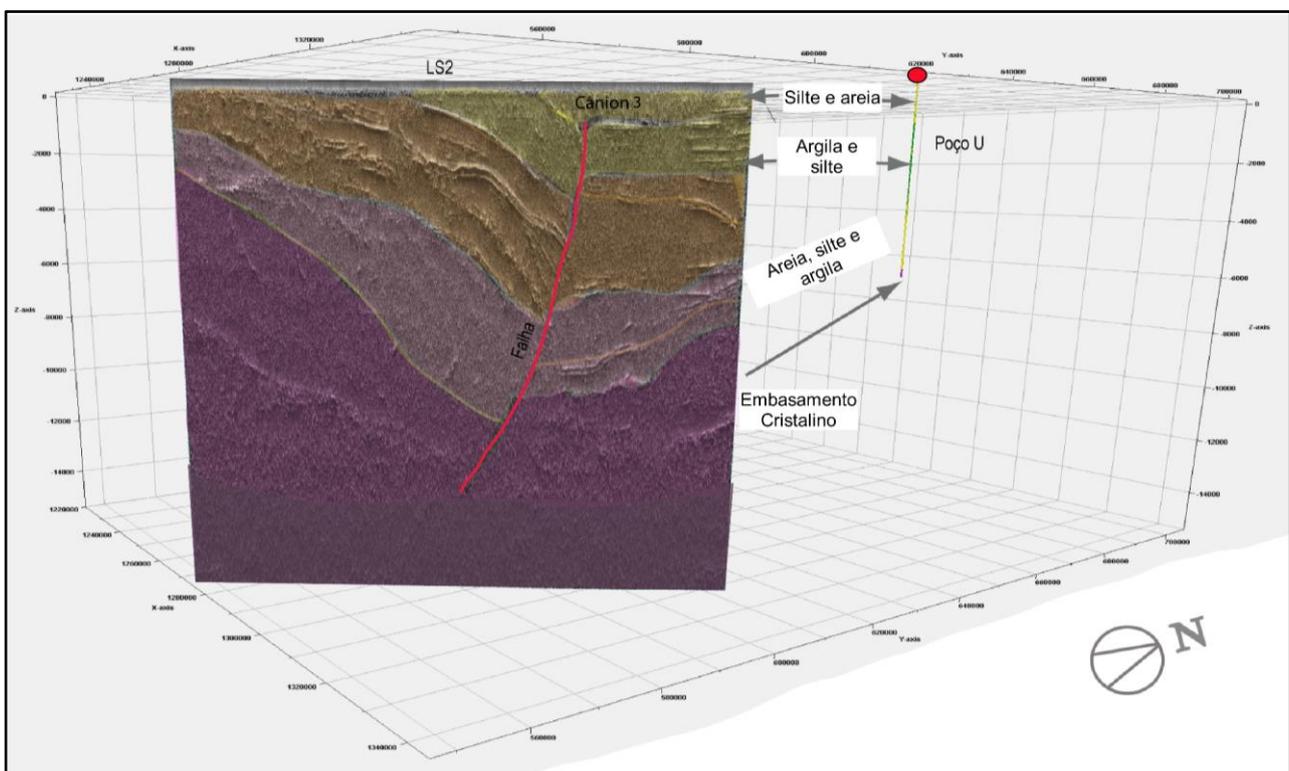


Figura 9. Delineação da falha (em vermelho) e a estruturação dos pacotes sedimentares que são afetados por esta estrutura na linha sísmica LS2. No lado direito da imagem temos a correlação das informações da seção sísmica LS2 com os dados do perfil de raio gama do poço U.

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, é possível 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.

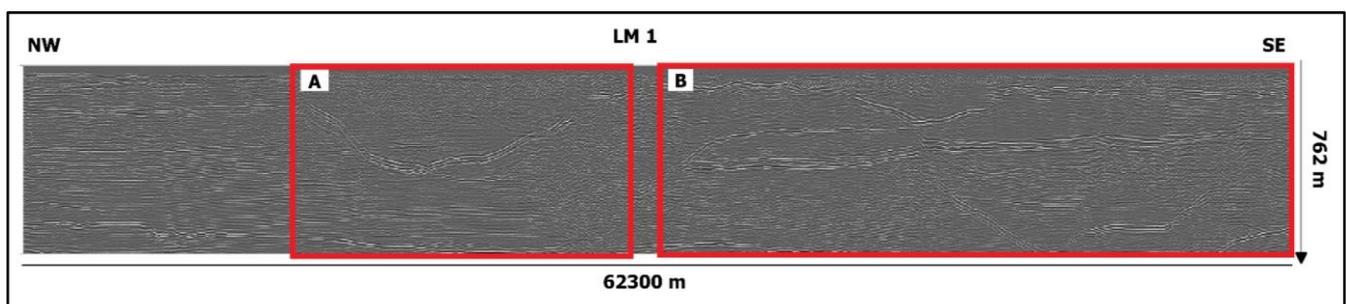


Figura 10. Seção sísmica com presença de vales escavados, cânions, canais e *scours* nas áreas mais superficiais da seção. Nessa imagem temos o resultado da análise de multi atributo (TECVA) que está realçando as principais feições morfológicas, dessa forma também é possível observar a orientação com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

