

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ANA CAROLINA GONÇALVES CEOLIN

**FORMAÇÃO GUARDA VELHA, CAÇAPAVA DO SUL, RS: MODELO DE
AFLORAMENTO ANÁLOGO EM SISTEMAS ALUVIAIS**

CAÇAPAVA DO SUL

2018

ANA CAROLINA GONÇALVES CEOLIN

**FORMAÇÃO GUARDA VELHA, CAÇAPAVA DO SUL, RS: MODELO DE
AFLORAMENTO ANÁLOGO EM SISTEMAS ALUVIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para obtenção do
Título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Guadagnin

Coorientador: Prof. Dr. Tiago Rafael Gregory

Caçapava do Sul

2018

ANA CAROLINA GONÇALVES CEOLIN

FORMAÇÃO GUARDA VELHA, CAÇAPAVA DO SUL, RS: MODELO DE
AFLORAMENTO ANÁLOGO EM SISTEMAS ALUVIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 18, de dezembro de
2018.

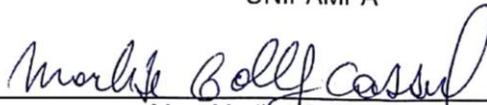
Banca examinadora:



Prof. Dr. Felipe Guadagnin
Orientador
UNIPAMPA



Msc. Sissa Kumaira
UNIPAMPA



Msc. Marliße Colling Cassel
UNISINOS

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu professor e orientador Felipe Guadagnin, cujos esforços possibilitaram a execução deste trabalho. Deixo registrada aqui minha eterna gratidão, respeito e admiração. Muito obrigada por todos os ensinamentos, pela motivação e paciência com que conduz tudo o que faz, pelas conversas e risadas no laboratório e em campo, por me incentivar e acreditar no meu potencial e principalmente pelo bom humor e amizade durante a minha formação como geóloga.

Agradeço aos meus amigos e parceiros de campo de TCC, Ezequiel, Sissa, Dani e Giovanni. Vocês foram essenciais para que esse trabalho fosse concluído. Muito obrigada de coração, por toda a ajuda com o TCC e pela amizade de vocês.

Aos meus queridos amigos, Karina e Mateus, que me acolheram em Caçapava e foram essenciais durante a minha caminhada. Muito obrigada por todos os trabalhos em grupo, pelo mapeamento, pelos encontros no Caminito, pelos dias de estudo árduo no frio de Caçapava madrugada adentro (incluindo a última semana que parecia não acabar nunca) e também por me ensinarem tanta coisa boa. Amo vocês, e que a nossa amizade seja além da Geologia.

Agradeço à Unipampa, professores e servidores, e principalmente a os meus colegas de curso, que se tornaram a minha família durante a graduação e que vão deixar saudades eternas. Agradeço especialmente à professora Dani, que se tornou uma amiga e que já considero da família. Muito obrigada por nos acolher e sempre nos ajudar de todas as formas.

Agradeço imensa e profundamente ao apoio da minha família durante a realização da minha graduação, principalmente aos meus pais que tiveram condições emocionais e financeiras para garantir os meus estudos durante toda a minha vida. Obrigada também aos meus irmãos, Pedro, João, Paulo e Maninha, por todos os momentos juntos. Obrigada vó e vó por acreditarem que eu conseguiria e por me amarem incondicionalmente. Obrigada Rodrigo, por toda a tua ajuda e por me acolher durante o meu estágio. Amo vocês demais.

Por fim, agradeço a todos que me acompanharam durante a graduação, mas especialmente a quem esteve presente, durante absolutamente todos os momentos, desde quando eu sequer sabia da existência da Geologia. À pessoa que esteve comigo durante incansáveis dias de vestibular e chorou junto quando soube que não havia passado na primeira tentativa. Amor, obrigada por não me deixar desistir, me apoiar na decisão de morar em Caçapava, e superar comigo anos de distância e dificuldades. Ao meu melhor amigo, companheiro, professor, e namorado nas horas vagas, o meu mais sincero obrigada.

RESUMO

No município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, afloram rochas sedimentares da Bacia do Camaquã pertencentes à Formação basal do Grupo Guaritas, denominadas de Formação Guarda Velha. Essa formação é composta por arenitos e conglomerados de sistemas aluviais do Neoproterozoico, constituindo um sistema fluvial entrelaçado com a influência de leques aluviais distais. O presente trabalho apresenta quatro modelos virtuais de afloramentos (MVA) dessa Formação, com o objetivo de propor um análogo de reservatório de hidrocarbonetos. Os MVA foram construídos no *Software PhotoScan* e integrados com dados de campo para a interpretação faciológica estratigráfica. Em campo, utilizou-se estratigrafia de sequências para realizar a análise das fácies e a descrição das sequências deposicionais. Nos MVA, foram realizadas interpretações fotofaciológica e fotoestratigráfica. As associações de fácies identificadas foram de leques aluviais e conglomerados e arenitos fluviais, sendo elas: brecha conglomerática polimítica com granulometria tamanho bloco e estratificação cruzada planar, correspondente a fotofácies de textura grossa, estratificação cruzada e a alta angulosidade dos grãos (*Gm*); brecha conglomerática polimítica com intercalação de lentes de conglomerados e arenitos (*Gms*); conglomerado arenoso com grânulos e seixos (*Gt*); conglomerado maciço com imbricação de clastos (*Gp*); arenitos médios a grossos com estratificação cruzada planar (*St*); arenitos médios a grossos com estratificação plano paralela (*Sh*); A interpretação do modelo de reservatório foi realizada no Software MOVE. A integração entre as superfícies dos quatro MVA serviu para determinar a conectividade entre as sequências, que ocorrem em sucessões de ciclos granodescrescentes ascendentes, sendo sucedidos ou lateralmente distribuídos com fácies de menor energia. Os ciclos de mais alta frequência variam entre algumas dezenas de centímetros até 5 metros e foram denominados de ciclos elementares. Os ciclos de menor frequência são definidos pelo padrão de empilhamento e aumento do volume das fácies *St* e *Sh* para o topo. Por fim, fez-se uma analogia entre as rochas da formação Guarda Velha com as rochas reservatório de sistemas fluviais entrelaçados do campo de Prudhoe, no Alasca.

Palavras-chave: Ambientes Aluviais. Reservatório Análogo. Modelos Virtuais de Afloramento. Grupo Guaritas. Formação Guarda Velha. Bacia do Camaquã.

ABSTRACT

Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, is characterized by outcrops of the basal unit of the Guaritas Group in the Camaquã Basin, named the Guarda Velha Formation. This formation is formed by neoproterozoic alluvial-dominated coarse-grained sandstones, pebbly sandstones and conglomerates. This work presents virtual outcrop models (VOM) of four outcrops of this Formation to build an analogue reservoir model. The VOM were built in PhotoScan Software and integrated with field data for the stratigraphic and faciological interpretation. In the field, sequence stratigraphy was used to perform the analysis of the facies and the description of the depositional sequences. On the VOM, photofacies and photostratigraphic interpretations were performed. The associations of facies identified were alluvial fans, conglomerates and fluvial sandstones. The facies are: conglomeratic breccia with planar cross bedding (Gm); polymorphic conglomerate with conglomerates and sandstone lenses (Gms); sandy conglomerate with gravel and pebbles (Gt); solid conglomerate with clast imbrication (Gp); medium to thick sandstones with planar cross stratification (St); sandstones with planar stratification (Sh); The interpretation of the reservoir model was performed in the MOVE Software, The surfaces of the four MVA were integrated to determine the connectivity between the sequences, which occur in successive upward ascending cycles, being succeeded or laterally distributed with lower energy facies. The highest frequency cycles range from a few tens of centimeters up to 5 meters and were termed elementary cycles. The lower frequency cycles are defined by the stacking pattern increasing the volume of the St and Sh facies to the top. Finally, an analogy was made between the rocks of the Guarda Velha formation and the braided river systems reservoir rocks of the Prudhoe oil and gas field in Alaska.

Keywords: Alluvial Systems. Analog Reservoir. Virtual Outcrop Models. Guaritas Group. Guarda Velha Formation. Camaquã Basin.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- - Escalas de resolução e cobertura de dados nas diferentes possibilidades de análise de um reservatório. O retângulo laranja mostra o intervalo de escala abrangido por afloramentos análogos de reservatórios..... 14
- Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo. A: Brasil, B: município de Caçapava do Sul e Porto Alegre, Rio Grande do Sul. C: Limite municipal de Caçapava do Sul e detalhe do local de estudo. D: Área em destaque em C, mostrando a BR-153 os afloramentos estudados 15
- Figura 3 - Mapa geotectônico do Escudo sul-riograndense. Os números 1,2,3 e 4 representam as Zonas de Cisalhamento Caçapava do Sul, Dorsal de Canguçu, Passo do Marinheiro, Lineamento Ibaré e Arroio Grande, respectivamente..... 17
- Figura 4 - Coluna estratigráfica esquemática das formações do Grupo Guaritas. 18
- Figura 6 - Área de configuração *upstream* versus área com configuração *downstream* em bacias sedimentares. Em padrões *downstream*, que incluem sistemas continentais, costeiros e marinho/lacustres, os padrões de empilhamento dependem da mudança na trajetória da linha de costa (2). Em áreas com padrão *upstream*, geralmente sistemas continentais sem a influência marinha, os padrões de empilhamento não dependem da trajetória da linha de costa (1).....22
- Figura 7 - Tendências deposicionais em áreas com padrão *upstream*. A diferença entre as arquiteturas deposicionais (canais amalgamados e canais isolados) é o resultado das diferenças entre as razões de agradação da planície de inundação. 23
- Figura 8 - Aquisição aérea para a construção do MDE. Em A, representação esquemática do MDE, mostrando as linhas de voo e as fotografias adquiridas (linha pontilhada preta). A variação nas cores (vermelho a azul) representam a quantidade de fotografias que imagearam um mesmo ponto (pixel) durante a aquisição. Regiões vermelhas na figura indicam que somente uma fotografia imageou aquela região, enquanto que os pontos em azul mais escuro abrangem mais de 9 fotos. Quanto mais fotografias imagearam o mesmo ponto, maior é a sobreposição do modelo. Conseqüentemente, as bordas do modelo produzirão maior distorção. Em B é mostrada uma das fotografias obtidas pelo VANT durante a aquisição aérea do MDE.32
- Figura 9 - Aquisição fotográfica dos afloramentos CE1, CE2 e CE3. A: Fotografia mostrando o VANT utilizado nas aquisições. Em B, C e D são mostrados os afloramentos CE3, CE1 e CE2, respectivamente. A linha preta pontilhada representa a linha de voo e as cores se 33
- Figura 10 - Aquisição aérea e terrestre do Afloramento AV1. Em A: Foto tirada de uma das laterais superiores na aquisição aérea, a cerca de 10m do afloramento. Em B, foto tirada

utilizando câmera convencional, da base do afloramento. Em C, linhas de voo da aquisição da parte superior e inferior, já integradas para compor o MVA final.	33
Figura 11 - Elipses de erro de localização das fotografias em cada MVA. As cores na legenda mostram a magnitude do erro em metros. Erros em Z são representados pela cor da elipse. Erros em X e Y são representados pelo formato da elipse. A: MDE; B: CE-1; C: AV-1; D:CE-2; E: CE-3.....	36
Figura 12 - Georreferenciamento dos MVA com base no MDE. As elipses nas figuras indicam o erro médio de localização dos pontos.....	38
Figura 13 - (A): Ortofotomosaico de MVA superior da área de estudo com a localização dos afloramentos analisados (AV-1, CE-1, CE-2 e CE-3). (B): Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo mostrando na escala de cores a variação das curvas de nível topográficas .	41
Figura 14 - Etapas de processamento do MVA do afloramento AV-1. A: nuvem esparsa de pontos. B: nuvem densa de pontos. C: malha triangulada texturizada (modelo 3D final)	42
Figura 15 - Etapas de processamento do MVA do afloramento CE-1. A: nuvem esparsa de pontos. B: nuvem densa de pontos. C: malha triangulada texturizada (modelo 3D final)	43
Figura 16 - Etapas de processamento do MVA do afloramento CE-2. A: nuvem esparsa de pontos. B: nuvem densa de pontos. C: malha triangulada texturizada (modelo 3D final)	43
Figura 17 - Etapas de processamento do MVA do afloramento CE-3. A: nuvem esparsa de pontos. B: nuvem densa de pontos. C: malha triangulada texturizada (modelo 3D final)	44
Figura 18 - Perfil vertical de fácies e fotofácies do AV-1.....	47
Figura 19 - Perfis verticais de fácies dos afloramentos CE-1 em A, CE-2 em B e CE3 em C	48
Figura 20 - Parte do perfil vertical do afloramento AV-1 comparado com o modelo tipo Scott de Miall (1977). (3) canal secundário; (4) barra truncada/cunha de areia; (5) Depósitos de fluxo de detritos; (6) barras superimpostas. As flechas no modelo indicam os a ciclicidade das sequências.....	49
Figura 21 - Ciclos granodecrescentes de mais alta frequência.....	50
Figura 22 - Seção geológica do Afloramento AF-1. Em preto estão marcados os limites dos ciclos elementares e em vermelho as fácies arenosas (St e Sh). Os triângulos vermelhos indicam os ciclos elementares e os ciclos de menor frequência.....	50
Figura 23 - Perfil vertical de fácies do afloramento AV-1 mostrando as sequências, os tratos de sistemas e limites de sequência.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Variações nas escalas de observação com técnicas de aquisição de dados em afloramentos, por fotoestratigrafia e sismoestratigrafia.	28
Tabela 2 - Principais litofácies em sistemas fluviais entrelaçados.	30
Tabela 3 - Informações técnicas das câmeras usadas para o imageamento.	34
Tabela 4 - Média do erro de localização da câmera em cada MVA (X-Leste, Y - Norte e Z - Altitude).....	37
Tabela 5 - Análise faciológica dos sistemas aluviais da Formação Guarda Velha, com base em Miall, (1977).....	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	13
1.2 Justificativa.....	14
2 ÁREA DE ESTUDO	15
2.1 Contexto Geológico.....	15
2.1.1 Grupo Guaritas	17
2.1.2 Formação Guarda-Velha	18
3. REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1 Fotogrametria Digital	19
3.2 Estratigrafia de Sequências.....	20
3.2.1 Acomodação e sedimentação	21
3.2.2 Padrões de Empilhamento <i>Upstream</i>	22
3.2.3 Unidades da Estratigrafia de Sequências	23
3.2.4 Tratos de Sistemas	24
3.2.5 Superfícies Estratigráficas em padrões <i>Upstream</i>	25
3.2.6 Escala e Hierarquia na Estratigrafia de Sequências	26
3.3 Fotoestratigrafia.....	27
3.4 Sistemas Fluviais Entrelaçados	29
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
4.1 Revisão Bibliográfica	31
4.2 Produção de MVA	31
4.2.1 Processamento no Agisoft PhotoScan Professional	34
4.2.2 Resolução e georreferenciamento dos MVA	35
4.3 Análise Estratigráfica	38
4.3.1 Análise Faciológica	39

4.3.2 Análise Fotoestratigráfica	39
4.4 Integração dos MVA e Geração do Modelo de Reservatório.....	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1 Construção de MVA.....	40
5.1.1 MDE	40
5.1.2 MVA	41
5.2 Análise estratigráfica	44
5.2.1 Fácies e fotofácies	44
5.2.2 Associações de fácies e elementos arquiteturais	45
5.2.3 Estratigrafia de Sequências	49
5.3 Analogia ao reservatório de Prudhoe.....	52
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53

1 INTRODUÇÃO

A modelagem de reservatórios é uma técnica amplamente utilizada na indústria do petróleo durante as diversas etapas da exploração e produção de óleo e gás (HOWELL, MARTINIUS & GOOD, 2014). Os modelos são construídos para (i) testar a viabilidade econômica de projetos durante a avaliação de reservas; (ii) otimizar a locação e o espaçamento entre poços e aumentar a recuperação de óleo durante o desenvolvimento; (iii) monitorar e prever a performance de novos poços durante a produção; e (iv) confirmar o abandono do reservatório na fase final de produção (HOWELL, MARTINIUS & GOOD, 2014). Modelos de reservatório têm o objetivo de facilitar o entendimento da complexa distribuição tridimensional de rochas e fluidos em subsuperfície e diminuir incertezas associadas a prospecção de hidrocarbonetos (HOWELL, MARTINIUS & GOOD, 2014).

O zoneamento de reservatórios e não reservatórios é realizado pela integração dos parâmetros petrofísicos em um arcabouço da estratigrafia de sequências de alta resolução (CATUNEANU, 2017). A maioria dos modelos de subsuperfície são construídos a partir da integração entre dados sísmicos e perfis geofísicos de poços, que garantem bons resultados e são indispensáveis para o estudo de reservatórios (PRINGLE et al., 2006). Entretanto, somente o uso de técnicas “tradicionais” de levantamento de dados pode acarretar na omissão de relevantes informações geológicas de pequena escala, que são importantes para a otimização da produção de óleo e gás (PRINGLE et al., 2006).

Com o intuito de complementar o espaçamento entre dados de poços e a baixa resolução dos dados sísmicos, os afloramentos análogos de reservatórios auxiliam na definição de parâmetros a serem aplicados em reservatórios naturais (HOWELL, MARTINIUS & GOOD, 2014). A seleção de afloramentos adequados para o estudo de análogos requer particular semelhança geológica com o reservatório em subsuperfície, excelente exposição tridimensional e dimensões suficientemente extensas que consigam representar as heterogeneidades na escala correta (PRINGLE et al., 2006).

Métodos recentes aplicados ao estudo e classificação de afloramentos análogos de reservatórios são baseados na construção de Modelos Virtuais de Afloramentos (MVA) utilizando técnicas de mapeamento digital (*e.g.*, ENGE et al., 2007; HODGETTS, 2013; ELTOM, 2016). A utilização de MVA se aplica não só à modelagem de reservatórios, mas a diversas áreas incluindo geologia estrutural (*e.g.*, TAVANI, CORRADETTI & BILLI, 2016;

CAWOOD et al., 2017), estratigrafia (e.g., NESBIT et al., 2018) e mapeamento geológico (JONES et al., 2004). Uma das formas de construção de MVA é baseada na aquisição de fotografias de afloramentos combinada ao uso dos algoritmos *Structure from Motion - Multiview Stereo* (SfM-MVS), que reconstroem através de *softwares* a superfície do afloramento originando modelos 3D foto-realistas (CARRIVICK, SMITH & QUINCEY, 2016; TAVANI, CORRADETTI & BILLI, 2016). A interpretação estratigráfica dos MVA é realizada a partir de critérios de interpretação fotoestratigráficos pela definição de fotofácies, foto-horizontes e fotosuperfícies com base na estratigrafia de sequências (e.g., SGAVETTI, 1991).

Um conjunto de unidades estratigráficas depositadas em sistemas continentais, transicionais e marinhos estão preservadas na Bacia do Camaquã, região de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. Afloramentos considerados como bons análogos de reservatórios apresentam alta qualidade de exposições tridimensionais, diversidade de sistemas deposicionais e baixo grau de deformação e intemperismo. A Formação Guarda Velha, unidade basal do Grupo Guaritas - Supergrupo Camaquã, contém o registro da deposição de um sistema deposicional fluvial entrelaçado com a influência de leques aluviais distais (ALMEIDA, 2009) e está amplamente exposta na região central da Bacia do Camaquã, ocorrendo na forma de escarpas que podem atingir até 40 m de altura.

