

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

DANIELE MARTINS SOARES

**ESTRATIGRAFIA DE ALTA FREQUÊNCIA E MODELAGEM DE
RESERVATÓRIO A PARTIR DE MODELOS VIRTUAIS DE AFLORAMENTO,
EXEMPLO DA FORMAÇÃO PEDRA PINTADA, BACIA DO CAMAQUÃ**

**CAÇAPAVA DO SUL
2019**

DANIELE MARTINS SOARES

**ESTRATIGRAFIA DE ALTA FREQUÊNCIA E MODELAGEM DE
RESERVATÓRIO A PARTIR DE MODELOS VIRTUAIS DE AFLORAMENTO,
EXEMPLO DA FORMAÇÃO PEDRA PINTADA, BACIA DO CAMAQUÃ**

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. Ezequiel Galvão de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Felipe Guadagnin

**CAÇAPAVA DO SUL
2019**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

M676e Martins Soares, Daniele

Estratigrafia de alta frequência e modelagem de
reservatório a partir de modelos virtuais de
afloramento, exemplo da Formação Pedra Pintada, Bacia
do Camaquã / Daniele Martins Soares.

108 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2019.

"Orientação: Ezequiel Galvão de Souza".

1. Modelos Virtuais de Afloramento. 2. Análogos de
reservatórios. 3. Heterogeneidades. 4. Modelos
geocelulares . 5. Depósitos flúvio-eólicos. I. Título.

DANIELE MARTINS SOARES

**ESTRATIGRAFIA DE ALTA FREQUÊNCIA E MODELAGEM DE
RESERVATÓRIO A PARTIR DE MODELOS VIRTUAIS DE AFLORAMENTO,
EXEMPLO DA FORMAÇÃO PEDRA PINTADA, BACIA DO CAMAQUÃ**

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: 11, de dezembro e 2019.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Ezequiel Galvão de Souza
Orientador
(UNIPAMPA)



Msc. João Pedro Formolo Ferronato
(UFRGS)



Msc. Carrel Kifumbi
(UFRGS)

Dedico este trabalho aos meus pais, Donizete e Clarice.

RESUMO

Depósitos flúvio-eólicos correspondem a ótimos reservatórios de água, óleo e gás. Diversos trabalhos têm demonstrado que estes tipos de depósitos apresentam arquitetura deposicional extremamente complexa gerando heterogeneidades nos reservatórios em diferentes escalas, desde a microscópica até a escala de reservatório. Tradicionalmente, a indústria do petróleo realiza seus estudos estratigráficos com base em dados de subsuperfície, como linhas sísmicas e perfis de poços. Entretanto o alto custo e o grande espaçamento entre os dados de poços, bem como a baixa resolução vertical dos dados sísmicos, dificulta a caracterização geológica das rochas em subsuperfície. A utilização de afloramentos análogos a partir de dados de superfície visa solucionar tal problemática, pois, através destes, é possível melhorar a compreensão da arquitetura, da geometria e da distribuição de fácies do reservatório de interesse. Os estudos de afloramentos análogos podem ser realizados a partir de modelos computacionais (modelos virtuais de afloramentos – MVA). Esse método permite a reconstrução das rochas em uma plataforma digital, possibilitando a análise em perspectiva das mesmas. Visando progredir nesta metodologia e auxiliar neste contexto, este trabalho tem como objetivo a análise das heterogeneidades das rochas depositadas em sistemas flúvio-eólicos através da utilização da estratigrafia de sequências de alta resolução e utilizando modelos virtuais de afloramento aplicados na Formação Pedra Pintada tendo como produto final um modelo geocelular que sirva de análogo para reservatórios de hidrocarbonetos e água. Através deste trabalho foram delimitadas nove litofácies, três associações de litofácies, sete fotofácies e quatro associações de fotofácies caracterizando a arquitetura estratigráfica e o modelo deposicional que permitiram a caracterização de heterogeneidades com escalas gigascópicas, megascópicas, macroscópicas e mesoscópicas presentes na área de estudo. A partir das associações de fotofácies/litofácies obteve-se volumes geocelulares que representam a geometria dos depósitos e possibilitam a representação das variações internas de um reservatório em sistemas flúvio-eólicos, dando, assim, um caráter preditivo utilizável na exploração dos reservatórios.