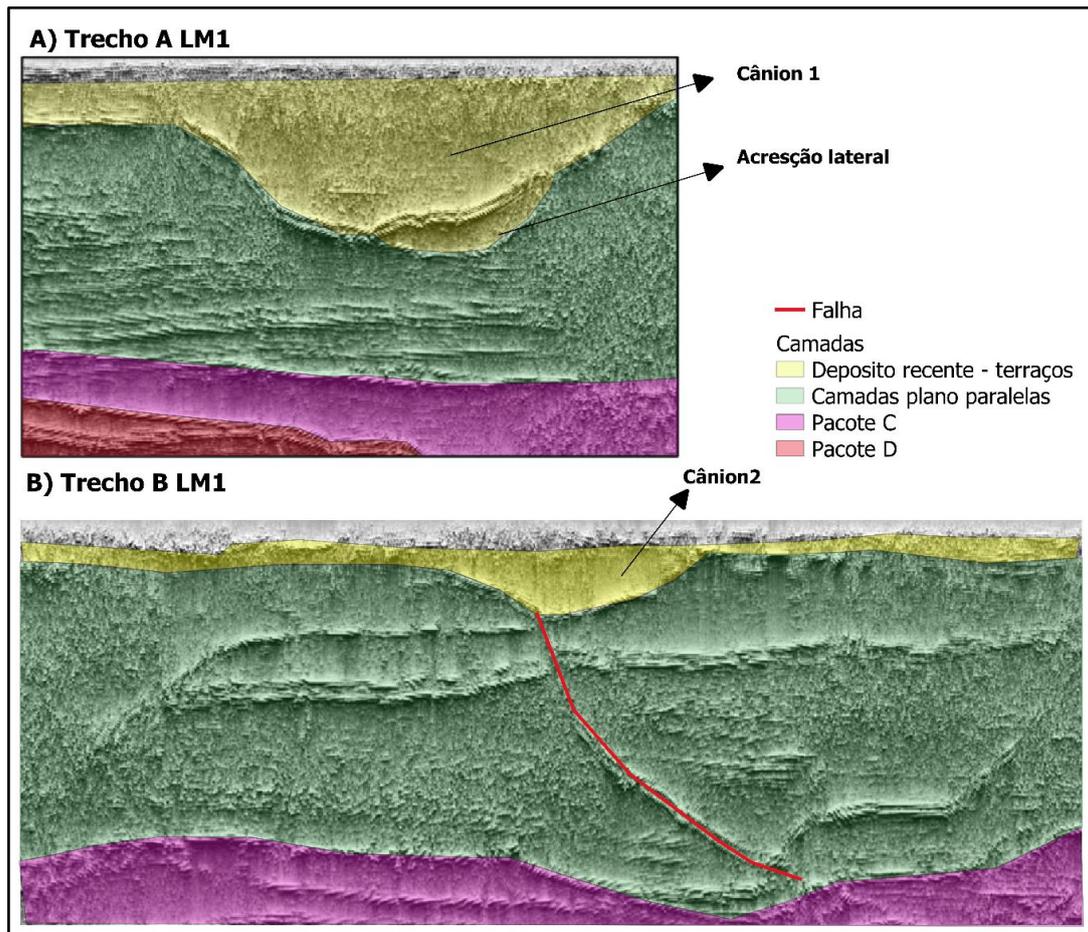


Figura 11. Seção sísmica com presença de vales escavados, cânions, canais e *scours* nas áreas mais superficiais da seção. Nessa imagem temos o resultado da análise de multi atributo (TECVA) que está realçando as principais feições morfológicas, dessa forma também é possível observar a orientação com 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 basculadas 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.

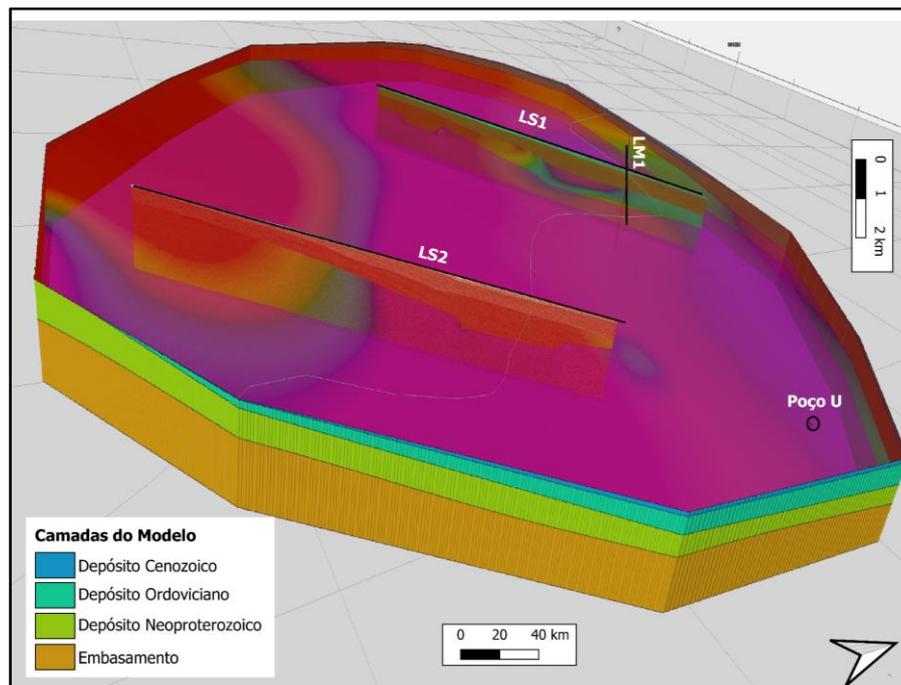


Figura 12. Visualização do modelo geral da área de estudo com as distribuições das camadas rochosas com ênfase para as rochas do embasamento e a delimitação do cânion na porção lateral da imagem.

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 estruturais, 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. ALCÁRCEL, 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. **Opentect 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. IBAÑEZ-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., RAMÍREZ, 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.