Neste trabalho, a análise estratigráfica foi realizada integrando dados de campo e MVA para a construção de um modelo de reservatório análogo em sistemas deposicionais fluviais. Foram utilizados algoritmos SfM-MVS para a construção dos MVA por meio de fotografias adquiridas de forma terrestre e aérea. Os dados estratigráficos foram integrados aos MVA, sobre os quais foi construído o modelo de reservatório. O modelo permite extrair parâmetros quantitativos sobre a heterogeneidade de reservatórios aluviais, contribuindo com o entendimento da distribuição das propriedades físicas.

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é produzir um modelo análogo de reservatório para sistemas deposicionais aluviais, com base nas unidades estratigráficas de alta resolução da Formação Guarda Velha.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

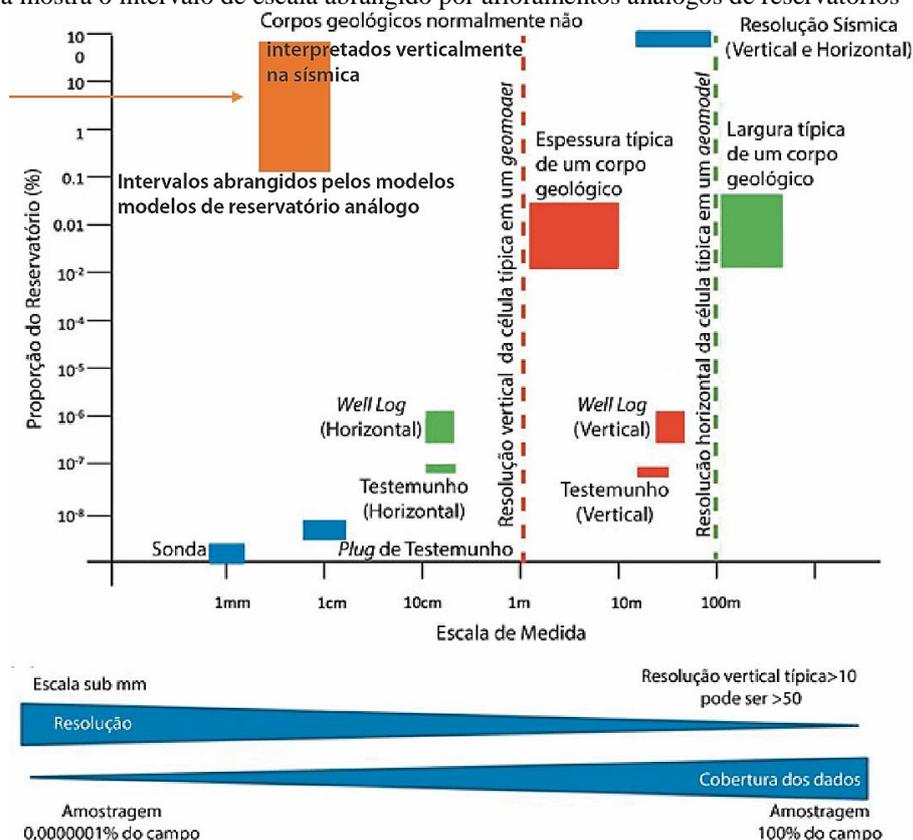
1. Realizar análise de fácies e associações de fácies utilizando dados de campo e MVA.

2. Definir padrões de empilhamento, superfícies limítrofes, tratos de sistemas e sequências deposicionais, utilizando critérios de fotoestratigrafia de sequências;
3. Integrar os dados obtidos em um modelo de reservatório análogo.

1.2 Justificativa

Sísmica, *Well logs* (perfis geofísicos de poços) e testemunhos de sondagem são os únicos métodos utilizados durante a exploração e produção de hidrocarbonetos (HOWELL, MARTINIUS & GOOD, 2014). *Well-logs* são informações de alta resolução vertical e baixa taxa de amostragem horizontal. Dados sísmicos cobrem grandes áreas, mas possuem baixa resolução vertical, deixando de imagear inúmeras feições de menor escala (Fig. 1). A modelagem de reservatórios é aplicada na obtenção de parâmetros quantitativos a serem utilizados na modelagem de reservatórios naturais, uma vez que o principal desafio na indústria do petróleo é definir a distribuição das propriedades físicas e dos fluidos em subsuperfície (HOWELL, MARTINIUS & GOOD, 2014).

Figura 1- - Escalas de resolução e cobertura de dados nas diferentes possibilidades de análise de um reservatório. O retângulo laranja mostra o intervalo de escala abrangido por afloramentos análogos de reservatórios

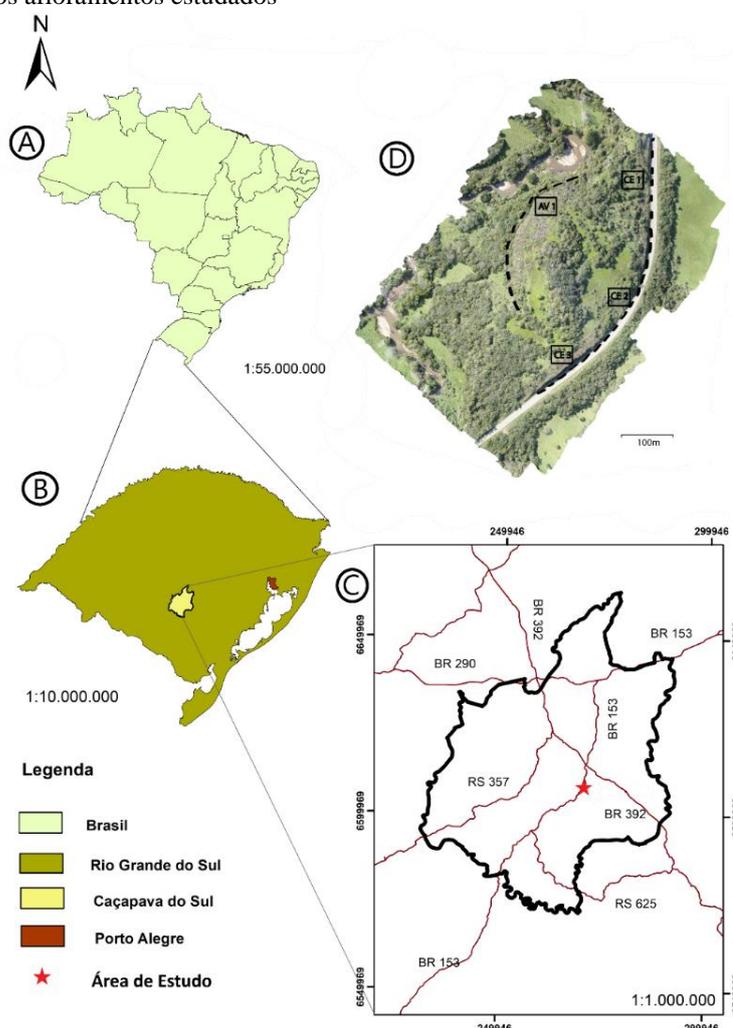


Fonte: Extraído e modificado de (HOWELL, MARTINIUS & GOOD, 2014).

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Fig. 2) está localizada no município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. O acesso ao local se dá através da BR-392 sentido Pelotas, 22 km a sudeste da zona urbana de Caçapava do Sul. Após o trevo de entroncamento das BR-392 com a BR-153, segue-se pela BR-153 até o km 524. Os afloramentos localizam-se antes da ponte sobre o arroio Irapuá, em sentido a Bagé. No local, o acesso a um dos afloramentos é feito por uma estrada vicinal à direita e os outros três afloramentos localizam-se na margem da rodovia BR-153.

Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo. A: Brasil, B: município de Caçapava do Sul e Porto Alegre, Rio Grande do Sul. C: Limite municipal de Caçapava do Sul e detalhe do local de estudo. D: Área em destaque em C, mostrando a BR-153 os afloramentos estudados



Fonte: Adaptado da base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul (HASENACK & WEBER, 2010; Biblioteca Digital FEPAM, 2005).

2.1 Contexto Geológico

A Bacia do Camaquã compreende uma sequência de rochas vulcânicas e sedimentares siliciclásticas, localizada na porção centro sul do Rio Grande do Sul, formada durante as últimas

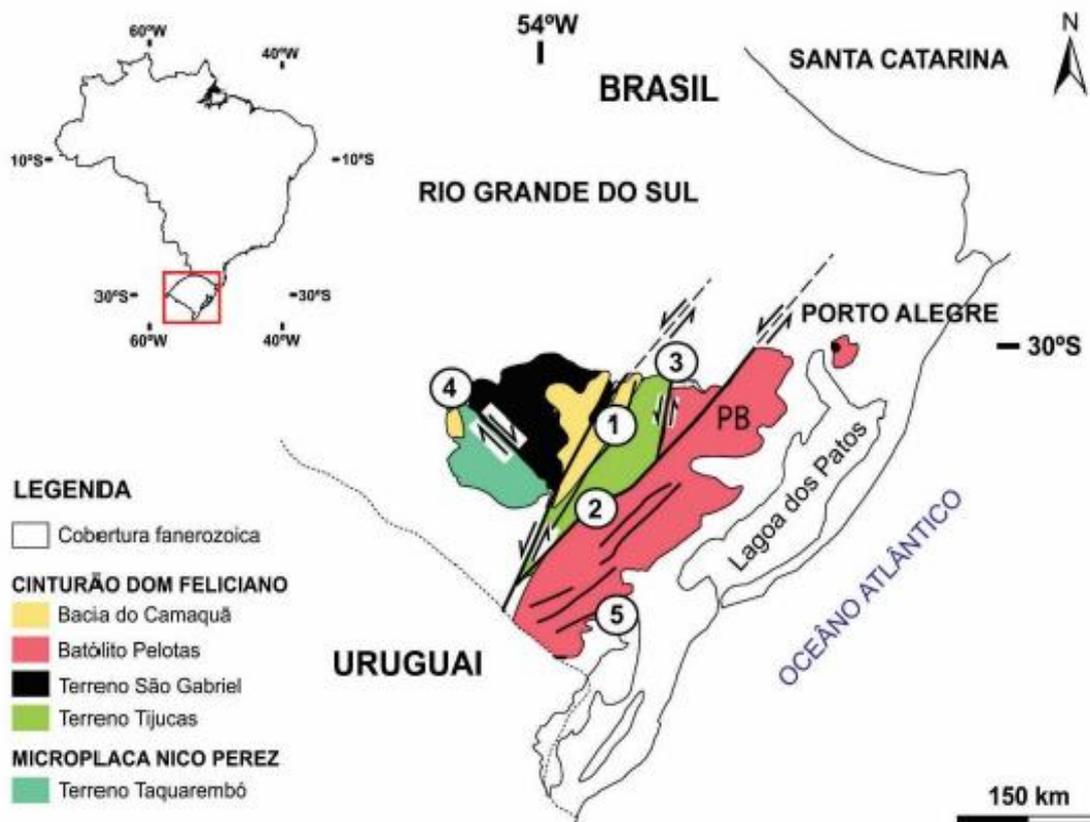
fases do Ciclo Brasileiro do Cinturão Dom Feliciano (*e.g.*, FRAGOSO-CÉSAR, 1984; CHEMALE JR. et al., 1995; PAIM, CHEMALE JR. & CUNHA, 2000; HARTMANN, SANTOS & MCNAUGHTON, 2008). A Bacia está inserida sobre o Terreno São Gabriel e o Cráton Rio de La Plata, e é margeada pelos Cinturões Tijuca e Dom Feliciano (PAIM, CHEMALE JR. & WILDNER, 2014). O Escudo Sul-rio-grandense é subdividido em quatro domínios (Fig. 3): o Terreno Taquembó, situado na Microplaca Nico Perez (PHILIPP, PIMENTEL & CHEMALE JR., 2016), os Terrenos São Gabriel e Tijuca, e o Batólito Pelotas, localizados no Cinturão Dom Feliciano (HARTMANN, CHEMALE JR. & PHILIPP, 2007).

O Cinturão Dom Feliciano desenvolveu-se no sudeste da América do Sul como resultado da colisão dos crátons Rio de La Plata e Kalahari, do Neoproterozoico até o Eopaleozoico (CHEMALE JR., 2000; HARTMANN, CHEMALE JR., PHILIPP, 2007; CHEMALE JR., ALMEIDA & MACHADO, 2012). A formação e evolução tectônica da Bacia do Camaquã está associada a um sistema de riftes distensionais anorogênicos ocorridos no fim do Neoproterozoico, evento que deu origem a uma série de bacias que ocupam um mesmo lócus deposicional atualmente (FRAGOSO-CÉSAR et al., 2003; ALMEIDA et al., 2009).

A Bacia do Camaquã engloba as rochas do Supergrupo Camaquã, reconhecidas e caracterizadas por Fragoso-César et al., (2003), sendo elas da base para o topo: Grupo Maricá, formado por depósitos marinhos e fluviais; Grupo Bom Jardim, composto por depósitos aluviais e lacustres e também por rochas vulcânicas; Formação Acampamento Velho, formada por rochas vulcânicas ácidas e básicas; Grupo Santa Bárbara, formada por depósitos aluviais e costeiros; e Grupo Guaritas, composto por depósitos continentais aluviais e eólicos (ALMEIDA, 2005).

A estratigrafia da Bacia do Camaquã é descrita em diversos trabalhos (*e.g.*, PAIM, 1995; PAIM & SCHERER, 2002; JANIKIAN 2005; FAMBRINI et al., 2006; ALMEIDA et al., 2009; ALMEIDA, 2012) bem como a proveniência sedimentar do Grupo Guaritas (NÓBREGA, 2011; GODINHO et al., 2013). No entanto, poucos trabalhos descrevem, ainda que muito sucintamente, a Formação Guarda Velha (RIBEIRO & LICHTENBERG, 1978). Santos (2010), realiza um estudo detalhado da arquitetura deposicional nessa Formação, aplicando imagens de alta resolução para análise estrutural. Outros autores realizaram trabalhos com ênfase na análise faciológica regional das rochas da Bacia do Camaquã (HARTMANN, CHEMALE JR., PHILIPP, 2007) e deram contribuição ao entendimento do contexto tectônico em que a Bacia se encontra, a exemplo do Rife Guaritas (ALMEIDA, 2005; 2009).

Figura 3 - Mapa geotectônico do Escudo sul-riograndense. Os números 1,2,3 e 4 representam as Zonas de Cisalhamento Caçapava do Sul, Dorsal de Canguçu, Passo do Marinheiro, Lineamento Ibaré e Arroio Grande, respectivamente.



Fonte: Extraído e modificado de (PHILIPP, PIMENTEL & CHEMALE JR., 2016).

2.1.1 Grupo Guaritas

O Grupo Guaritas (ROBERTSON, 1966) é a unidade de rochas sedimentares siliciclásticas do Eocambriano que aflora no topo da Bacia do Camaquã, situada no Escudo Sul-riograndense (ALMEIDA, et al. 2009). Compreende uma sucessão de sedimentos de mais de 1.500 metros de espessura de arenito conglomerático, conglomerado, ritmito areno-pelítico e arenito fino a médio, com estruturas cruzadas acanaladas de grande porte (ALMEIDA, et al. 2009; Fig. 4).

O grupo Guaritas compreende as seguintes unidades da base para o topo: Formação Guarda Velha (RIBEIRO & LICHTENBERG, 1978), composta por arenitos, arenitos conglomeráticos e conglomerados de origem fluvial; Formação Varzinha (RIBEIRO & LICHTENBERG, 1978), composta por ritmitos (intercalações de arenitos e pelitos) de fácies fluviais e aluviais distais; Formação Pedra Pintada (FRAGOSO-CÉSAR, 1991), caracterizada por arenitos finos com estratificações cruzadas acanaladas de ambiente eólico, com fácies de dunas e interdunas e canais de rios efêmeros; Formação Pedra das Torrinhas (FRAGOSO-

CÉSAR, 1991), representada por arenitos conglomeráticos e conglomerados de fácies de leques aluviais; e Formação Serra do Apertado (ALMEIDA, 2005), caracterizada por arenitos finos a grossos e conglomerados fluviais (ALMEIDA, 2009).

Figura 4 - Coluna estratigráfica esquemática das formações do Grupo Guaritas.

Estágios	W	Arquitetura da Bacia	E	Eventos Tectônicos
Pós-rifte inicial		Fm. Serra do Apertado		Subsidência Termal
Rifte-clímax intermediário à tardio	Fm. Pedra das Torrinhas Fm. Varzinha	Fm. Pedra Pintada	Fm. Pedra das Torrinhas Fm. Varzinha	Soerguimento dos depósitos a leste e aumento da subsidência
Rifte-clímax inicial		Fm. Guarda Velha		Desenvolvimento das falhas principais
Início do rifte				Início da subsidência

Fonte: Extraído e Modificado de Almeida et al., (2009).

2.1.2 Formação Guarda-Velha

Ribeiro e Lichtenberg (1978), em síntese sobre a geologia do Escudo Sul rio-grandense, propuseram a formalização de dois novos membros do Grupo Guaritas: Formação Guarda Velha e Formação Varzinha. Segundo os mesmos autores, as rochas da Formação Guarda Velha compreendem “*detritos rudáceos, onde avultam brechas de tálus e fanglomerados que lateralmente gradua para arenito arcósicos grosseiros, tendo como localidade tipo o Passo da Guarda Velha*”.

Esta Formação se depositou sob um sistema de canais fluviais entrelaçados e as associações de fácies constituem principalmente arenitos conglomeráticos e conglomerados, organizados em ciclos de granodecrescência ascendente de escala métrica com bases erosionais (ALMEIDA et al., 2009). Nóbrega (2011) define a fácies encontrada nessa Formação como sendo “ACc”: Arenito Conglomerático e Conglomerado com estratificação cruzada acanalada em séries decimétricas a métricas, formada por migração de barras de cascalho sob regime de fluxo inferior, pertencentes a um sistema fluvial entrelaçado.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Neste trabalho foram utilizados métodos de construção, interpretação e integração dos dados em MVA, análise faciológica (fotofácies) e análise estratigráfica. O zoneamento do afloramento análogo foi feito utilizando conceitos da estratigrafia de sequências de alta resolução. Para isso, buscou-se na literatura informações necessárias para a aplicação e integração desses métodos, tais como aquisição de dados de fotogrametria, fotoestratigrafia e estratigrafia de sequências, associadas à sistemas aluviais.

3.1 Fotogrametria Digital

A fotogrametria é uma ferramenta da área do sensoriamento remoto que utiliza pares de fotografias sobrepostas para adquirir dados da superfície topográfica em 3D (CARRIVICK, SMITH, QUINCEY, 2016). A partir da popularização das câmeras digitais, tem-se utilizado a fotogrametria digital nas geociências, visando alta qualidade de imagem, melhores equipamentos e menor tempo de aquisição de imagens (CARRIVICK, SMITH, QUINCEY, 2016). A fotogrametria digital possibilita técnicas avançadas de aquisição e processamento de dados através de uma série de algoritmos, criados para realizar a triangulação por meio das fotografias tiradas e reconstruir superfícies em 3D em softwares (CARRIVICK, SMITH, QUINCEY, 2016).