Palavras-Chave: Modelos Virtuais de Afloramento. Análogos de reservatórios. Heterogeneidades. Modelos geocelulares. Depósitos flúvio-eólicos.

ABSTRACT

Fluvial aeolian deposits correspond to excellent water, oil and gas reservoirs. Several studies have shown that these types of deposits present extremely complex depositional architecture generating heterogeneities in reservoirs at different scales, from microscopic to reservoir scale. Traditionally, the oil industry performs its stratigraphic studies based on subsurface data such as seismic lines and well profiles. However, the high cost and the large spacing between the data, as well as the low resolution of the seismic data, make the geological characterization of the subsurface rocks difficult. The use of analogous outcrops from surface data aims to solve this problem because, through them, it's possible to improve the understanding of the reservoir architecture, geometry and facies distribution of interest. The analogous outcrop studies can be realized from computational models (Virtual Outcrop Models – VOM). This method allows the reconstruction of the rocks in a digital platform, making possible their perspective analysis. Aiming to progress at this methodology and help in this context, the goal of this work is to analyze the heterogeneities of the rocks deposited in fluvial aeolian systems by using high-resolution sequence stratigraphy and using virtual outcrop models applied to the Pedra Pintada Formation, having as product a geocellular model that serves as an analog for hydrocarbon and water reservoirs. Through this work nine lithofacies, three lithofacies associations, seven photofacies, and four photofacies associations were delimited characterizing the stratigraphic architecture and the depositional model that allowed the characterization of heterogeneity with gigascopic, megascopic, macroscopic and mesoscopic scales present in the study area. From the photofacies/lithofacies associations, we obtained geocellular volumes that represent the geometry of the deposits and allow the representation of the internal variations of a reservoir in fluvial-eolian systems, thus giving us, a predictive character usable in reservoir exploration.

Key-Words: Virtual outcrop models. Reservoir analogs. Heterogeneities. Geocellular model. Fluvio-eolian deposits.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. A) Brasil; B) Estado do Rio Grande do Sul; C) Área em destaque em B, mostrando o acesso a região estudada.	20
Figura 2 - Ortofotomosaico da área de estudo, mostrando em detalhe todos os afloramentos estudados: Pedra Pintada, Pedra do Meio e Pedra Branca.	20
Figura 3 - Mapa geotectônico do Escudo Sul-Riograndense.	22
Figura 4 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Camaquã e unidades relacionadas.	23
Figura 5 - Unidades da Bacia do Camaquã e eventos ígneos contemporâneos.	24
Figura 6 - Mapa Geológico do Grupo Guaritas.	25
Figura 7 - Coluna estratigráfica esquemática das Formações que compõem o Grupo Guaritas.	26
Figura 8 - Gráfico da relação entre o tamanho de grão <i>versus</i> o comprimento de onda das formas eólicas e sua classificação em três grupos distintos: <i>ripples</i> , dunas e <i>draas</i>	29
Figura 9 - Classificação do tipo de estratificação de marcas onduladas eólicas considerando o ângulo de cavalgamento.	30
Figura 10 - Seções horizontais e transversais mostrando as estratificações eólicas internas à duna.	31
Figura 11 - Seção esquemática da margem ao centro de um erg mostrando zonas saturadas, metassaturadas e subsaturadas de areia.	32
Figura 12 - Sucessão vertical de fácies de interdunas.	33
Figura 13 - Modelo de formação de superfícies limítrofes pelo cavalgamento e migração de dunas eólicas: (A) dunas simples; (B) dunas compostas.	35
Figura 14 - Supersuperfícies truncando distintos episódios de acumulação eólica.	36
Figura 15 - As principais fases em um sistema eólico para ocorrer a sua preservação.	37
Figura 16 - A acumulação eólica ocorre pela migração e cavalgamento de formas de leito em contextos com um balanço. Qi: fluxo de entrada de sedimentos (influxo); Qe: fluxo de saída de sedimentos (efluxo).	39
Figura 17 - Acumulação em sistemas eólicos secos, úmidos e estabilizados.	40
Figura 18 - Sistemas eólicos e as suas variações arquiteturais conforme o tipo de sistema. ...	41
Figura 19 - Exemplo de como é realizado o imageamento pela técnica do LiDAR.	43
Figura 20 - Representação gráfica dos parâmetros envolvidos na visualização estereoscópica. Considerando um objeto P, fotografado de duas câmeras (C1 e C2). A posição de P, nas duas fotos vai depender dos parâmetros da câmera (distância focal) e a sua orientação.	44