O conjunto de algoritmos *Structure from Motion – Multiview Stereo* (SfM-MVS) opera em *Softwares*, reconhecendo múltiplos pontos iguais nas imagens sobrepostas para reconstruir a geometria de feições e objetos (CARRIVICK, SMITH, QUINCEY, 2016). A aplicação desta técnica de imageamento utilizando o algoritmo para processar superfícies de afloramentos é utilizada para a construção de Modelos Virtuais de Afloramentos, utilizando o Software *PhotoScan*, da *Agisoft* (e.g., GUADAGNIN et al. 2017)

Para a utilização do SfM-MVS as fotografias devem captar a máxima tridimensionalidade da feição de interesse (preferencialmente possuindo uma cobertura de 360°) e um mesmo ponto deve aparecer em no mínimo 2 fotografias, tiradas de posições diferentes. Sendo assim, sensores não estáticos, ou seja, equipamentos com livre mobilidade, como os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) são a melhor alternativa para imagear superfícies utilizando esta técnica (CAWOOD et al.,2017).

O principal objetivo ao aplicar essa técnica é obter fotografias nítidas da feição de interesse a uma resolução suficiente para que o algoritmo as reconheça e consiga realizar a

triangulação. A resolução dos modelos é determinada pela distância entre a câmera e a feição, tamanho do objeto, condições de luminosidade e a quantidade de imagens adquiridas da mesma feição (CARRIVICK, SMITH, QUINCEY, 2016). O recomendado é que se utilize câmeras com no mínimo 5 Megapixels e no máximo 40 Megapixels, pois imagens muito pesadas aumentam o tempo de processamento, sendo inviáveis (CARRIVICK, SMITH, QUINCEY, 2016).

Um dos principais softwares comerciais disponíveis para o processamento de imagens utilizando os algoritmos SfM-VMS é o *PhotoScan*, da *Agisoft* (CARRIVICK, SMITH, QUINCEY, 2016). O processamento no *PhotoScan* consiste na construção de nuvens de pontos (construídas com base no reconhecimento de múltiplos pontos em comum pelo *SfM-MVS*), construção de uma malha triangulada (mesh) e texturização da malha triangulada. É possível também editar as nuvens de pontos, construir ortofotomosaicos e exportar os Modelos Digitais de Elevação (MDE) e modelos 3D. O *PhotoScan* exporta dados em seis principais formatos (*.obj, *.txt., *.las, *.ply, *.u3d e *.pdf). Outra plataforma associada ao *PhotoScan* é o “*Sketchfab*”, onde usuários realizam o upload de seus modelos prontos e compartilham com outros usuários (CARRIVICK, SMITH, QUINCEY, 2016).

3.2 Estratigrafia de Sequências

A estratigrafia de seqüências é uma metodologia em que se estuda o registro rochoso a partir da correlação e integração de superfícies no tempo e no espaço, que delimitam padrões de empilhamento dos estratos, para descrever, interpretar e classificar rochas sedimentares (CATUNEANU, 2017). Segundo esse autor, a partir do reconhecimento de discordâncias no registro sedimentar, subdivide-se as sucessões sedimentares em unidades separadas por pausas na deposição.

A principal unidade da estratigrafia de seqüências é a Sequência Estratigráfica, que é constituída por tratos de sistemas deposicionais. A definição de Sequência sofreu modificações, segundo Catuneanu (2017), devido à escala de análise adotada em relação às seqüências, que diminuiu à medida que os estudos nessa área foram avançando. Atualmente, segundo o autor, considera-se que uma seqüência seja “*uma unidade limitada por qualquer superfície da estratigrafia de seqüências*”.

Os padrões de empilhamento dos estratos determinam a arquitetura estratigráfica do registro sedimentar, e são fundamentais para a aplicação da estratigrafia de seqüências, pois sua

identificação proporciona a base para a definição de todas as unidades e superfícies estratigráficas (CATUNEANU, 2017). De acordo com o autor, cada tipo de padrão de empilhamento define um trato de sistema, e as mudanças nos tratos de sistemas definem as superfícies estratigráficas. Superfícies de sequências estratigráficas são tipos de contatos que caracterizam os limites entre tratos de sistemas, marcando a mudança no padrão de empilhamento entre a sequência abaixo e acima do contato (CATUNEANU, 2017).

3.2.1 Acomodação e sedimentação

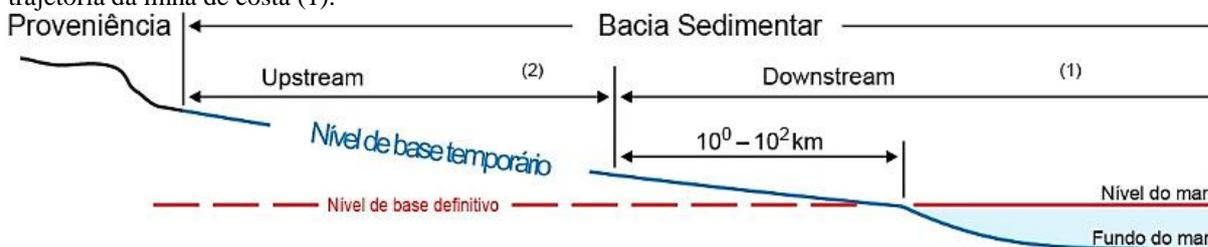
O conceito de acomodação define o espaço disponível para o preenchimento dos sedimentos (JERVEY, 1988 *apud* CATUNEANU et al., 2011) durante a formação de uma bacia sedimentar (tectônica e mudanças no nível do mar/lago). A linha que marca o topo da acomodação disponível é representada pelo nível eustático marinho em bacias próximas ao oceano, e pela elevação do nível de base em bacias intracontinentais (CATUNEANU, 2017).

A acomodação pode ser modificada pela interação entre diversos controles independentes que podem operar simultaneamente em uma ampla escala de tempo. A acomodação pode ser totalmente preenchida ou não preenchida, dependendo da localização da superfície deposicional em relação à linha de referência (Fig. 5). Geralmente as bacias sedimentares evoluem de um estágio não preenchido para totalmente preenchidas, à medida que a sedimentação supera a acomodação (CATUNEANU, 2017).

A sedimentação é a variável que define o desenvolvimento dos padrões de empilhamento dos estratos, e é controlada por todos os processos que modificam o equilíbrio entre aporte de sedimentos e a energia do sistema, incluindo a acomodação, clima, soerguimento da área fonte e controles autogênicos (CATUNEANU, 2017). Ainda segundo o mesmo autor, os padrões de empilhamento podem ser gerados com ou sem a influência das mudanças relativas no nível do mar/lago, e se aplicam na definição deste autor como padrões “*downstream*” e “*upstream*”, respectivamente.

Os controles *downstream* são aqueles gerados abaixo do nível de base sedimentar, e os padrões *upstream* são formados acima do nível de base (Fig. 6). Neste trabalho serão discutidos os controles *upstream*, levando em consideração que os sistemas aluviais do Grupo Guaritas da Bacia do Camaquã não sofreram influência marinha durante a deposição.

Figura 5 - Área de configuração *upstream* versus área com configuração *downstream* em bacias sedimentares. Em padrões *downstream*, que incluem sistemas continentais, costeiros e marinho/lacustres, os padrões de empilhamento dependem da mudança na trajetória da linha de costa (2). Em áreas com padrão *upstream*, geralmente sistemas continentais sem a influência marinha, os padrões de empilhamento não dependem da trajetória da linha de costa (1).



Fonte: Extraído e modificado de Catuneanu, 2017.

3.2.2 Padrões de Empilhamento *Upstream*

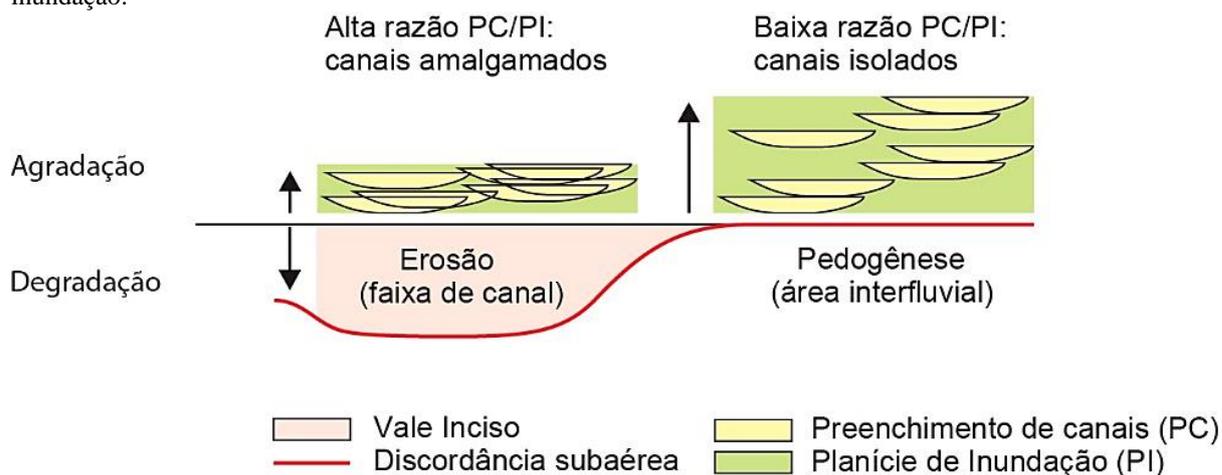
Desenvolvidos sem a influência dos níveis relativos marinho e/ou lacustre, os padrões *upstream* (rio acima) são controlados por fatores que alteram o equilíbrio entre aporte de sedimentos e fluxo de energia, como mudanças tectônicas da área fonte, alterações climáticas, geração de acomodação e controles autogênicos em variadas escalas de tempo (CATUNEANU, 2017). Este autor considera que em sistemas fluviais, ocorrem basicamente três processos que interferem na formação dos canais e elementos deposicionais, sendo eles: taxa de agradação da planície de inundação; grau de confinamento dos canais; e a frequência de avulsão dos canais (mudanças abruptas no curso e direção do rio).

A acomodação, embora importante, não é o único fator controlador dos padrões de empilhamento *upstream*. Segundo Miall (2014), estudos recentes de classificação de padrões de empilhamento em sistemas fluviais propõem uma relação direta entre acomodação e grau de amalgamação dos canais fluviais, ainda como uma simplificação de nomenclatura (CATUNEANU, 2017). As taxas de agradação fluvial dependem de todos os fatores que controlam a sedimentação, incluindo acomodação, clima, tectonismo da área fonte e mudanças autocíclicas na distribuição dos sedimentos. O grau de amalgamação dos canais é proporcional às taxas de migração lateral e à frequência de avulsão, sendo inversamente proporcional à taxa de agradação (CATUNEANU, 2017).

O desenvolvimento de um alto grau de amalgamação em canais fluviais, antes chamado de padrão de empilhamento de “baixa acomodação”, pode ser ocasionado por três fatores, segundo Catuneanu (2017): baixas taxas de agradação da planície de inundação, canais não confinados e frequência elevada de modificação na direção dos canais (taxa de avulsão). Já o desenvolvimento de um baixo grau de amalgamação de canais em sistemas fluviais é

ocasionado por altas taxas de agradação da planície de inundação, alto grau de confinamento e baixa frequência de avulsão de canais. Essa arquitetura fluvial, definida por canais isolados com depósitos de planície de inundação, foi por muito tempo referida por “padrão de empilhamento de alta acomodação” (CATUNEANU, 2017; Fig.7).

Figura 5 - Tendências deposicionais em áreas com padrão upstream. A diferença entre as arquiteturas deposicionais (canais amalgamados e canais isolados) é o resultado das diferenças entre as razões de agradação da planície de inundação.



Fonte: Extraído e modificado de Catuneanu, 2017.

3.2.3 Unidades da Estratigrafia de Sequências

Segundo Catuneanu (2017), existe uma grande variedade nos tipos de unidade de sequência estratigráfica, pois elas são determinadas a partir da configuração específica de padrões de empilhamento dos estratos e superfícies limítrofes, o que é função da tectônica e da configuração deposicional a que foram submetidas. Segundo o autor, todos os tipos de unidades de sequência consistem em estratos geneticamente relacionados, podendo ser classificadas independentemente de sua escala observacional ou da sua relação aos ciclos estratigráficos de diferentes magnitudes, não havendo uma padronização para a escala dessas unidades.

Duas unidades ocorrem em padrões *upstream*: a sequência estratigráfica e a sequência deposicional, e embora existam outros tipos de unidades, como a sequência estratigráfica genética e a sequência transgressiva-regressiva, estas não serão abordadas por somente ocorrerem em padrões *downstream*. A sequência estratigráfica pode ser observada em diferentes escalas, dependendo do propósito do estudo e da resolução dos dados disponíveis. Segundo Catuneanu (2017), a escala pode variar desde a observação de uma camada - que

representa um ciclo sedimentológico - até escalas maiores, como um trato de sistemas e a identificação de um sistema deposicional.

De acordo com Catuneanu (2017), uma sequência estratigráfica corresponde a um ciclo completo de mudanças no padrão de empilhamento, que é limitada na base e no topo pelo mesmo tipo de superfície estratigráfica. Por exemplo, quando se identifica uma superfície de inundação máxima (SIM), até quando se possa identificar a próxima SIM na sucessão estratigráfica por exemplo, esse padrão configura uma Sequência Estratigráfica, na condição de que os estratos entre as duas superfícies pertençam a um ciclo de mudanças na acomodação e no aporte de sedimentos em uma determinada escala de observação.

Dentro de uma sequência se encontram os tratos de sistemas, pois a variação que define a sequência representa as mudanças nos ciclos estratigráficos. Ainda segundo Catuneanu (2017), quando uma sequência se desenvolve preservando todos os tipos de tratos de sistemas até estar completa, diz-se que se trata de uma “sequência convencional”. Ocorrem também as sequências “não convencionais”, quando algum trato de sistema não se desenvolve ou não está presente no registro. O requisito para que seja definida uma sequência é apenas as superfícies que a limitam, na base e no topo, que devem ser do mesmo tipo, independentemente de nela constar todos os tipos de padrões de empilhamento ou todos os tipos de superfícies (CATUNEANU, 2017).

A sequência deposicional é uma sequência estratigráfica limitada por discordâncias subaéreas ou conformidades correlativas, que podem ocorrer tanto em padrões *upstream* como em *downstream* (CATUNEANU, 2017). A sequência deposicional tem relação com o tipo de superfície pela qual é limitada. Segundo este autor, todos os tipos de sequências deposicionais compreendem ciclos completos de mudanças na acomodação e relacionam o limite de sequências a estágios de acomodação negativa (CATUNEANU, 2017).

3.2.4 Tratos de Sistemas

Tratos de sistemas são as subdivisões de uma sequência, interpretados de acordo com os padrões de empilhamento e tipos de superfícies estratigráficas, especificamente para cada bacia (CATUNEANU, 2017). Segundo este autor, os tratos de sistemas, assim como as sequências, também podem ser observados em diferentes escalas. Considerando que os sistemas fluviais abordados configuram um padrão de uma configuração *upstream*, os tratos de sistemas são independentes de variações na linha de costa ou de alterações nos níveis do mar/lago e são

definidos através da razão alta ou baixa entre depósitos de canal e depósitos da planície de inundação. Este autor define dois tipos de trato de sistemas, sendo eles de Alta Amalgamação e de Baixa amalgamação.

O trato de sistemas de Alta Amalgamação é caracterizado pelo padrão de empilhamento dominado por canais em relação aos depósitos de planície de inundação. A formação desse trato de sistemas é ocasionada pelas baixas taxas de agradação da planície de inundação, formação de canais não confinados e alta frequência de avulsão dos canais (CATUNEANU, 2017). Por outro lado, a agradação intensa da planície de inundação, somado com baixas taxas de avulsão dos canais, configura o padrão de empilhamento de baixa amalgamação, que forma o trato de sistemas de Baixa Amalgamação. Nesse padrão é comum os canais ocorrerem como elementos deposicionais isolados (CATUNEANU, 2017).

Durante a deposição, a acomodação gerada pela subsidência da bacia já está totalmente preenchida durante o desenvolvimento dos sistemas *upstream*. Segundo Catuneanu (2017), embora a acomodação seja um aspecto importante, os processos fluviais são influenciados também por outros fatores que modificam o equilíbrio do sistema. A longo prazo, as taxas de agradação fluvial excedem as taxas de subsidência, levando ao total preenchimento das bacias. De acordo com Miall (2014), a acomodação somente não é capaz de explicar o desenvolvimento dos padrões de empilhamento, principalmente quando as taxas de acumulação sedimentar não correspondem a criação de espaço de acomodação.

3.2.5 Superfícies Estratigráficas em padrões *Upstream*

Superfícies estratigráficas são tipos de contatos estratigráficos que ficam visíveis no registro e servem como limite de tratos de sistemas, marcando a mudança no padrão de empilhamento entre as unidades abaixo e acima da superfície (CATUNEANU, 2017). Existem sete tipos de superfícies estratigráficas: Discordância Subaérea, Superfície basal de Regressão Forçada, Superfície de Regressão Máxima, Superfície de Inundação Máxima, Superfície Transgressiva de Erosão, Superfície Regressiva de Erosão Marinha. Elas correspondem a “horizontes” estratigráficos, que normalmente são fisicamente explicados, dependendo do local da deposição e seu estado de preservação.

Catuneanu (2017) faz uma síntese das sete superfícies. Entretanto, o contexto tectônico dos sistemas aluviais do grupo Guaritas, caracterizado por um sistema fluvial continental de padrão *upstream*, não permite o uso de todas essas superfícies, sendo encontrada dentre as

superfícies caracterizadas por Catuneanu (2017) apenas a discordância subaérea. Pulsos que caracterizam mudanças de energia no sistema foram caracterizados apenas como Limites de sequências, não sendo necessariamente considerados discordâncias no registro.

A discordância subaérea, definida por Sloss et al. (1949), é uma discordância que se forma em condições subaéreas como resultado de erosão fluvial, pedogênese, degradação eólica ou carstificação (CATUNEANU, 2017). Esta superfície pode se formar tanto em configurações *upstream* como em *downstream*, mais comumente durante períodos de acomodação positiva. A identificação de uma discordância subaérea no registro sedimentar, segundo as definições de Catuneanu (2017), depende da existência de depósitos continentais preservadas no topo da sequência. É comum também a ocorrência de retrabalhamento das superfícies e a consequente substituição de discordâncias subaéreas por outras superfícies mais jovens, erosionais.

3.2.6 Escala e Hierarquia na Estratigrafia de Sequências

Os processos sedimentares ocorrem em uma grande variedade de escalas de tempo geológico (MIALL, 2014). Para que haja o desenvolvimento de padrões de empilhamento e a definição de tratos de sistemas reconhecíveis, é necessária uma escala de tempo que varia no mínimo de cem a mil anos, tanto para configurações *downstream* quanto para *upstream* (CATUNEANU, 2017). Segundo o mesmo autor, tal escala proporciona a formação de sistemas deposicionais, através do qual os subambientes são desenvolvidos e elementos geomórficos são estabelecidos através dos sedimentos dominantes no canal fluvial.