Figura 21 - Terminações de Refletores da Sismoestratigrafia.....	45
Figura 22 - Modelo utilizado para levantamento de perfil colunar em campo.....	49
Figura 23 - Aquisição aérea para a construção do MDS, produto da primeira aquisição aérea. Representação esquemática da área de estudo, mostrando as linhas de voo e as fotografias adquiridas (linha pontilhada preta). A variação nas cores representam a quantidade de fotografias que imagearam um mesmo ponto 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 fotografias.....	51
Figura 24 - Aquisição aérea dos afloramentos Pedra do Meio, Pedra Branca e Pedra Pintada para a construção dos MVA's. Em A, B, C, D e E são mostrados os afloramentos PM, PB média, PP média; PB alta e PP alta, respectivamente. A linha preta pontilhada representa a linha de voo e as cores variando de azul a vermelho representam a quantidade de fotografias que imagearam um mesmo ponto (pixel) durante a aquisição.	51
Figura 25 - Etapas do processamentos das aerotografias no <i>software Agisoft Metashape</i> . Em A alinhamento das fotografias aéreas; B nuvem densa de Pontos; C Mesh; D modelo texturizado.	53
Figura 26 - Procedimento de texturização da malha triângulada.	53
Figura 27 - Georreferenciamento dos MVA's de média resolução com base no MVA da área total. As elipses nas figuras indicam o erro médio de localização dos pontos em X e Y. O erro na longitude é representada em X e erro na latitude é representada em Y.....	55
Figura 28 - Localização do pontos utilizados para o georreferenciamento do MVA PP de alta resolução (A) com base no MVA PP de média resolução (B). As elipses nas figuras indicam o erro médio de localização dos pontos.....	56
Figura 29 - Localização do pontos utilizados para o georreferenciamento do MVA PB de alta resolução (A) com base no MVA PB de média resolução (B). As elipses nas figuras indicam o erro médio de localização dos pontos.....	56
Figura 30 - 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. X representa o erro na longitude; Y representa o erro na latitude; Z representa o erro na altitude.	57
Figura 31 - Terminações de estratos encontrados nos afloramentos.	59
Figura 32 - Padrões de cores utilizados neste trabalho para a descrição das fotofácies.....	59
Figura 33 - Método utilizado para a medição e interpretação de superfícies eólicas de 1° e 2° ordens. A) Modelo virtual de afloramento referente ao MVA-PP de alta resolução; B)	

Digitalização da linha de intersecção, em vermelho superfície eólica, em amarelo estratos cruzados; C) Construção dos planos por triangulação para a extração de suas orientações principais, em vermelho plano correspondente a superfície eólica, em amarelo palnos referentes ao estratos cruzados.	61
Figura 34 - Método utilizado para a construção de volumes geocelulares. A) Modelo virtual de afloramento – MVA; B) Digitalização das linhas de base e topo das camadas; C) Extrusão das superfícies; D) Geração de volumes geocelulares.	62
Figura 35 - (A): Ortofotomosaico superior da área de estudo. (B): Modelo Digital de Superfície (MDS) da área de estudo mostrando na escala de cores a variação das curvas de nível topográficas.	63
Figura 36 - MVA's referente aos afloramentos estudados. A) MVA-PM de média resolução; B) MVA-PB de média resolução. C) MVA-PP de média resolução. D) MVA-PB de alta resolução; E) MVA-PP de alta resolução.	64
Figura 37 - Fotos das litofácies eólicas encontrada no afloramento. A) Litofácies St(e) com estratos cruzados acanalados eólicos de grande porte e litofácies Sl(e) com estratos cruzados de baixo ângulo; B) Litofácies Sl(e) com laminações de marcas ondulas eólicas bem marcadas; C) Camadas com gradação inversa marcadas pela alternância de areia média e fina, levemente fluidizadas; D, E e F) Litofácies Fl, Sm, e Sl(e) mostrando as fases de alternância de inundação e ressecamento.	69
Figura 38 - Fotos das litofácies fluviais encontradas no afloramento. A) Litofácies St com estratos cruzados tangenciais; B) Base dos estratos cruzados (St) com concentração de grânulos na base; C) Camadas com gradação normal marcada por granulos subarredondados com alta esfericidade, de composição quartzosa e intraclastos lamosos sem orientação preferencial; D) Pacote composto por intercalações das litofácies Sm, Sw e Fl mostrando os ciclos de aumento da espessura da fácies Sm; E) Litofácies Sw com marcas onduladas simétricas a levemente assimétricas e com drapes de lama recobrimdo-as; F) Litofácies Sr com marcas onduladas assimétricas com drapes de lama recobrimdo-as.	70
Figura 39 - Fotomosaico interpretado representando as associações de litofácies de depósitos de dunas eólicas.	71
Figura 40 - Representação das litofacies de interdunas. A) Associação de litofácies Sl(e) que se intercalam com lentes de lamitos com gretas de contração (Fl) e drapes de lama. B) Litofácies Sl(e) com laminações de marcas ondulas eólicas; C)) Associação de litofácies Sl(e) que se intercalam com lentes de lamitos laminados com gretas de contração (Fl) e arenito maciço (Sm).	73

Figura 41 - Associação de litofácies flúvio-lacustre. A) Associação das litofácies Sm, Sw e Fl em ciclos de granocrescência e granodecrescência. Observa-se que um aumento da espessura da litofácia Sm próxima ao topo. B) Intercalação das litofácies Sl, Sr e St. C) Nível de seixos concentrados na base do pacote. D) Detalhe para a gradação normal encontrada nas litofácies Sl e St. Escala da foto tem	75
Figura 42 - Levantamento digital referente ao MVA-PP de alta resolução.	76
Figura 43 - Levantamento digital referente ao MVA-PB de alta resolução.....	77
Figura 44 - Fotofácies do sistema eólico. A) Fotofácies St(e) com estratos cruzados acanalados eólicos de grande porte; B) Fotofácies Sl(e) com estratos cruzados de baixo ângulo.....	79
Figura 45 - Fotofácies referente aos depósitos fluviais. A) Fotofácies Sl com estratos cruzados de baixo ângulo, Sh com estratificação plano-paralela e Sm; B) Fotofácies St com estratos cruzados tangenciais de médio porte e Sl com estratos cruzados de baixo ângulo; C) Fotofácies Sl fluidizadas.	79
Figura 46 - Modelo conceitual de migração de um sistema eólico.	82
Figura 47 - MVA da área toda interpretado com a delimitação das principais unidades estratigráficas encontradas na área de estudo. Vista em perspectiva da área de estudo com as seções levantadas em campo e digitalmente plotadas.	85
Figura 48 - Ortofotomosaico do MVA-PP de alta resolução. Seção lateral orientada transversalmente ao sentido do mergulho dos foresets, evidenciando a geometria dos sets e das superfícies limítrofes eólicas. As superfícies aqui interpretadas foram comparadas com o trabalho de Paim e Scherer (2003).	87
Figura 49 - Modelo representando as diferentes escalas de heterogeneidades presentes na sucessão estudada, caracterizando um modelo análogo de reservatório flúvio-eólico do tipo <i>layer cake</i> . A) Heterogeneidades gigascópicas em escala de bacia; B) Heterogeneidades megascópicas caracterizadas pelas variações entre as associações de fácies encontradas na área de estudo; C e D) Heterogeneidades macroscópicas compreendendo as superfícies que delimitam os estratos cruzados eólicos. E) Heterogeneidades mesoscópicas caracterizadas pelas fácies que compõem as associações de fácies.	90
Figura 50 - Modelo geocelular gerado a partir do MVA-PP de média resolução. Os volumes geocelulares em amarelo correspondem a zonas de bons reservatórios pertencentes as unidades eólicas. Os volumes geocelulares em azul correspondem a zonas de máis reservatórios pertencentes as unidades flúvio-lacustres.....	95
Figura 51 - Modelo geocelular gerado a partir do MVA-PB de média resolução. Os volumes geocelulares em amarelo correspondem a zonas de bons reservatórios correspondentes as	