Sequências, tratos de sistemas e sistemas deposicionais podem ser observados em diferentes escalas, dependendo do propósito do estudo. Sistemas deposicionais em padrões de empilhamento *upstream* podem sofrer mudanças cíclicas do padrão fluvial e tipos de elementos deposicionais em diferentes escalas (CATUNEANU, 2017). Sequências de alta frequência são normalmente observadas em escalas de um a dez metros no registro, correspondendo a um intervalo de formação que varia de cem até cem mil anos, e configuram a “alta resolução”.

Segundo Miall (2014), ocorrem muitas variações na sedimentação ao longo do tempo. As unidades sedimentares também são resultado da deposição em pequenos intervalos de rápida sedimentação, separados por longos períodos de pouca ou nenhuma sedimentação. Ainda segundo este autor, as variações na sedimentação medidas em ambientes deposicionais modernos ou medidas em ambientes antigos variam proporcionalmente à escala de tempo na qual essa variação foi medida. Essa ampla variação reflete o aumento de tamanho de intervalos

de não deposição e de erosão, de acordo com o aumento do tamanho do registro estratigráfico medido.

Ambos os tipos de padrão de empilhamento *upstream* podem ser observados em diferentes escalas, em relação aos ciclos estratigráficos de diferentes magnitudes. A proporção entre os dois padrões, dentro dos limites de sequências de diferentes ordens, define o tipo de trato de sistema. Segundo Catuneanu (2017), um conjunto de sequências de quarta ordem dominado por um alto grau de amalgamação dos canais define um trato de sistema de alta amalgamação de terceira ordem, por exemplo. Da mesma forma, um conjunto de sequências de quarta ordem dominado por depósitos de planície de inundação com canais isolados, define um trato de sistemas de baixa amalgamação de terceira ordem.

3.3 Fotoestratigrafia

A fotoestratigrafia consiste em uma técnica de fotointerpretação para o estudo de sucessões estratigráficas (SGAVETTI, 1991). É uma metodologia prática utilizada para delimitar e distinguir superfícies no registro sedimentar aflorante, expressas em fotofácies e foto-horizontes (SGAVETTI, 1991). A fotoestratigrafia utiliza conceitos derivados da sismoestratigrafia (*e.g.*, VAIL, MITCHUM & THOMPSON, 1977) e permite a observação e interpretação da continuidade física dos foto-horizontes (assim como na aquisição sísmica), podendo ser posteriormente estendidos para além do afloramento até os limites da bacia (SGAVETTI, 1991).

Foto-horizontes são superfícies resultantes do contraste entre litologias ao longo dos estratos (SGAVETTI, 1991). Entre os foto-horizontes, os pacotes de estratos apresentam uma grande variedade de geometrias e características fotográficas específicas, como textura, coloração e acamamentos, que são considerados, segundo a autora como a “assinatura” das propriedades litológicas. Características distinguíveis nos padrões de foto-horizontes, definem uma fotofácies, e a associação de fotofácies formam uma unidade de fotofácies (SGAVETTI, 1991).

Uma unidade de fotofácies consiste em um corpo de rocha mapeável, com o auxílio de observações em campo, podendo ser interpretado em termos de ambientes e processos deposicionais (SGAVETTI, 1991). Ainda segundo a mesma autora, a análise fotoestratigráfica permite que os padrões de empilhamento sejam correlacionados com eventos erosionais e

deposicionais, da mesma forma que são abordados os conceitos de *onlap*, *downlap* e truncamento na sismoestratigrafia.

Segundo Sgavetti, (1991) as unidades de fotofácies e foto-horizontes podem ser agrupadas e utilizadas como unidades tridimensionais, referidas como unidades fotoestratigráficas. Segundo a autora, as superfícies que limitam essas unidades podem coincidir com os foto-horizontes, assim como as superfícies na sismoestratigrafia, por possuírem significado cronoestratigráfico (como uma discordância ou um truncamento, por exemplo). Associadas a estratigrafia de sequências, as unidades fotoestratigráficas são passíveis de interpretação, podendo ser comparadas com sequências deposicionais e tratos de sistemas (SGAVETTI, 1991). A tabela abaixo (Tabela 1) mostra as diferentes escalas de observação obtidas nas diversas técnicas de aquisição de dados em afloramentos, segundo Sgavetti, (1991).

Tabela 1 Variações nas escalas de observação com técnicas de aquisição de dados em afloramentos, por fotoestratigrafia e sismoestratigrafia.

	Análise faciológica e estratigráfica em campo (afloramentos)	Fotoestratigrafia (fotografia aérea)	Sismoestratigrafia (dados sísmicos)
Superfícies	Acamamentos de grande escala	Foto-horizontes	Refletores sísmicos
	Discordâncias: 10 ¹ -10 ² m, horizontal	Superfícies de discordâncias: 10 ¹ -10 ² m, horizontal	Limites de sequências: 10 ¹ km, horizontal
Unidades	Litofácies e associações de litofácies: 10 ¹ m, vertical; 10 ² m, horizontal;	Fotofácies: 10 ¹ -10 ² m, vertical; 10-10 ³ m, horizontal	Configuração dos refletores sísmicos
	Unidades separadas por discordâncias: 10m-1000m, vertical 100m-100km, horizontal	Unidades de fotofácies: 10-100	Unidades de fácies sísmicas: 10-1000m, vertical 1000m-10km, horizontal
		Unidades fotoestratigráficas: 10-100 m, vertical 100-10km, horizontal	Sequências sísmicas e deposicionais, e tratos de sistemas: 10 ² -10 ³ m, vertical; 10 ³ m-10 ² km, horizontal

Fonte: Extraído e modificado de Sgavetti, 1991.

3.4 Sistemas Fluviais Entrelaçados

A formação de rios entrelaçados é ocasionada pela alta declividade do terreno, abundância de sedimentos grossos cascalhosos e ocorrência de grandes descargas sazonais (MIALL, 1981). Ainda segundo este autor, grandes quantidades de sedimento no fundo dos canais dificultam a passagem de água, fazendo com que a corrente se ramifique e passe através de barras cascalhosas, erodindo no seu curso as margens do canal. Em regiões semiáridas o escoamento pode ocorrer em um intervalo de meses ou anos, em caso de chuvas torrenciais esporádicas. Em rios antigos, a ausência de vegetação facilitava o escoamento superficial, transportando sedimentos grossos por desagregação mecânica (MIALL, 1981).

Diversos controles atuam na sedimentação de rios efêmeros, com grandes inundações episódicas. Os fluxos de descarga são responsáveis pelo desenvolvimento dos canais, podendo concentra-los na ocorrência de grandes descargas sazonais (BRIDGE, 2003 *apud* MIALL, 2014). A descarga de água pode ser aumentada pela criação de um declive na topografia (pela tectônica) e por consequência, ocorrer o aumento no tamanho dos sedimentos no registro. Outra possibilidade é a ocorrência natural de grande descarga de água em épocas de cheia, fazendo com que maiores sedimentos sejam transportados, ocasionando ao longo do tempo o declive da topografia (BRIDGE, 2003 *apud* MIALL 2014).

A origem dos sedimentos, a influência dos afluentes tributários e a deformação do embasamento pela tectônica, também influenciam na formação de rios entrelaçados (efêmeros). Segundo Miall (2014), sistemas fluviais entrelaçados tendem a ser efêmeros, e em condições ocasionais de estabilidade, há grande possibilidade de que se o sistema se torne meandrante. Ainda segundo este autor, a ocorrência de múltiplos canais com altas taxas de avulsão corresponde ao aumento substancial no aporte de sedimentos ou a recorrente mudança na tectônica da bacia, como eventos de subsidência ou aumento do nível relativo do mar. Essas características ocasionam o aumento da acomodação e, conseqüentemente, a agradação fluvial.

A estabilidade aparente de canais entrelaçados (como por exemplo a falta de depósitos de acreção lateral no registro) pode ser um fator da taxa em que ocorrem mudanças na posição do canal por avulsão, antes de ocorrer uma evolução significativa do canal (MIALL, 2014). Sendo assim, os rios sofrem mudanças gradativas independentemente de receberem sempre o mesmo padrão de descarga de água ao longo do seu curso, pois dependem de uma combinação de variáveis (MIALL, 2014). Ainda segundo o mesmo autor, um dos maiores desafios na identificação e interpretação de sistemas fluviais é a escassez de registros geológicos de

sistemas fluviais antigos, que podem servir como base para os estudos de rios atuais. Miall (1977) apresenta uma classificação das principais litofácies associadas a sistemas fluviais entrelaçados, tanto antigos quanto atuais (Tabela 2).

Tabela 2 - Principais litofácies em sistemas fluviais entrelaçados.

Litofácies	Classificação litológica	Estruturas Sedimentares	Interpretação
Gm	Ortoconglomerados arenosos e paraconglomerados	Maciços	Depósitos de fluxo de detritos
Gms	Ortoconglomerados e ortoconglomerados arenosos	Maciça ou com estratificação incipiente (clastos imbricados ou acamamento horizontal)	Depósitos de barras longitudinais
Gt	Arenitos conglomeráticos e ortoconglomerados arenosos	Estratificação cruzada acanalada	Preenchimento de canais
Gp	Arenitos conglomeráticos e ortoconglomerados arenosos	Estratificação cruzada planar	Barras Linguoides
St	Arenitos, Arenitos conglomeráticos (areia média a muito grossa, podendo conter grânulos e pequenos seixos)	Estratificações cruzadas acanaladas isoladas ou agrupadas	Dunas (regime de fluxo inferior)
Sh	Arenitos, Arenitos conglomeráticos (areia média a muito grossa, podendo conter grânulos e pequenos seixos)	Estratificações cruzadas planares isoladas ou agrupadas	Barras linguoides transversais e ondas de areia (regime de fluxo inferior)
Sl	Arenitos finos	Estratificação cruzada de baixo ângulo	Preenchimento de sulcos, rompimento de diques marginais, antidunas
Se	Arenitos com Intraclastos	Sulcos erosivos com estratificação cruzada incipiente	Preenchimento de sulcos

Fonte: Extraído e modificado de Miall, 1977.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a construção do modelo de reservatório análogo foram utilizadas etapas de: Revisão Bibliográfica, Produção de MVA, Análise Estratigráfica e Integração dos MVA. Os materiais e métodos de cada ferramenta são apresentados abaixo.

4.1 Revisão Bibliográfica

Compreendeu o levantamento de informações sobre aerofotogrametria e fotogrametria digital e o uso de modelos virtuais de afloramento para análise estratigráfica e aplicação em modelos de reservatórios análogos. Também foi realizada uma revisão sobre os conceitos atuais de fotoestratigrafia e estratigrafia de sequências e controles deposicionais em sistemas fluviais entrelaçados.

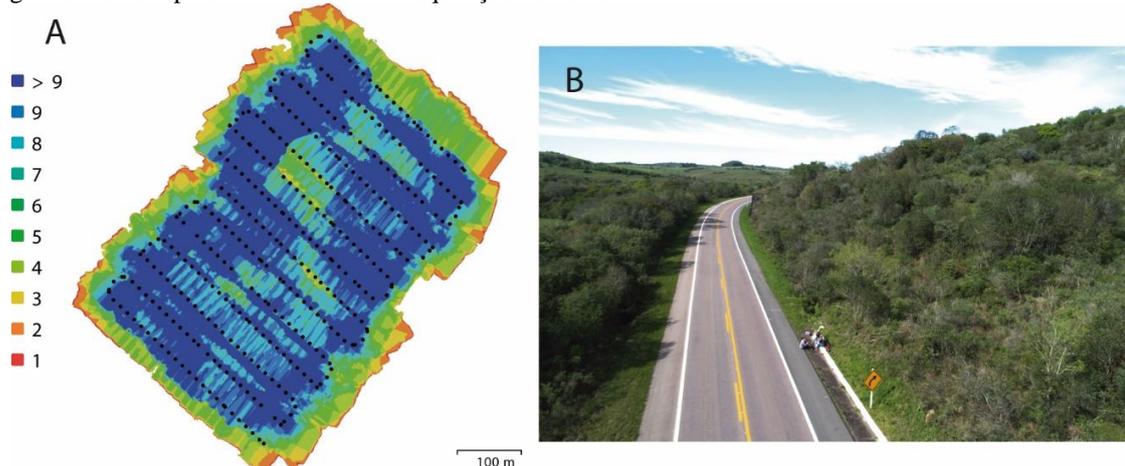
4.2 Produção de MVA

Os MVA foram produzidos através da aquisição de fotografias aéreas e terrestres, obtidas com câmeras acopladas em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) e uma câmera semiprofissional. As informações técnicas das câmeras utilizadas estão descritas na tabela 3. A produção de MVA compreendeu duas etapas: Aquisição de fotografias e Processamento no *Software PhotoScan*. A aquisição das fotos ocorreu em 3 etapas. A primeira etapa foi realizada a uma altura maior de voo (cerca de 70 metros do solo) para obter um modelo de baixa resolução denominado de Modelo Digital de Elevação (MDE; Fig. 12). Nessa primeira etapa (Fig. 8) as fotografias foram obtidas em NADIR, que é a projeção do alinhamento vertical entre o centro da Terra e a posição do observador, obtidas com a câmera do VANT voltada para o terreno em posição vertical (90 graus).

A segunda etapa compreendeu a aquisição de fotos aéreas, também com o VANT, porém em maior resolução, de todos os afloramentos (AV-1, CE-1, CE-2 e CE-3), com a câmera posicionada entre 15 e 45 graus (Fig. 9) A terceira e última etapa consistiu na aquisição de fotografias terrestres, necessárias para fotografar a base do afloramento AV-1. Por fim, o processamento das fotografias no *Software PhotoScan* resultou na produção de 5 MVA. O tempo de aquisição de fotografias foi em média de 15 minutos para cada afloramento, incluindo

tempo de planejamento da rota. A aquisição do MDE demorou cerca de 25 minutos, pois compreende toda a área de estudo.

Figura 6 - Aquisição aérea para a construção do MDE. Em A, representação esquemática do MDE, mostrando as linhas de voo e as fotografias adquiridas (linha pontilhada preta). A variação nas cores (vermelho a azul) representam a quantidade de fotografias que imagearam um mesmo ponto (pixel) durante a aquisição. Regiões vermelhas na figura indicam que somente uma fotografia imageou aquela região, enquanto que os pontos em azul mais escuro abrangem mais de 9 fotos. Quanto mais fotografias imagearam o mesmo ponto, maior é a sobreposição do modelo. Consequentemente, as bordas do modelo produzirão maior distorção. Em B é mostrada uma das fotografias obtidas pelo VANT durante a aquisição aérea do MDE.

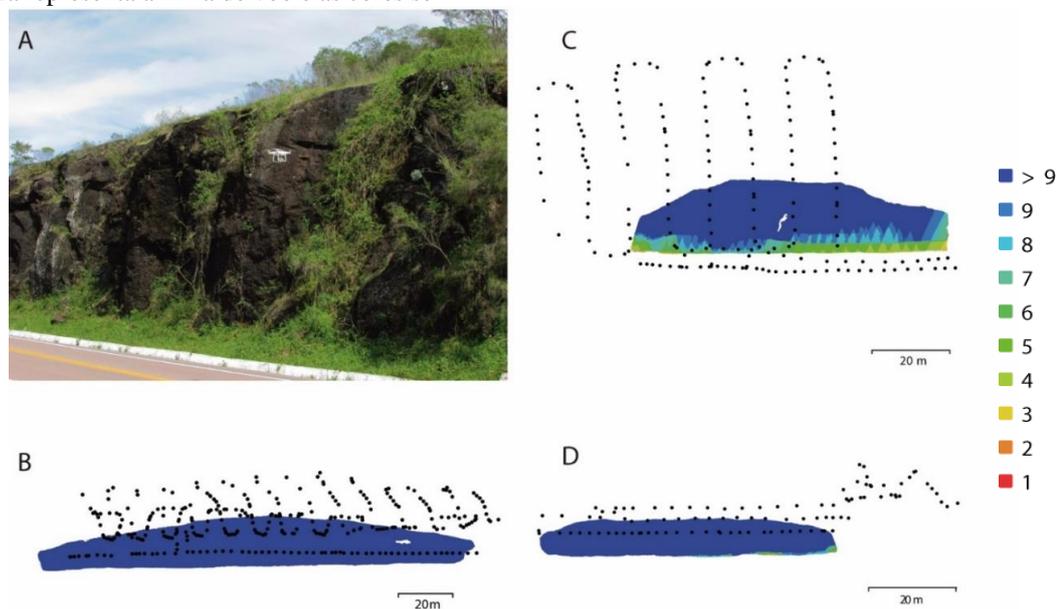


Fonte: Autoria própria (2018)

Os afloramentos de corte de estrada CE1, CE2 e CE3 foram fotografados somente por meio da câmera de VANT. Dessa forma foi possível se expor pouco tempo aos perigos da estrada, tendo em vista a rapidez de aquisição. Os voos foram programados automaticamente e definidos em rotas, porém ajustados manualmente conforme a necessidade por conta do fluxo de caminhões na rodovia. O foco da câmera também foi ajustado manualmente no controle do VANT a cada disparo durante a aquisição, para evitar ao máximo fotografias tremidas.

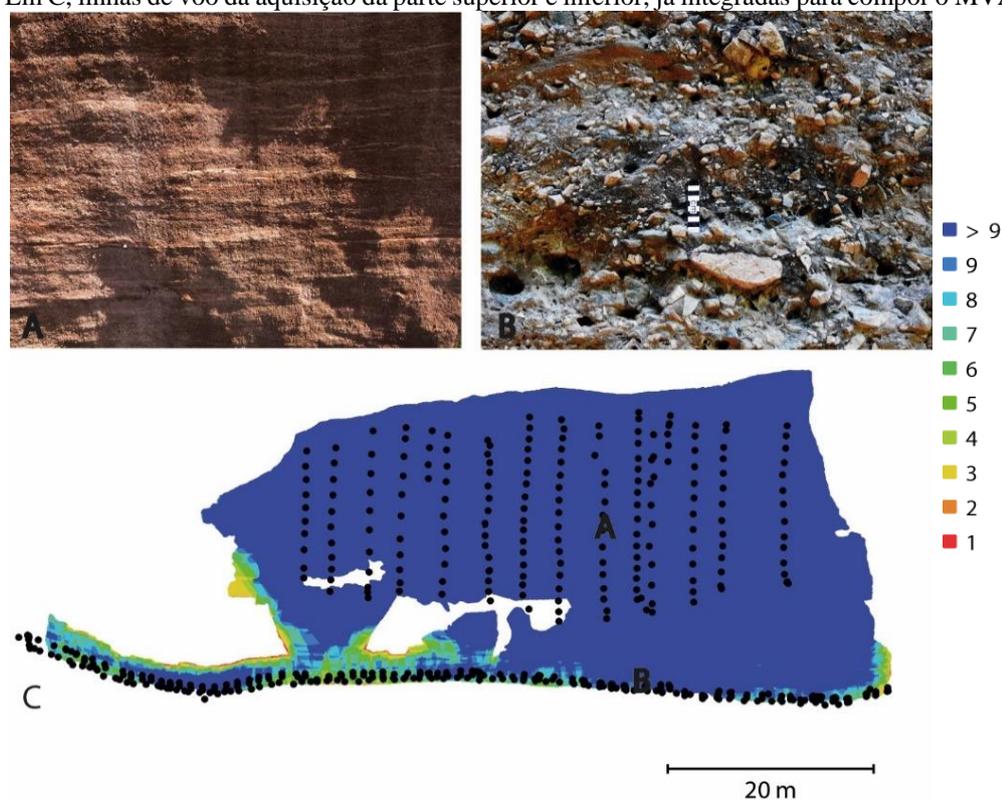
A terceira etapa foi a aquisição das fotografias terrestres do afloramento AV1-1 (Fig. 10). Nessa etapa, as fotografias foram obtidas de forma manual, com a câmera convencional, procurando manter a distância constante entre câmera e afloramento, de aproximadamente 2 metros. A aquisição terrestre foi utilizada para complementar a aquisição aérea do afloramento AV1, devido a densa vegetação na porção basal do afloramento, condições impróprias para fotografar com o VANT. A utilização da câmera convencional foi uma alternativa para o imageamento total do afloramento, não havendo nenhum prejuízo ou insuficiência de dados. O processamento para a geração do MVA AV-1 foi realizado de forma individual entre cada etapa de aquisição (aérea e terrestre). Posteriormente, os modelos foram georreferenciados de forma conjunta, formando um único modelo. As especificações das câmeras utilizadas estão expressas na tabela abaixo (Tabela 3).