unidades eólicas. Os volumes geocelulares em azul correspondem a zonas de mal reservatórios correspondentes as unidades flúvio-lacustres. A geocélula em vermelho localizada na porção superior corresponde a porção aluvial. 95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Quadro de classificação de fácies para o sistema fluvial segundo Miall (1996)....	47
Quadro 2 - Especificações técnicas do VANT utilizado.	50
Quadro 3 - Média do erro de localização da câmera em cada MVA (X-longitude, Y - latitude e Z - Altitude).	58
Quadro 4 - Resolução (GSD) dos modelos.	64
Quadro 5 - Síntese das litofácies encontradas em campo.....	65
Quadro 6 - Síntese de fotofácies definidas na área de estudo.	77

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	18
2. ÁREA DE ESTUDO.....	19
2.1 Contexto Geológico.....	21
2.1.1 Grupo Guaritas.....	24
2.1.2 Formação Pedra Pintada.....	27
3. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
3.1 Sistemas eólicos.....	28
3.1.1 Formas de leitos.....	28
3.1.2 Interdunas.....	31
3.1.3 Lençóis de areia.....	33
3.1.4 Superfícies limítrofes.....	34
3.1.5 Estratigrafia de sequências de sistemas eólicos.....	37
3.1.6 Tipos de sistemas deposicionais eólicos.....	40
3.2 Modelos virtuais de afloramentos.....	43
3.3 Fotoestratigrafia.....	44
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
4.1 Revisão Bibliográfica.....	46
4.2 Análise faciológica.....	46
4.3 Perfis colunares.....	48
4.4 Aquisição, processamento das fotografia aéreas e geração dos MVA's.....	48
4.5 Resolução e georreferenciamento de MVA's.....	54
4.6 Interpretação geológica dos MVA's.....	58
4.7 Levantamento digital de perfis colunares.....	59
4.8 Medição e identificação de superfícies eólicas.....	60
4.9 Modelagem de reservatório.....	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
5.1 Construção dos MVA's.....	62

5.1.1 Modelo digital de superfície (MDS).....	63
5.1.2 Modelos virtuais de afloramento	63
5.2 Perfis Colunares.....	64
5.3 Análise Litofaciológica	65
5.4 Associação de Litofácies	67
5.4.1 Depósitos de dunas eólicas	67
5.4.2 Depósitos de interdunas.....	70
5.4.3 Depósitos flúvio-Lacustres	72
5.5 Levantamento digital de perfis colunares.....	74
5.6 Análise Fotofaciológica.....	77
5.7 Associação de fotofácies	80
5.7.1 Depósitos de dunas eólicas	80
5.7.2 Depósitos de interdunas.....	80
5.7.3 Depósitos fluviais	81
5.8 Sistema Depositional	82
5.9 Arquitetura Estratigráfica	83
5.10 Superfícies eólicas	85
5.10.1 Superfícies de 1º ordem.....	85
5.10.2 Superfície de 2º ordem	86
5.11 Hierarquia de heterogeneidades.....	86
5.11.1 Escala gigascópica.....	89
5.11.2 Escala megascópica	91
5.11.3 Escala macroscópica.....	92
5.11.4 Escala mesoscópica	92
5.12 Modelo Análogo de Reservatório.....	94
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
REFERÊNCIAS	97
APÊNDICE I.....	106
APÊNDICE II.....	107
APÊNDICE III	108