Figura 7 - Aquisição fotográfica dos afloramentos CE1, CE2 e CE3. A: Fotografia mostrando o VANT utilizado nas aquisições. Em B, C e D são mostrados os afloramentos CE3, CE1 e CE2, respectivamente. A linha preta pontilhada representa a linha de voo e as cores se



Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 8 - Aquisição aérea e terrestre do Afloramento AV1. Em A: Foto tirada de uma das laterais superiores na aquisição aérea, a cerca de 10m do afloramento. Em B, foto tirada utilizando câmera convencional, da base do afloramento. Em C, linhas de voo da aquisição da parte superior e inferior, já integradas para compor o MVA final.



Fonte: Autoria própria (2018)

Tabela 3 - Informações técnicas das câmeras usadas para o imageamento

Equipamento	Modelo	Resolução	Distância Focal	Tamanho de Pixel
Câmera do VANT	FC 330	4000 x 3000	3,61 mm	1,56 x 1,56 μm
	FC 6310	5472 x 3648	8,8 mm	2,41 x 2,41 μm
Câmera Digital Semi - Profissional	Canon SX400IS	4608 x 3456	4,3 mm	1,34 x 1,34 μm
	Canon SX400IS	2304x1728	4,3 mm	2,67 x 2,67 μm

Fonte: Autoria própria (2018)

4.2.1 Processamento no Agisoft PhotoScan Professional

O *Agisoft PhotoScan* é um programa para modelagem em três dimensões (3D) baseado em imagens, criado para fornecer conteúdos em 3D em alta qualidade a partir de fotografias (2D). Baseado em recentes tecnologias de reconstrução 3D, o *PhotoScan* opera com quaisquer imagens e é muito eficiente tanto operando no modo controlado quanto no automático. As fotos podem ser tiradas de qualquer posição, com a condição de que o objeto a ser reconstruído seja visível em pelo menos duas fotos.

No *PhotoScan* é necessário o cumprimento de quatro etapas para a obtenção de modelos virtuais de afloramento, sendo elas: alinhamento das fotografias, geração da nuvem esparsa de pontos, construção da nuvem densa de pontos, construção da malha triangulada (*mesh*) e a texturização da malha triangulada. Essas etapas podem ser executadas separadamente, uma por vez, ou então utilizando o comando “*Batch Process*”, que permite programar as etapas e as resoluções desejadas em cada modelo, e o programa realiza todas as etapas de uma só vez.

Normalmente o objetivo de processar as fotos no *PhotoScan* é construir superfícies em 3D, ortofotomosaicos e modelos digitais de elevação (MDE). Os procedimentos incluem quatro principais etapas. A primeira etapa é o alinhamento das fotografias. Nessa etapa o *PhotoScan* procura por pontos em comum nas fotos e combina os pontos em comum nas múltiplas fotos, ao mesmo tempo em que identifica a posição exata dos pontos nas fotografias. Como resultado, é formada a nuvem esparsa de pontos, mostrada junto a sequência de câmeras detectadas.

A nuvem esparsa de pontos representa o resultado do alinhamento. Quando o programa finaliza a construção da nuvem esparsa de pontos, ele identifica quais fotografias eventualmente

não foram alinhadas. Quando algumas fotos não são inseridas no alinhamento, significa que a sobreposição com determinadas fotos não foi suficiente, e nesse caso, não serão utilizadas nas etapas seguintes do processamento. Da mesma maneira, fotografias fora de foco ou tremidas, quando identificadas, também podem ser desabilitadas, pois fotografias de qualidade inferior podem influenciar a qualidade final do modelo.

O próximo processo é a geração da nuvem densa de pontos, que é construída através do posicionamento das fotografias alinhadas e das próprias fotografias. A nuvem densa depois de construída estará pronta para ser exportada. A terceira etapa consiste na geração de uma superfície triangulada (*Mesh*) ou o MDE. O modelo poligonal 3D da *mesh* representa a superfície do objeto baseada na nuvem densa ou na nuvem esparsa de pontos. Essa etapa do processamento reconhece os 3 pontos mais próximos pertencentes à nuvem densa para definir por interpolação uma superfície triangular. A construção da *mesh* não é obrigatória, cabe ao usuário decidir usá-la, ou pular essa etapa.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) pode ser construído nas projeções planar, geográfica ou cilíndrica, de acordo com a escolha do usuário. O MDE representa o modelo da superfície topográfica com as variações nas altitudes em uma escala de cores. Após a superfície ser construída, esta pode ser texturizada (no caso da *mesh*) ou então pode ser gerado um ortomosaico. O ortofotomosaico é projetado na superfície de acordo com a escolha do usuário, podendo ser aplicado tanto na *mesh* quanto no MDE.

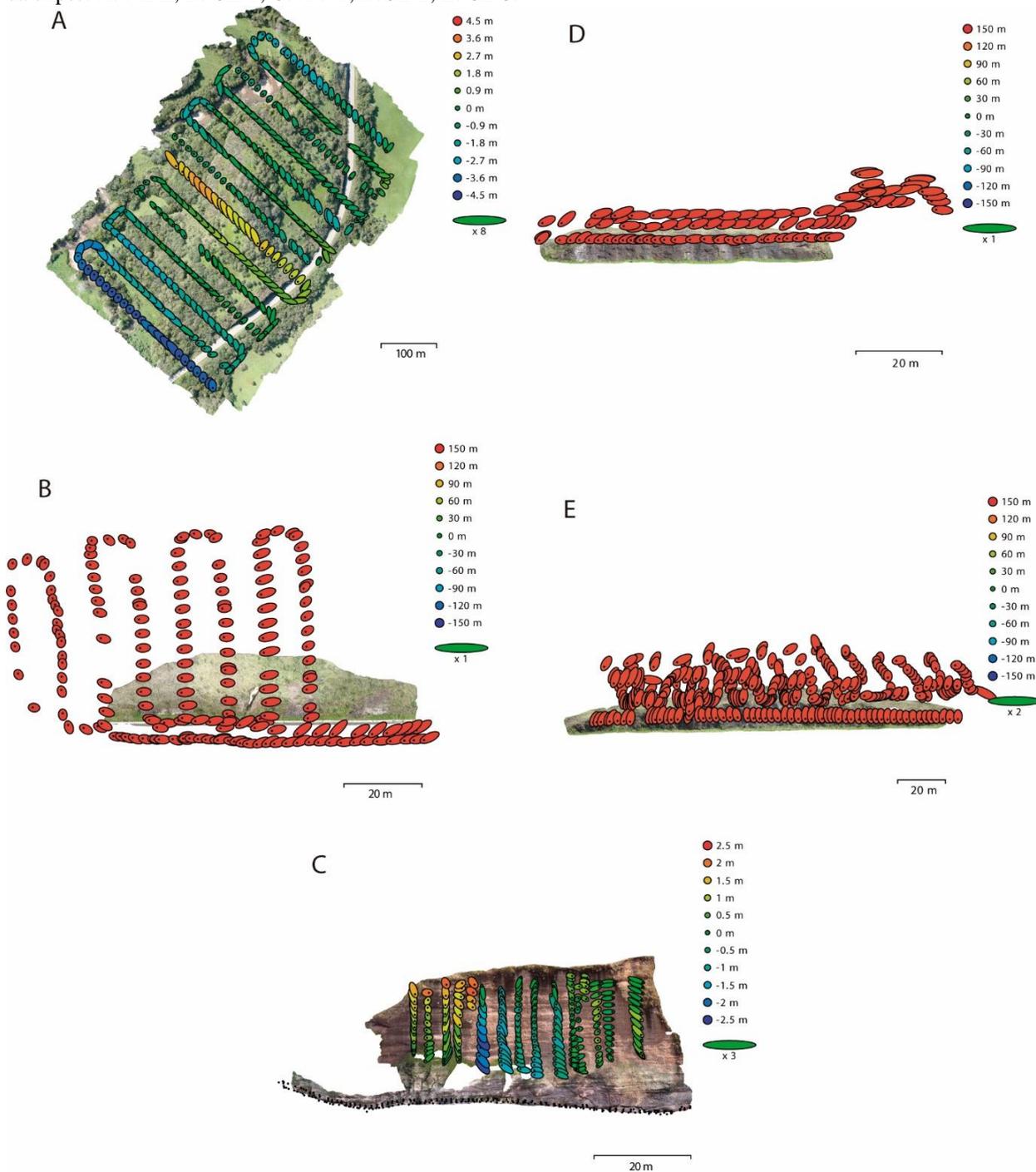
Os MVA foram separados em Chunks e processados um de cada vez, no entanto fizeram parte de um mesmo projeto. Foram criados 6 Chunks, nomeados de MDE, Aéreo vertical (AV-1), Terrestre Vertical, CE-1, CE-2, e CE-3. A nuvem esparsa e a nuvem densa de pontos foram executadas em resolução média, enquanto a malha triangulada (*mesh*) e a texturização foram processadas em resolução alta.

4.2.2 Resolução e georreferenciamento dos MVA

A resolução dos MVA depende da resolução da câmera utilizada e também da posição de cada fotografia atribuída pelo GPS. Câmeras de boa qualidade (a partir de 5MP) são ideais para a construção dos modelos, no entanto toda fotografia possui um erro de distorção de imagem nas bordas considerada normal. Sendo os MVA construídos a partir de fotos, obrigatoriamente terão distorções principalmente nas bordas, ainda que não prejudique na interpretação. Os erros de posição das imagens ocorrem devido a erros nas coordenadas devido

a falhas no GPS, que também são considerados normais. O *PhotoScan* reconhece os erros de localização em cada foto utilizada nos MVA, gerando um mapa de erro (Figura 11).

Figura 9 - Elipses de erro de localização das fotografias em cada MVA. As cores na legenda mostram a magnitude do erro em metros. Erros em Z são representados pela cor da elipse. Erros em X e Y são representados pelo formato da elipse. A: MDE; B: CE-1; C: AV-1; D:CE-2; E: CE-3.



Fonte: Autoria própria (2018)

A tabela abaixo (Tabela 4) mostra os erros associados à localização das fotos nos modelos. Na Figura 11, cada ponto representa a posição da câmera no momento do disparo e a cor atribuída corresponde a distorção da imagem ou ao erro associado em X e Y. Um erro maior associado ao atributo Z se dá pelo formato mais alongado da elipse.

Tabela 4 - Média do erro de localização da câmera em cada MVA (X-Leste, Y - Norte e Z - Altitude)

MVA	Erro em X	Erro em Y	Erro em Z	Erro em XY	Erro Total
DEM	1,39565	1,47911	1,6712	2,00908	2,6133
AV-1	0,329822 m	0,481926 m	0,868406 m	0,583982 m	1,0465 m
CE-1	1,823319 m	0,690478 m	144,304 m	1,94956 m	144,317 m
CE-2	2,97119 m	0,78095 m	143,196 m	3,07211 m	143,229 m
CE-3	0,656973 m	1,33832 m	140,126 m	1,49087 m	140,134 m

Fonte: Autoria própria (2018)

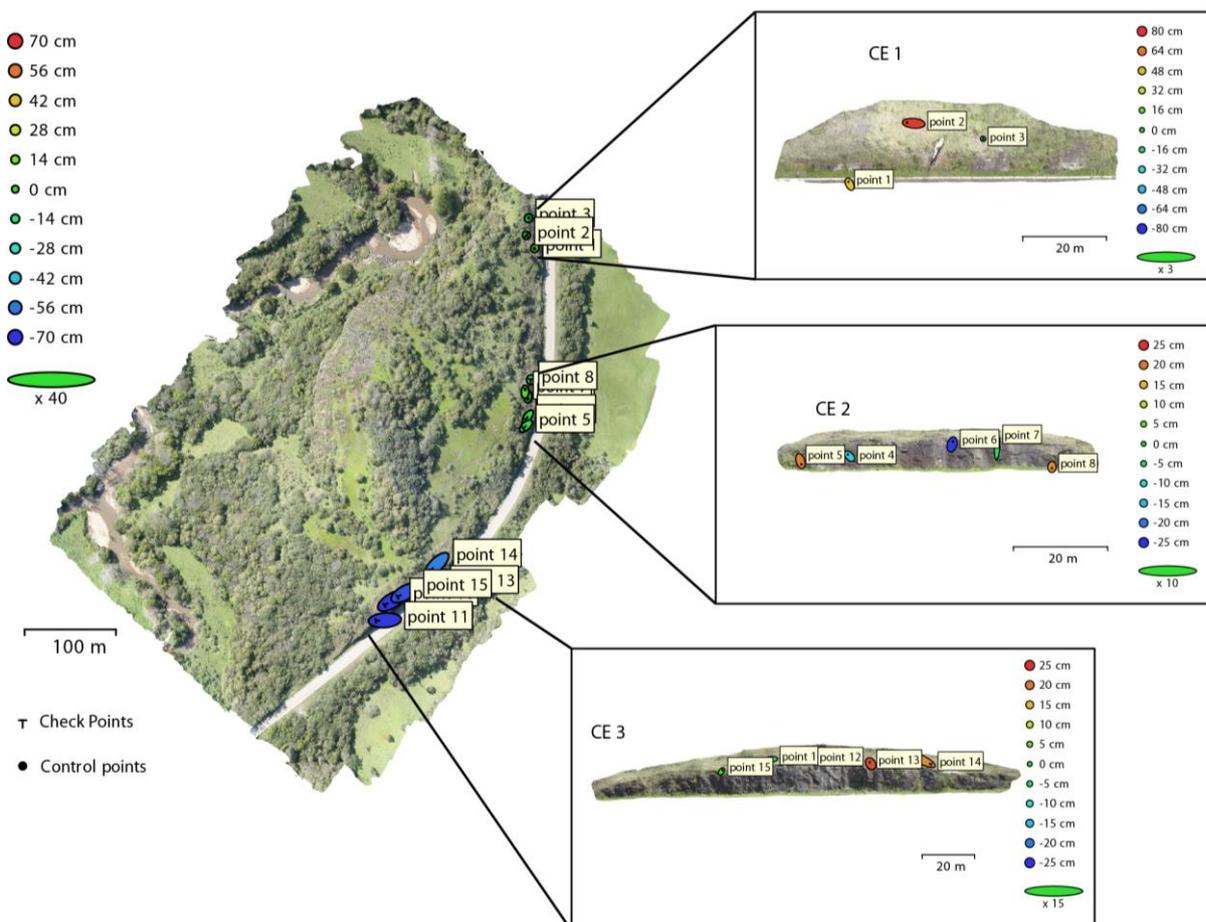
Após o processamento e geração dos MVA em separado, foi necessário agrupá-los em um único sistema de coordenadas a partir do georreferenciado no PhotoScan com o intuito de construir posteriormente o modelo do reservatório. O georreferenciamento foi realizado a partir da análise dos MVA e seleção de pontos em comum, encontrados em pares, no MDE e nos afloramentos (Fig. 12). Esse processo foi realizado manualmente.

Foram escolhidos como demarcações de pontos feições nítidas, na rocha ou em qualquer parte do modelo que fossem visíveis em ambos os MVA, de maneira que todos os pontos identificados pertencessem a mesma cota na topografia, e conseqüentemente representassem a mesma feição exposta nos modelos. A busca por pontos em comum foi realizada sempre analisando primeiramente o MDE, pois corresponde a um modelo de mais baixa resolução em que algumas porções podem não estar perfeitamente nítidas. Após demarcado como um ponto no MDE, facilmente identificou-se exatamente o mesmo ponto nos afloramentos CE1, CE2 e CE3, que estes possuem maior resolução e as feições estão conseqüentemente mais nítidas.

Ao total foram identificados 15 pontos, que corresponderam a pontos de controle para o georreferenciamento. Não foram encontrados pontos suficientes em comum entre o MVA AV-01 para o georreferenciamento no PhotoScan, pois são exigidos no mínimo quatro pontos para que o software consiga reconhecê-los e integrá-los. Sendo assim, o georreferenciamento

do MVA AV-1 foi realizado no Software *MOVE*, com uma ferramenta de transposição, a partir de um ponto em comum encontrado no topo do AV-1 e no MDE.

Figura 10 - Georreferenciamento dos MVA com base no MDE. As elipses nas figuras indicam o erro médio de localização dos pontos



Fonte: Autoria própria (2018)

4.3 Análise Estratigráfica

A análise estratigráfica foi realizada a fim de compreender os padrões de empilhamento e as superfícies estratigráficas encontradas nos afloramentos. A análise estratigráfica compreendeu a identificação de padrões de empilhamento dos estratos, que foram importantes para a interpretação do registro de sistema fluvial entrelaçado. Dessa forma foi possível estabelecer parâmetros de correlação entre os afloramentos, necessários para a construção do modelo de reservatório.

4.3.1 Análise Faciológica

Os afloramentos foram discretizados por meio de análise faciológica e empilhamento de seções estratigráficas em campo e por meio de fotofácies, em uma escala 1:50m. Para isso foi utilizada a descrição de fácies adotada por Miall (1977; Tabela 2) contendo a descrição de fácies, estruturas e interpretação dos depósitos de rios entrelaçados. Integrou-se também a classificação de Miall, (1985; Tabela 2) para descrição da arquitetura fluvial. As informações estratigráficas de cada afloramento foram úteis para dar seguimento à interpretação diretamente nos MVA por meio das fotofácies (figs. 17 e 18).