1. INTRODUÇÃO

Depósitos fluvio-eólicos correspondem a ótimos reservatórios de água e hidrocarbonetos por apresentarem características de permeabilidade e porosidade altas (*e.g.* RICCOMINI; SANT'ANNA; TASSINARI, 2012). Diversos trabalhos têm demonstrado que estes tipos de depósitos apresentam arquitetura deposicional extremamente complexa devido às rápidas taxas de variação vertical e lateral das características sedimentológicas (HAMPSON; HOWELL, 2005), gerando heterogeneidades nos reservatórios em diversas escalas podendo influenciar na taxa de produção e fator de recuperação (PAIM; SCHERER, 2003).

Tradicionalmente, durante a etapa de exploração, a indústria do petróleo realizam estudos estratigráficos com base em dados de subsuperfície, tais como dados sísmicos e dados de poços. Entretanto, o alto custo e o grande espaçamento entre os dados de poços, bem como a baixa resolução dos dados sísmicos dificultam a caracterização geológica.

Em virtude disso, uma prática comum utilizada na indústria é o estudo de afloramentos análogos (SIDLE; LEE, 2010). Essa ferramenta é utilizada para melhor compreensão das heterogeneidades e geometria dos reservatórios, sendo possível obter informações geológicas detalhadas dos reservatórios a partir de dados de superfície. Modelos análogos são rochas geologicamente comparáveis com reservatórios efetivos, em termos de litologia e propriedades dos fluidos, onde o estágio de conhecimento sobre suas propriedades esteja em um nível mais avançado de desenvolvimento do que o reservatório de interesse (HODGIN; HARREL, 2006). Além disso, deve haver uma excelente exposição vertical e lateral com uma área suficientemente ampla e comparável a escala de heterogeneidade requerida (CLARK; PICKERING, 1996 *apud* PRINGLE *et al.*, 2006). O estudo de análogo de afloramento é uma maneira fundamental de melhorar a compreensão da arquitetura, geometria e distribuição de fácies de reservatórios (PRINGLE *et al.*, 2006).

Os estudos de afloramentos análogos podem ser realizados a partir de modelos computacionais, conhecidos como modelos virtuais de afloramentos (MVA's). Esse método permite a reconstrução das rochas em plataforma digital, possibilitando a análise em perspectiva das mesmas (TAVANI, CORRADETTI & BILLI, 2016). Os MVA's não se aplicam somente na modelagem de reservatórios, mas a diversas áreas no ramo das geociências, como na geologia estrutural, estratigrafia, sedimentologia e mapeamento geológico.

A análise de seqüências estratigráficas são determinadas por meio das mudanças dos padrões de empilhamento e pela identificação de superfícies que auxiliam a determinar os padrões

de preenchimento e erosão da bacia (CATUNEANU *et al.* 2009), também é uma ferramenta imprescindível na confecção de modelos de reservatório de hidrocarbonetos por meio da aplicação de métodos de análise faciológica, considerando as superfícies limítrofes e os elementos arquiteturais (MIALL, 1996). A estratigrafia de sequências de alta frequência é uma técnica utilizada para a caracterização das heterogeneidades intrínsecas de reservatórios só que em escala de menor detalhe.