4.3.2 Análise Fotoestratigráfica

A análise fotoestratigráfica foi realizada diretamente nos MVA construídos, seguindo os seguintes passos: Análise de foto-horizontes, análise fotofaciológica e análise fotoestratigráfica. O Software permite aproximar e distanciar a imagem, tornando possível identificar e medir diferentes tamanhos de grão na rocha, espessuras verticais e laterais de camadas (foto-horizontes) e terminação de estratos (determinação de lentes de areia e barras cascalhosas por exemplo). A análise fotofaciológica foi realizada através da textura aparente no modelo (fotografia) em comparação com a análise de campo, sendo possível a identificação de texturas e estruturas semelhantes. As fácies descritas em campo correspondem a mesma fotofácies descritas nos MVA. A análise fotoestratigráfica permitiu identificar nos afloramentos as superfícies deposicionais e diferenciar os tratos de sistemas deposicionais (alta e baixa amalgamação). Posteriormente foram integradas as análises de campo e de fotoestratigrafia para compor o resultado final de análise faciológica e estratigráfica. Este método foi utilizado para realizar o levantamento fotoestratigráfico das porções inacessíveis dos afloramentos. Foram definidos fotofácies e foto-horizontes, que foram extrapolados para abranger todos os afloramentos durante a construção do modelo do reservatório.

4.4 Integração dos MVA e Geração do Modelo de Reservatório

Os dados adquiridos nas etapas prévias foram integrados utilizando o software MOVE. Os MVA foram carregados no formato .obj e os dados faciológicos foram inseridos na forma de poço (*well*; Fig. 20). A criação de um poço no modelo permitiu primeiramente separar os

foto-horizontes por meio de superfícies onde houveram mudanças de fácies, de modo a caracterizar o zoneamento dos afloramentos. O zoneamento consistiu na diferenciação de áreas do afloramento com base em características faciológicas, distinguíveis por meio da frequência de arenitos e conglomerados. As heterogeneidades encontradas serviram de base para uma comparação entre rochas reservatório atuais de origem semelhante (sistemas fluviais entrelaçados), a fim de caracterizar os afloramentos da Formação Guarda Velha como análogos de reservatórios.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do presente trabalho compreendem três etapas, são elas: construção de MVA; análise e interpretação faciológica e estratigráfica em campo e nos MVA (fotoestratigrafia) e construção e interpretação do modelo de reservatório análogo. As discussões incluem inferências acerca dos mecanismos de deposição do sistema fluvial da Formação Guarda Velha, uso de MVA para análise faciológica e estratigráfica e uma comparação com um campo atual de produção de petróleo de origem fluvial.

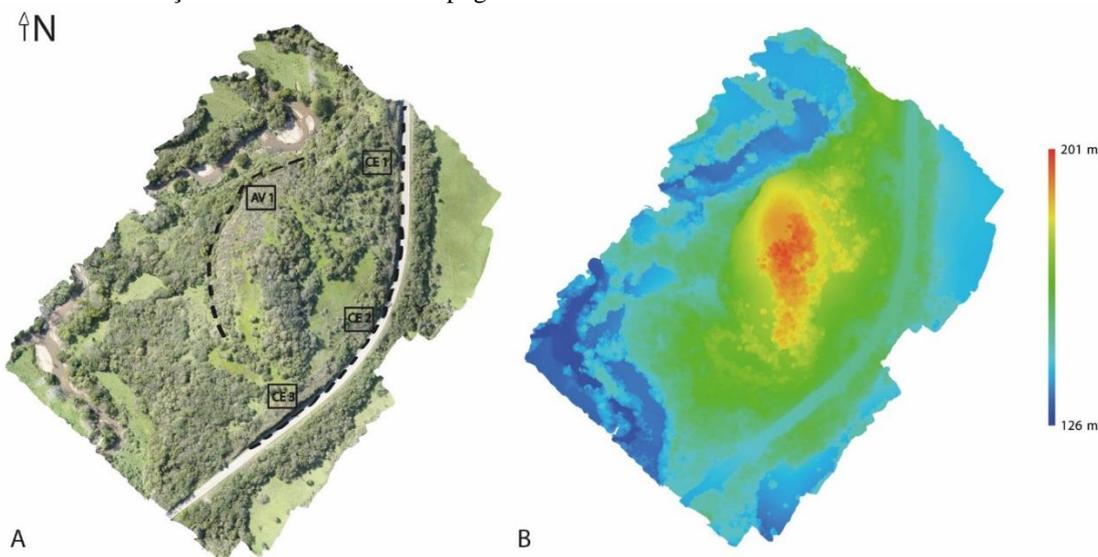
5.1 Construção de MVA

A etapa de construção de MVA compreendeu a construção de um MDE e 4 MVA. O MDE (Fig. 12b) é o Modelo Digital de Elevação da área de estudo construído a partir de um voo de baixa resolução com o VANT e utilizado para reconhecimento da topografia e georreferenciamento. O MDE foi processado seguindo todas as etapas de construção do *Software PhotoScan*, gerando no fim do processamento um ortofotomosaico com as feições da área (Fig. 12a), que sobreposto ao MDE resulta em um modelo do terreno completo. MVA são os Modelos Virtuais de Afloramento utilizados na interpretação faciológica, fotofaciológica e estratigráfica. Os MVA foram nomeados de AV-1 (Afloramento Vertical-1; Fig. 13); CE-1 (Corte de Estrada-1; Fig. 14); CE-2 (Corte de Estrada -2; Fig. 15) e CE-3 (Corte de Estrada-3; Fig.16).

5.1.1 MDE

O MDE (Fig.12) foi construído a partir de 372 fotografias, a uma altura média de voo de 77,7 metros. Foram necessárias 14 linhas de voo para a aquisição total, que abrangeu 0,276 km². A resolução final do MDE foi de 1,83 cm/pixel. Após o processamento, foi gerado um ortofotomosaico georreferenciado (Fig. 13a), que foi utilizado sobreposto ao MDE nas etapas de georreferenciamento.

Figura 11 - (A): Ortofotomosaico de MVA superior da área de estudo com a localização dos afloramentos analisados (AV-1, CE-1, CE-2 e CE-3). (B): Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo mostrando na escala de cores a variação das curvas de nível topográficas



Fonte: Autoria própria (2018)

5.1.2 MVA

Os MVA construídos constituem os afloramentos AV-1, CE-1, CE-2 e CE-3. O MVA AV-1 (Fig. 14) consiste em um modelo integrado com as fotografias terrestres e aéreas. Durante a aquisição terrestre foram tiradas fotografias da base do afloramento AV-1 chegando a capturar feições a uma altura máxima de nove metros. A aquisição aérea alcançou a parte o restante do afloramento, totalizando na aquisição um total de 30m de altura. Ao total foram tiradas 598 fotos, sendo 205 aéreas e 393 terrestres. A resolução final do modelo foi de 1,41 cm/pix.

O MVA CE-1 (Fig. 15) foi construído a partir de 180 fotografias aéreas, a uma altura média de voo de 8,2 m. A resolução final deste MVA foi de 3,99 mm/pix. A aquisição fotográfica do afloramento CE-2 (Fig. 16) foi realizada a partir de 101 fotografias aéreas, tiradas a uma altura média de voo de 24,3 metros. A resolução final deste MVA foi de 3,24 cm/pix. Por fim, para o imageamento do afloramento CE-3 (Fig. 17) foram utilizadas 326 fotografias,

tiradas a uma altura máxima de 79 m do afloramento. A resolução final do MVA foi de 3.83cm/pix.

Figura 12 - Etapas de processamento do MVA do afloramento AV-1. A: nuvem esparsa de pontos. B: nuvem densa de pontos. C: malha triangulada texturizada (modelo 3D final)

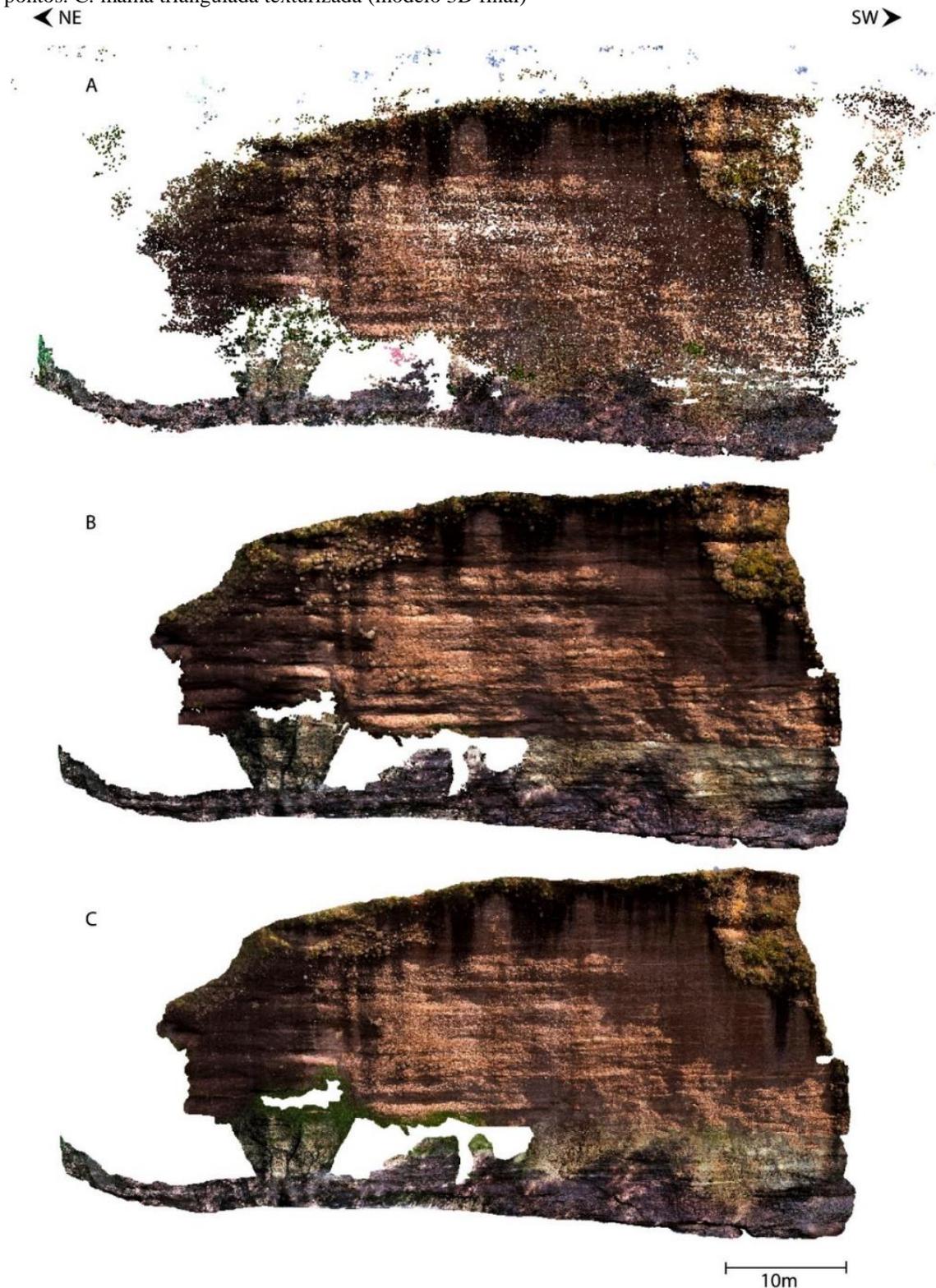


Figura 13 - Etapas de processamento do MVA do afloramento CE-1. A: nuvem esparsa de pontos. B: nuvem densa de pontos. C: malha triangulada texturizada (modelo 3D final)



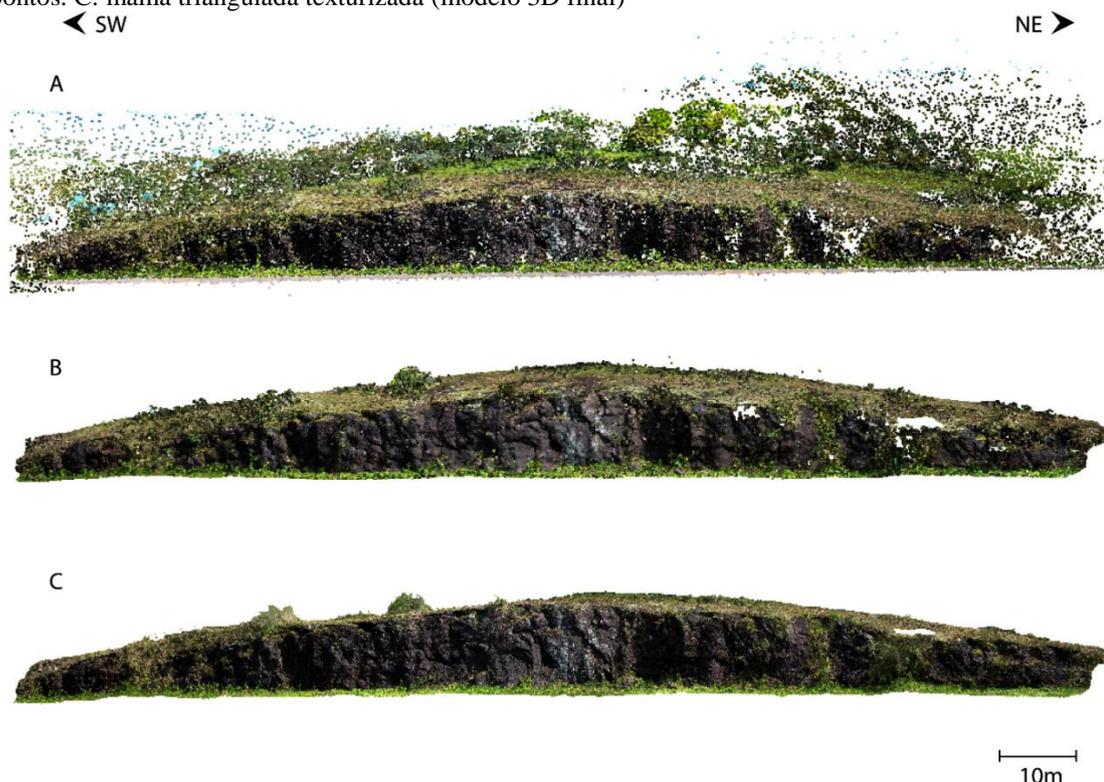
Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 14 - Etapas de processamento do MVA do afloramento CE-2. A: nuvem esparsa de pontos. B: nuvem densa de pontos. C: malha triangulada texturizada (modelo 3D final)



Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 15 - Etapas de processamento do MVA do afloramento CE-3. A: nuvem esparsa de pontos. B: nuvem densa de pontos. C: malha triangulada texturizada (modelo 3D final)



Fonte: Autoria própria (2018)

5.2 Análise estratigráfica

O afloramento AV-1 foi escolhido para a descrição de campo pois é mais representativo da área de estudo, tendo 30 metros de seção aflorante. Os afloramentos CE-1, CE-2, CE-3, foram analisados somente nos MVA e serviram como um complemento para a análise estratigráfica e faciológica. A análise faciológica e a interpretação de elementos arquiteturais foram realizadas com base em Miall (1977).

5.2.1 Fácies e fotofácies

Na área de estudo foram caracterizadas seis fácies e seis fotofácies, que foram agrupadas nas associações de fácies de leques aluviais (fácies *Gm* e *Gms*) e conglomerados e arenitos fluviais (fácies *Gp*, *Gt*, *St* e *Sh*; Tabela 5). As fácies de leques aluviais são as seguintes:

(i) brecha conglomerática polimítica com granulometria tamanho bloco e estratificação cruzada planar, correspondente a fotofácies de textura grossa, estratificação cruzada e a alta angulosidade dos grãos (*Gm*);

(ii) brecha conglomerática polimítica com intercalação de lentes de conglomerados e arenitos, correspondente a fotofácies de brecha composta por granulometria tamanho seixo e lentes de arenitos (*Gms*).

As fácies que compõe a associação de fácies de conglomerados e arenitos fluviais são:

(i) conglomerado arenoso, matriz-suportado, com grânulos e seixos, correspondente a fotofácies de conglomerado matriz-suportado com predomínio de clastos tamanho seixo (*Gt*);

(ii) conglomerado maciço com alto grau de empacotamento e imbricação de clastos, correspondente a fotofácies conglomerado de seixos imbricados e clastos arredondados (*Gp*);

(iii) arenitos médios a grossos, podendo conter clastos de grânulos e seixos, correspondente a fotofácies arenitos dispostos em lentes aparentemente maciças ou com estratificação cruzada planar (*St*);

(iv) arenitos médios a grossos, podendo conter seixos, correspondente a fotofácies de arenitos com estratificação plano paralela (*Sh*);

5.2.2 Associações de fácies e elementos arquiteturais

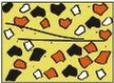
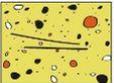
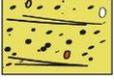
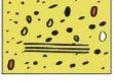
Os elementos arquiteturais encontrados compreendem canais, barras cascalhosas e depósitos de dunas subaquosas. Os depósitos de canais predominam em todos os afloramentos, tendo na base clastos de tamanho seixo a bloco, com um padrão de gradação normal. As fácies *Gm* e *Gms* indicam uma associação de fácies de leques aluviais distais. Devido a granulometria ser relativamente homogênea e a estratificação cruzada planar, provavelmente correspondem a leques aluviais intermediários a distais.

As fácies *Gt*, *Gp*, *St* e *Sh* indicam uma associação de fácies de canais típicos de sistemas fluviais entrelaçados, com depósitos de conglomerados e arenitos conglomeráticos. As fácies *Gt* e *Gp* formam canais e barras cascalhosas, sendo predominantes nos afloramentos. As fácies *St* e *Sh* representam respectivamente depósitos de dunas subaquosas e depósitos de barras linguoides, caracterizadas por arenitos com estratificação cruzada planar (*St*) e estratificação plano paralela (*Sh*).

O padrão de depósito entrelaçado da Formação Guarda Velha pode ser associado a um dos modelos genéricos descritos por Miall (1977), que identifica e compara seis perfis verticais das litofácies mais típicas de depósitos fluviais entrelaçados. O modelo tipo “*Scott*” (Fig.19) que caracteriza depósitos desenvolvidos com pouca ou nenhuma influência de leques aluviais, ou em porções proximais de rios cascalhosos.

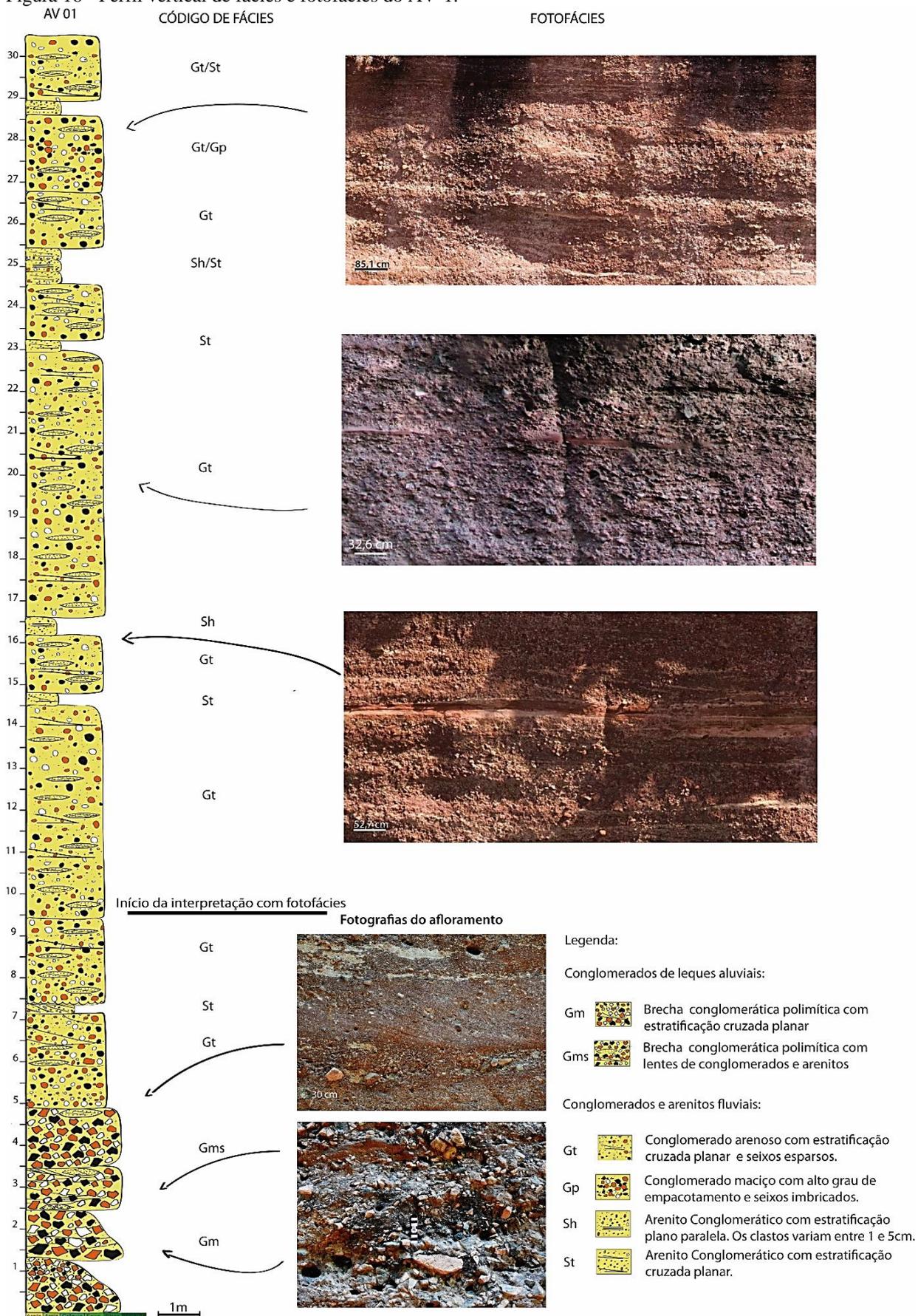
A arquitetura fluvial do modelo Scott, segundo Miall (1977) é dominada por depósitos de barras longitudinais formadas por grandes inundações, contendo ciclos de granodecrescência ascendência de escala centimétrica a métrica. Assim como as fácies caracterizadas nos depósitos da Formação Guarda Velha, o modelo Scott contém as fácies Gm, Gp, St, características de ambientes fluviais entrelaçados com a influência de leques aluviais. Os arenitos neste modelo formam depósitos de canais abandonados ou em forma de lobos, representando sucessivas progradações de barras cascalhosas (MIALL, 1977).

Tabela 5 - Análise faciológica dos sistemas aluviais da Formação Guarda Velha, com base em Miall, (1977)

Fácies	Litofácies	Estruturas	Fotofácies	Interpretação
Gm 	Brecha com predominância de blocos e ocorrências isoladas de matacões	Estratificação cruzada planar	Rocha de textura grossa, com clastos angulosos e estratificações cruzadas bem definidas	Depósitos de leques aluviais distais formados em condições de altas descarga energética episódica
Gms 	Brecha com lentes de conglomerados e arenitos	Estratificação cruzada planar	Brecha conglomerática com clastos angulosos; lentes de conglomerados e arenitos de textura fina	Depósitos de canais com variações no fluxo de energia
Gt 	Conglomerado arenoso, matriz-suportado; clastos de tamanho grânulo a seixo; pacotes de 1 a 7m de espessura	Estratificações cruzadas planares e clastos imbricados	Conglomerado matriz suportado com predomínio de clastos tamanho seixo	Preenchimento de canais; Formação de barras linguoides cascalhosas
Gp 	Conglomerado com alto grau de empacotamento e imbricação de clastos	Estrutura maciça	Conglomerado com seixos imbricados e clastos arredondados.	Barras linguosas
St 	Lentes de arenitos médios a grossos; podem conter grânulos e seixos; espessura de até 50cm	Estratificações cruzadas planares isoladas ou agrupadas	Arenitos de textura fina em lentes aparentemente maciças ou com estratificação plano paralela	Depósitos de dunas em regime de fluxo inferior
Sh 	Arenitos médios a grossos, podendo conter grânulos e seixos;	Estratificação plano paralela	Arenitos com estratificação plano paralela	Acamamento planar em regime de fluxo superior e inferior

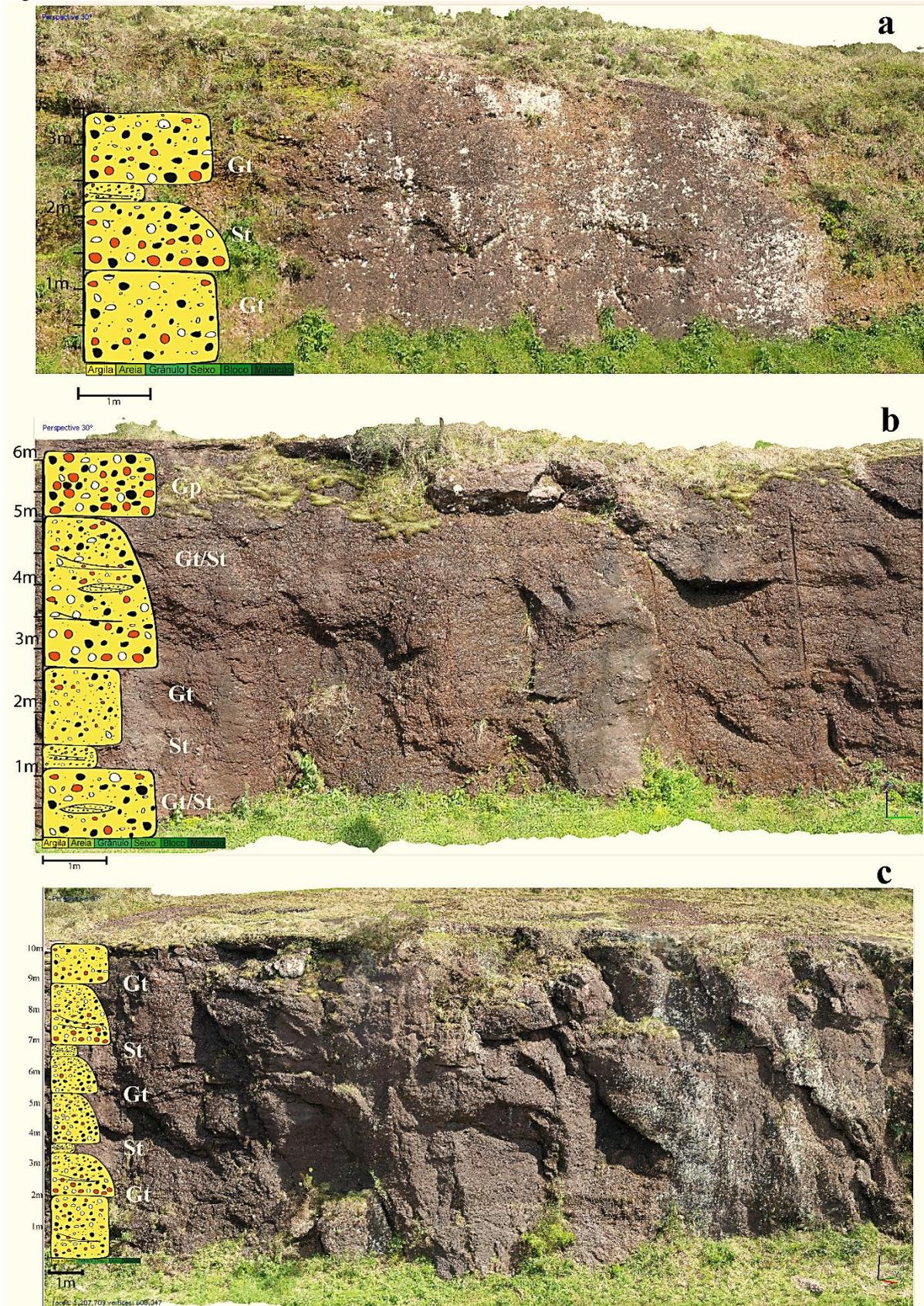
Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 16 - Perfil vertical de fácies e fotofácies do AV-1.



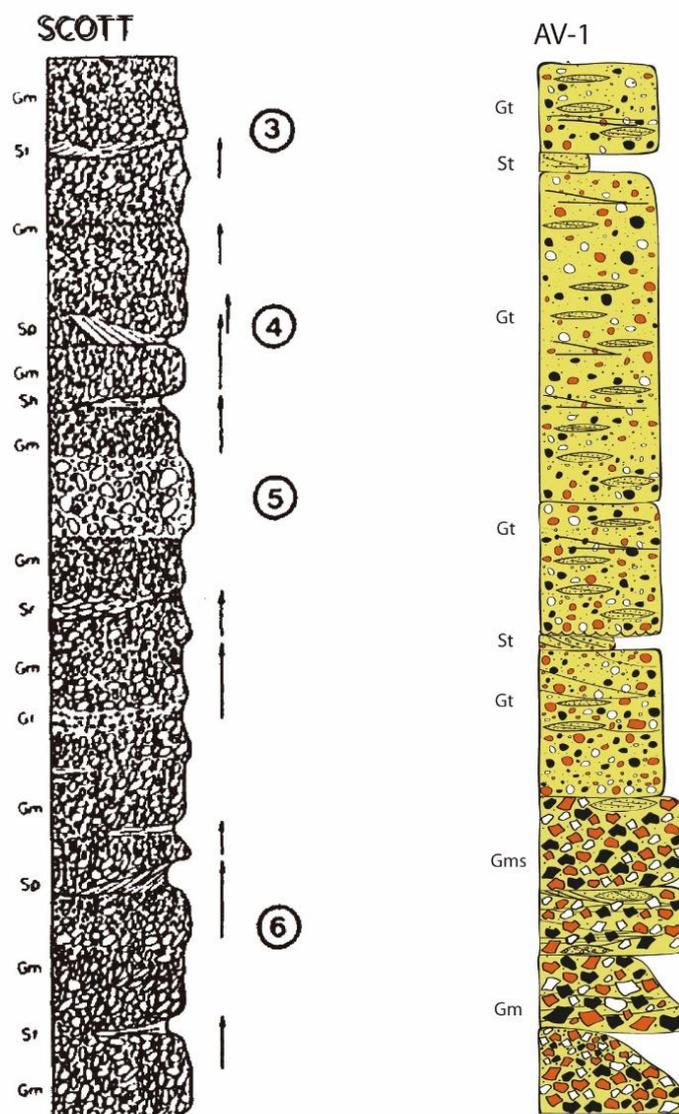
Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 17 - Perfis verticais de fácies dos afloramentos CE-1 em A, CE-2 em B e CE3 em C



Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 18 - Parte do perfil vertical do afloramento AV-1 comparado com o modelo tipo Scott de Miall (1977). (3) canal secundário; (4) barra truncada/cunha de areia; (5) Depósitos de fluxo de detritos; (6) barras superimpostas. As flechas no modelo indicam os a ciclicidade das sequências



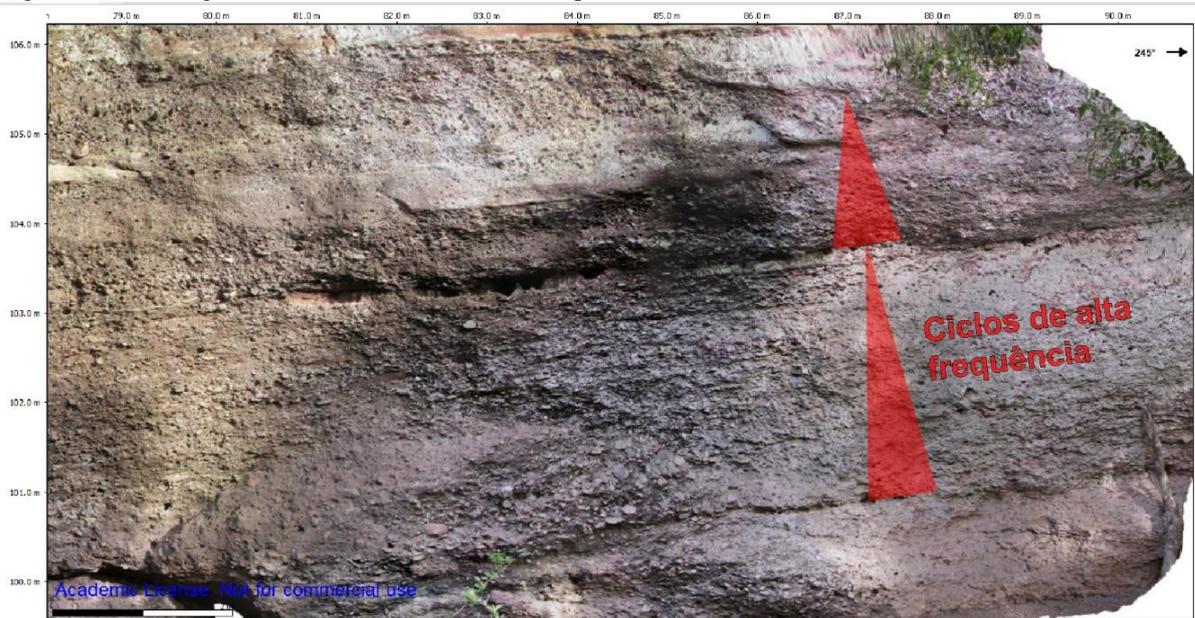
Fonte: Extraído e modificado de MIALL (1977).

5.2.3 Estratigrafia de Sequências

Nos quatro afloramentos analisados (Figuras 18 e 19) ocorrem sucessões de ciclos granodescrescentes ascendentes, formados na base por fácies de alta energia, como Gm, Gt e Gp, sendo sucedidos ou lateralmente distribuídos com fácies de menor energia, como Sh e St. Os ciclos podem ocorrer em pelo menos duas hierarquias. Os ciclos de mais alta frequência variam entre algumas dezenas de centímetros até 5 metros (Figura 21). Esses ciclos são denominados de ciclos elementares. Foram interpretados 25 ciclos elementares na seção vertical do AF-1 (Figura 22). Os ciclos de menor frequência são definidos pelo padrão de

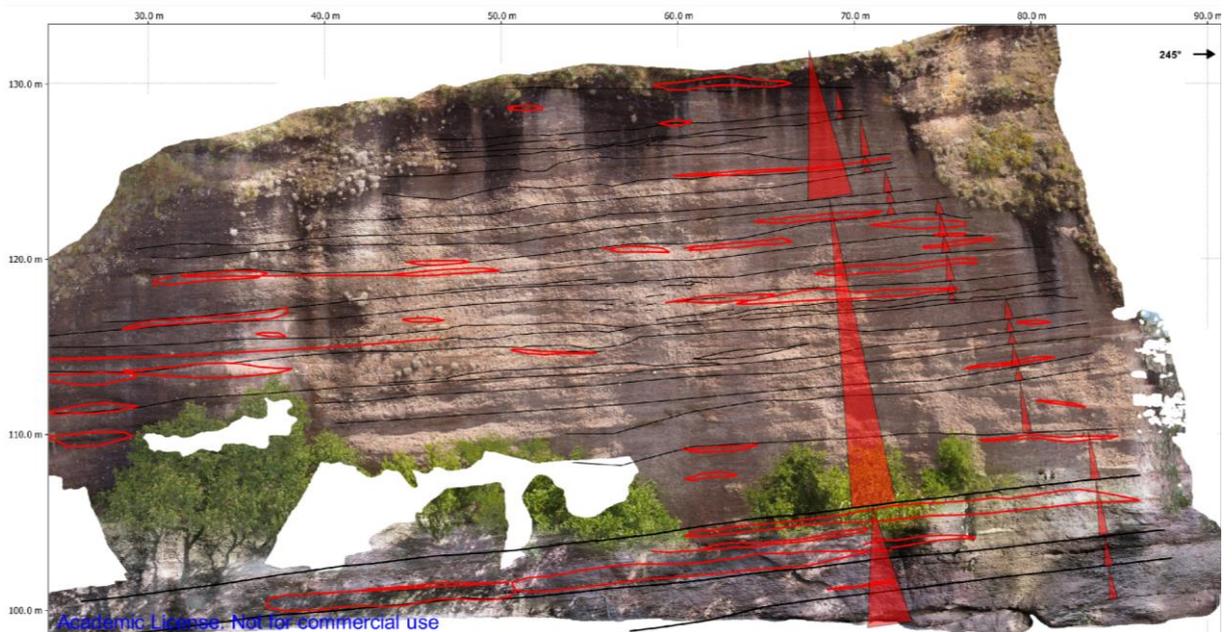
empilhamento aumento do volume das fácies St e Sh para o topo. Foram definidas três sequências de menor frequência, conforme abaixo descrito e ilustrado na figura 22.

Figura 19 - Ciclos granodécrescentes de mais alta frequência



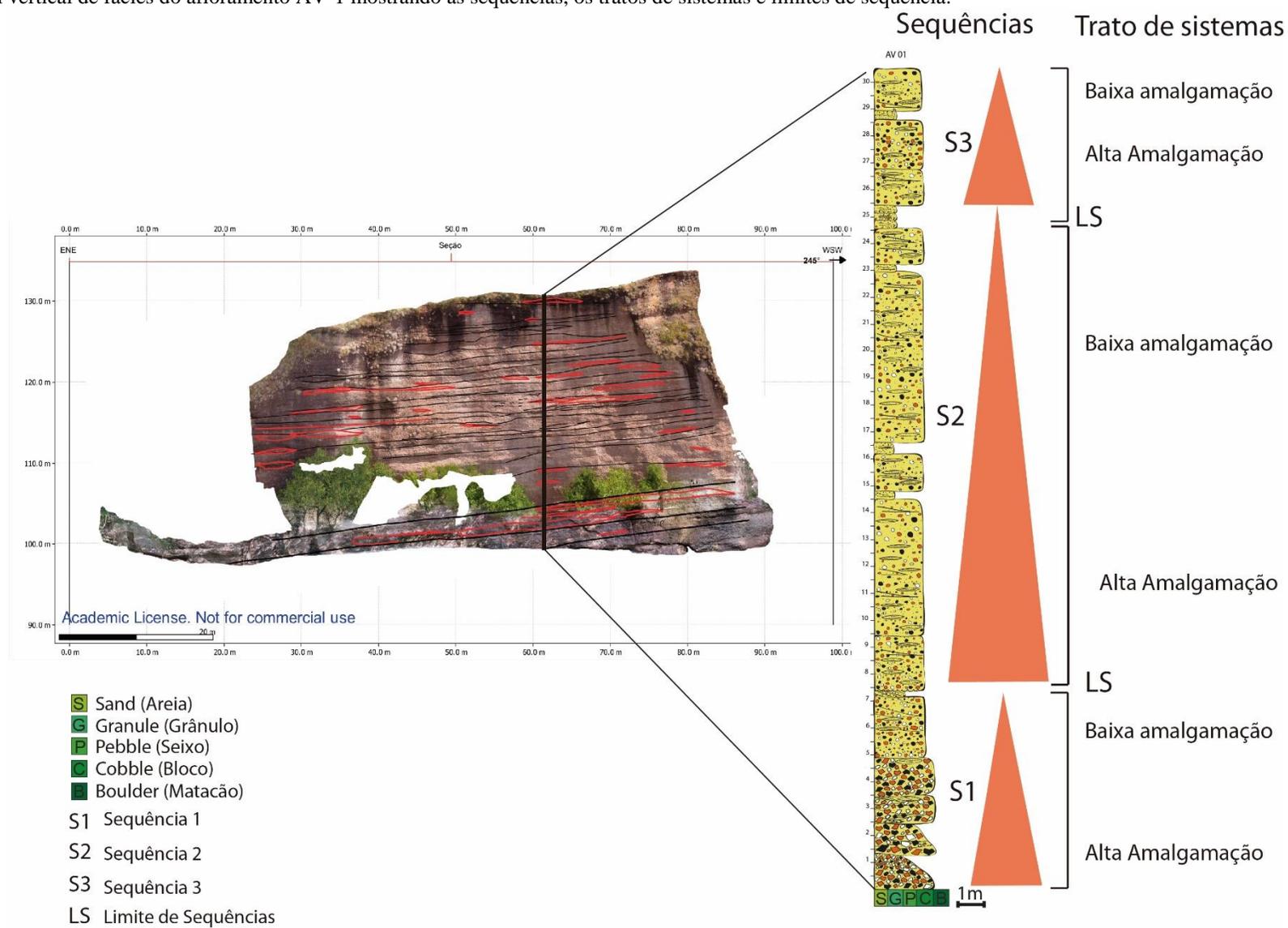
Fonte: A autoria própria (2018)

Figura 20 - Seção geológica do Afloramento AF-1. Em preto estão marcados os limites dos ciclos elementares e em vermelho as fácies arenosas (St e Sh). Os triângulos vermelhos indicam os ciclos elementares e os ciclos de menor frequência.



Fonte: A autoria própria.

Figura 21 - Perfil vertical de fácies do afloramento AV-1 mostrando as seqüências, os tratos de sistemas e limites de seqüência.



Fonte: Autoria própria (2018)

A sequência 1 se inicia com a deposição de leques aluviais (fácies *Gm*), que configura um padrão de empilhamento de alta amalgamação. Com a diminuição da energia do sistema, depositaram-se conglomerados e arenitos (Fácies *Gms* e *Gt*), configurando o padrão de empilhamento de baixa amalgamação (Figura 22). A camada de arenito (fácies *Sh*) marca o limite de sequências, no final do trato de sistemas de baixa amalgamação. Esta sequência possui 7,8 metros de espessura (Fig. 21).

A sequência 2 se inicia com a deposição de conglomerados (Fácies *Gt*) em contato com a superfície deposicional acima da camada de arenito (Fácies *Sh*). Nesta sequência, os conglomerados configuram o padrão de empilhamento de alta amalgamação. Conforme diminuem as frequências de inundações, a frequência das fácies *Sh* e *St* aumenta sucessivamente, que representam o padrão de empilhamento de baixa amalgamação. O limite de sequências se encontra abaixo de um novo fluxo de descarga, que deposita sedimentos tamanho bloco acima de uma camada espessa de arenitos (Figura 22; Fácies *St* e *Sh*). A sequência 2 possui 17 metros de espessura.

A sequência 3 marca o início do trato de sistemas de alta amalgamação, com depósitos da fácies *Gt* acima da sequência 2. Essa sequência se desenvolve em períodos de maiores inundações, representada pela fácies *Gp*, em que ocorrem conglomerados maciços característico de barras cascalhosas. Esta sequência termina no final do trato de sistemas de baixa amalgamação, caracterizado por uma camada de arenito. A camada 3 possui 7,8 metros de espessura.

O padrão de empilhamento *Upstream* que configura esse depósito fluvial determina uma correlação entre a acomodação e o grau de amalgamação dos canais fluviais. Se considerou que o sistema deposicional fluvial preservado na Formação Guarda Velha sofreu de maneira geral um alto grau de amalgamação dos canais. No entanto não se identificou neste depósito alta taxa de avulsão dos canais. Sendo assim, com base no aumento e diminuição da granulometria pode-se obter parâmetros indicativos de variações da energia do sistema. O padrão de ciclicidade indica que a deposição foi controlada por períodos de maior e menor descarga fluvial, relacionados a variações na taxa de precipitação pluviométrica. Os ciclos ocorrem em pelo menos duas ordens de grandeza na escala do levantamento realizado.

5.3 Analogia ao reservatório de Prudhoe

O campo de Prudhoe é um reservatório permotriássico localizado ao norte do Alasca e um dos maiores reservatórios de óleo e gás da América do Norte (ATKINSON et al., 1990). As

rochas reservatório compreendem depósitos marinhos rasos e conglomerados e arenitos de sistemas fluviais entrelaçados, que constituem as regiões mais produtivas (ATKINSON et al., 1990). O principal reservatório possui arenitos com porosidades que variam de 15 a 30% e permeabilidade de 50 a 3.000 mD. As reservas são de cerca de 20×10^9 barris de petróleo e uma capa de gás de 35 trilhões de pés cúbicos (ATKINSON et al., 1990).

A variabilidade vertical dos depósitos fluviais entrelaçados é um fator determinante na qualidade dos reservatórios. Altas permeabilidades nas camadas mais cascalhosas podem ser desfavoráveis, atuando como zonas “ladras” de óleo. Atkinson et al., (1990) dão um exemplo no campo de Prudhoe no Alasca, indicando algumas características deste reservatório e constatam que camadas espessas e largas de arenitos com alta conectividade podem ser mais favoráveis, comparado com grandes camadas de conglomerados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os depósitos de canais fluviais entrelaçados da Formação Guarda Velha desenvolveram-se majoritariamente em um padrão de empilhamento de alta amalgamação, sem o desenvolvimento de depósitos de planície de inundação. A variabilidade climática ao longo da formação destes depósitos exerceu papel fundamental na deposição dos canais. Os pulsos de variações na energia do fluxo dos canais foram responsáveis pela deposição de camadas sucessivas de sedimentos de textura grossa e a intercalação de camadas de arenitos médios a grossos em meio aos conglomerados.

Em rios entrelaçados os canais podem sofrer alterações no seu curso devido à alta energia de descarga. No entanto, pelo padrão em que aparecem, estes canais sofreram pouca ou nenhuma alteração ao longo do curso do rio, pois a ciclicidade temporal com que os canais se formaram é quase homogênea (Fig. 20). A ausência de vegetação no período que os canais se formaram também pode explicar a homogeneidade com que estão dispostos, pois canais não vegetados tendem a ser largos, espalhando a corrente por longas distâncias. Consequentemente tendem a formar um padrão homogêneo com baixas taxas de sinuosidade.

Quanto aos elementos arquiteturais, as barras cascalhosas encontradas na base do afloramento AV-1 - em que os clastos tem padrão imbricado e menor quantidade de areia - aparecem também no topo, porém com granulometria menor, clastos arredondados. Essas características demonstram alterações nas descargas e energias de fluxo, e podem ser consideradas como as duas maiores descargas que o sistema sofreu. Por fim, os depósitos de dunas indicam momentos de diminuição na energia do sistema deposicional, sendo indicativas

de menor precipitação pluviométrica na área fonte provavelmente relacionada a um clima mais árido. As maiores dunas encontram-se na porção central do afloramento, truncadas por depósitos de canais (Fig. 20).

O uso de modelos virtuais de afloramentos para análise faciológica e estratigráfica é uma técnica inovadora que traz vantagens e desafios na execução. Os modelos construídos neste trabalho possuem resolução final adequada, embora com distorções e erros de georreferenciamento, cumpriram o papel de complemento a análise de campo, permitindo compreender melhor as interpretações realizadas.

REFERÊNCIAS

- AGISOFT PHOTOSCAN PROFESSIONAL.** (2018). Disponível em: <<http://www.agisoft.com/>>.
- ALMEIDA, R.P. (2005): **Tectônica e sedimentação do Ediacarano ao Ordoviciano: exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Caacupé (Paraguai Oriental)**. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 203p.
- ALMEIDA, R.P.; JANIKIAN, L.; FRAGOSO-CESAR, A.R.S.; MARCONATO, A. (2009): Evolution of a rift Basin dominated by subaerial deposits: The Guaritas Rift, Early Cambrian, Southern Brazil. **Sedimentary Geology**. V. 217, P. 30-51.
- ATKINSON, C.D; MCGOWEN, J.H; BLOCH, S; LUNDELL, L.L; TRUMBLY, P. N. (1990): Braidplain and deltaic reservoir, Prudhoe Bay Field, Alaska. In: Sandstone Petroleum Reservoirs, J.H. Barwis, J.G. McPherson, and J.R.J. Studlick, eds, **Springer-Verlag**, p. 205-224.
- CARRIVICK, J.L.; SMITH, M.W.; QUINCEY, D.J. (2016): Structure from Motion in the Geosciences. **New Analytical Methods in Earth and Environmental Science**. Wiley Blackwell, Sussex, 197p.
- CATUNEANU, O.; GALLOWAY, W.E.; KENDALL, C.G.St.C.; MIALL, A.D.; POSAMENTIER, H.W.; STRASSER, A.; TUCKER, M.E. (2011) Sequence Stratigraphy: Methodology and Nomenclature. **Newsletters on Stratigraphy**, v. 44/3, p, 173-245.
- CATUNEANU, O. (2017): Sequence Stratigraphy: Guidelines for a Standard Methodology. **Stratigraphy & Timescales**, vol 2, p. 1-57.
- CAWOOD, A.J.; BOND, C.E.; HOWELL, J.A.; BUTLER, R.W.H.; TOTAKE, Y. (2017): LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models. **Journal of Structural Geology**, 98:67-82.
- CHEMALE JR, F.; SILVA, L.C.; HARTMANN, L.A. (1995) Stratigraphy and Tectonism of Precambrian to Early Paleozoic Units. **XVIII Acta Geologica Leopoldensia**, 42, 5-117.
- CHEMALE JR, F. (2000): Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense, in: HOLZ, M., DE ROS, L.F. (Eds), **Geologia do RS**. CIGO/UFRGS, Porto Alegre, pp.13-52.
- CHEMALE JR, F.; ALMEIDA, D.P.M.; MACHADO, A. (2012): Late to Post-Orogenic Brasiliano-Pan-African Volcano-Sedimentary Basins in the Dom Feliciano Belt, Southernmost Brazil. In: **Petrology – New Perspectives and Applications**, Edition: 1, Chapter 5, Publisher: Rijeca, Editors: Ali Ismail Al-Juboury, pp. 73-130.
- ELTOM, H.A., KUBURB, A.K., ABDULRAZIQB, A.M., BABALOLAB, L.O., MAKKAWIB, M.H., ABDULLATIFB, O.M. (2017) Three-dimensional outcrop reservoir

analog model: A case study of the Upper Khuff Formation oolitic carbonates, central Saudi Arabia. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, p. 115-127.

ENGE, H.D., BUCKLEY, S.J., ROTEVATN, A., HOWELL, J.A. (2007). From outcrop to reservoir simulation model: Workflow and procedures. **Geosphere**, volume 3, nº 6; p.469-490.

FAMBRINI, G.L; ALMEIDA, R.P.; FRAGOSO-CÉSAR, A.R. (2006): Estratigrafia e evolução paleogeográfica do Grupo Santa Bárbara (Eoediacarano) na Sub-bacia Camaquã Ocidental, Rio grande do sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências** 36 (3): 550-565.

FRAGOSO-CESAR, A.R.S. (1991) **Tectônica de Placas no Ciclo Brasileiro: as orogenias dos Cinturões Dom Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado, Departamento de Geoquímica e Geotectônica - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 366p.

FRAGOSO-CESAR, A.R.S.; FAMBRINI, G.L., ALMEIDA, R.P.; PELOSI, A.P.M.R.; JANIKIAN, L. A Bacia do Camaquã: um sistema intracontinental anorogênico de *rifts* do Neoproterozóico III – Eopaleozóico no Rio Grande do Sul. In: Encontro sobre a estratigrafia do RS: Estudo e Bacias. **Anais**. p. 139-144, 2003.

GODINHO, L.P.S; ALMEIDA, R.P.; MARCONATO, A.; SANTOS, M.G.M.; FRAGOSO-CESAR, A.R.S. **Análise de proveniência dos arenitos conglomeráticos do Grupo Guaritas (RS): Implicações para o paleoclima e a paleogeografia da sub-bacia Camaquã Central no Eocambriano**. Geologia USP, Série científica, São Paulo, v. 13, n.2, p. 123-144, 2013.

GUADAGNIN, F.; KUMAIRA, S.; GONÇALVES, I. G.; CARON, F. (2017) Modelos Virtuais de Afloramentos aplicados ao ensino de geologia estrutural e tectônica. Anais do VXI SIMPOSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS,

HARTMANN, L. A.; CHEMALE Jr.; F.; PHILIPP, R. P. (2007): Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-cambriano. In: IANUZZI, R.; FRANTZ, J.C. (Org.). In: **50 anos de Geologia. 1 ed.** Instituto de Geociências, Porto Alegre. Editora Comunicação e Identidade, v. 1, p. 97-123.

HARTMANN, L.A.; SANTOS, J.O.S.; MCNAUGHTON, N.J. (2008): Detrital zircon U-Pb age data, and Precambrian provenance of the Paleozoic Guaritas Formation, southern Brazilian Shield. **International Geology Review**, vol. 50, issue 4, pp. 364-374

HASENACK, H. & WEBER, E. (org.) (2010): Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul – escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). ISBN 978-85-63483-00-5 (livreto) e ISBN 978-85-63843-01-2 (DVD).

HOWELL J.A.; MARTINIUS A.W.; GOOD T.R. (2014): The application of outcrop analogues in geological modelling: a review, present status and future outlook. From: Martinius, A. W., Howell, J. A. & Good, T. R. (eds) 2014. Sediment-Body Geometry and Heterogeneity: Analogue Studies for Modelling the Subsurface. **Geological Society Special Publications**, 387, 1–25

JANIKIAN, L.; ALMEIDA, R.P.; FRAGOSO-CESAR, A.R.S.; CORRÊA, C.R.A.; PELOSI, A.P.M.R. (2005): **Evolução paleoambiental e seqüências deposicionais do Grupo Bom Jardim e Formação Acampamento Velho (Supergrupo Camaquã) na porção norte da Sub-Bacia Camaquã Ocidental.** Tese de doutorado, Instituto de Geociências, departamento de sedimentologia, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP.

JONES, R.R., MCCAFFREY, K.J.W., WILSON, R.W. HOLDSWORTH, R.E. (2004). Digital field data acquisition: towards increased quantification of uncertainty during geological mapping. In: Curtis, A. & Wood, R. (eds.) Geological Prior Information. **Geological Society Special Publication**, 239, In Press.

MIALL, A. D. 1977. Lithofacies types and vertical profile models of braided river deposits, a summary. In: A. D. MIALL (ed.), Fluvial Sedimentology. **Canadian Society of Petroleum Geologists**, Calgary, p. 597-604.

MIALL, A.D. (1985) Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. **Earth Science Reviews**, 22(4)-.261-308.

MIALL, A.D. (2014): Fluvial depositional systems. **Springer-Verlag**, Berlin, 316 p.

MOVE™. **Midland Valley Exploration**, 2017.

NESBIT, P.R.; DURKIN, P.R.; HUGENHOLTZ, C.H.; HUBBARD, S.H.; KUCHARCZYK, M. 3-D stratigraphic mapping using a digital outcrop model derived from UAV images and structure-from-motion photogrammetry. **Geosphere**, v. 14, no. 6, 2018.

NÓBREGA, J.E.S. **Proveniência Sedimentar do Grupo Guaritas, Cambriano da Bacia do Camaquã (RS).** Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 48p, 2011.

PAIM, P.S.G. (1995) **Alluvial Palaeogeography of the Guaritas Depositional Sequence of Southern Brazil.** Spec. Publs. Inter. Ass. Sediment., 22, p. 3-16.

PAIM, P.S.G.; CHEMALE JR., F.L.; CUNHA, R. (2000): A Bacia do Camaquã. In: HOLZ, M., DE ROS, L.F. (Eds.), **Geologia do Rio Grande do Sul.** CIGO-UFRGS, Porto Alegre, p. 231-274.

PAIM, P.S.G.; CHEMALE JR., F.L.; WILDNER, W. (2014) Estágios evolutivos da Bacia do Camaquã. *Ciência e Natura*, v.36 Ed Especial, p. 183-193. In: **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas-UFSM.**

PHILLIP, PIMENTEL CHEMALE JR (2016): Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. **Brazilian Journal of Geology**, 46 (Suppl 1): 83-104.

PRINGLE, J.K.; HOWELL J.A.; HODGETTS, D.; WESTERMAN, A.R.; HODGSON, D.M. (2006): **Virtual outcrop models of petroleum reservoir analogues: a review of the current state-of-the-art:** *First Break*, v. 24, p. 33–42.

RIBEIRO, M.; LICHTENBERG, E. (1978): Síntese da Geologia do Escudo do Rio Grande do Sul. **Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia Vol 6**: 2451-2463.

ROBERTSON, J.F. Revision of the stratigraphy and nomenclature of rocks units in the Caçapava-Lavras region, state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Notas e estudos**. p. 41-56, 1966.

SANTOS, M.G.M. (2010): **Tectônica e Sedimentação na Bacia do Camaquã Central (RS): Exemplos do Grupo Guaritas e do Grupo Santa Bárbara**. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo-SP, 113p.

SGAVETTI, M. (1991) Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems. In: WEIMER, P. LINK, M.H. (Eds) *Frontiers in Sedimentary Geology Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems*, Springer-Verlag, New York, p. 107-124.

TAVANI, S.; CORRADETTI, A. & BILLI, A. (2016) High precision analysis of an embryonic extensional fault-related fold using 3D orthorectified virtual outcrops: The viewpoint importance in structural geology. **Journal of Structural Geology** v. 86, p. 200–210.

VAIL. P.R.; MITCHUM, R.M. & THOMPSON, S. (1977) Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, part 3: relative changes of sea level from coastal onlap. In: PAYTON, C.E. (Ed.) *Seismic stratigraphy – application to hydrocarbon exploration*. **American Association of Petroleum Geologists Memoir** 26: 63-81, 1977.

VOLGGER, S.A. & CRUDEN, A.R. (2016) Mapping folds and fractures in basement and cover rocks using UAV photogrammetry, Cape Liptrap and Cape Paterson, Victoria, Australia. **Journal of Structural Geology**, 85: 168-187.