A Formação Pedra Pintada, unidade intermediária do Grupo Guaritas (Bacia do Camaquã/RS), é caracterizada por sistemas deposicionais flúvio-eólicos que se alternam ciclicamente (*e.g.*, PAIM; SCHERER, 2007; ALMEIDA *et al.*, 2009) e afloram através de serras extensas lateralmente e morros testemunhos, passíveis de observação direta e com fácil acessibilidade. Tal fato faz com que a Formação Pedra Pintada seja o alvo para um estudo de reservatório análogo, permitindo o emprego das ferramentas a serem utilizadas e oferecendo condições ideais para o imageamento 3D e o levantamento estratigráfico em detalhe.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar a caracterização das heterogeneidades dos depósitos da Formação Pedra Pintada e apresentar um modelo de reservatório análogo para sistemas deposicionais flúvio-eólicos a partir de modelos virtuais de afloramento (MVA's).

Para atingir tais objetivos tem-se como objetivos específicos:

- Aplicar uma nova metodologia para análise estratigráfica a partir de MVA's.
- Adquirir imagens, elaborar e interpretar MVA's da área de estudo.
- Realizar análise de fácies/fotofácies e associações de fácies utilizando dados de campo e MVA's.
- Compreender o arcabouço estratigráfico da Formação Pedra Pintada a a
- Construir modelos geocelulares.

1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo de análogos de afloramentos de reservatórios de hidrocarbonetos tem sido muito utilizado na indústria do petróleo (SIDLE; LEE, 2010), pois consiste uma ferramenta de aquisição de dados em escala sub-sísmica de menor custo, permitindo a elaboração de modelos detalhados de reservatórios. Esse método permite o estudo das geometrias dos corpos sedimentares, suas relações espaciais, detecção de estruturas sedimentares e descontinuidades estruturais.

O uso de análogos de reservatórios é justificável baseado principalmente em dois pontos. O primeiro é devido à baixa resolução vertical e horizontal dos dados sísmicos e dados de poços respectivamente. Apesar dos dados sísmicos apresentarem grande recobrimento lateral (em escala de bacia), possuem baixa resolução vertical, pois cada refletor corresponde a extensas camadas de rocha dificultando a identificação das heterogeneidades internas aos reservatórios. Os dados de poços possuem uma excelente resolução vertical, porém uma baixa resolução lateral que prejudica a correlação lateral dos dados de subsuperfície. O segundo ponto é referente ao custo, que se mostra mais acessível que os métodos geofísicos e mais viáveis que à perfuração de poços. Ambos processos têm alto custo e fazem com que se tenha pouca quantidade de dados amostrados em bacias ainda não produtoras, dificultando a caracterização e o modelamento geológico das rochas em subsuperfície.

Segundo Sidle e Lee (2010), a modelagem de reservatório análogo é uma prática comum que visa solucionar esta escassez de informações pois a resolução destes é similar aos reservatórios de interesse, contemplando diversas escalas de heterogeneidades, desde escalas centimétricas a quilométricas. A utilização de MVA's para caracterizar as heterogeneidades destas rochas proporciona uma ferramenta funcional para análise das sequências estratigráficas em uma alta resolução visando a aplicação em modelagem de reservatórios (HODGETTS, 2013).

Depósitos fluvio-eólicos correspondem a ótimos reservatórios de água, óleo e gás, pois apresentam características de permeabilidade e porosidade altas (RICCOMINI, SANT'ANNA; TASSINARI, 2012). A Formação Pedra Pintada é caracterizada por depósitos fluviais e eólicos que se alternam ciclicamente (PAIM; SCHERER, 2007). Devido a essas características, diversos trabalhos foram realizados nesta formação, nos quais aplicaram-se as técnicas da estratigrafia de sequências para a caracterização de reservatórios flúvio-eólicos (*e.g.* PAIM; SCHERER, 2007; ALMEIDA *et al.*, 2009). A utilização desta unidade geológica foi de grande importância no desenvolvimento de conhecimentos e técnicas para estudos de reservatórios

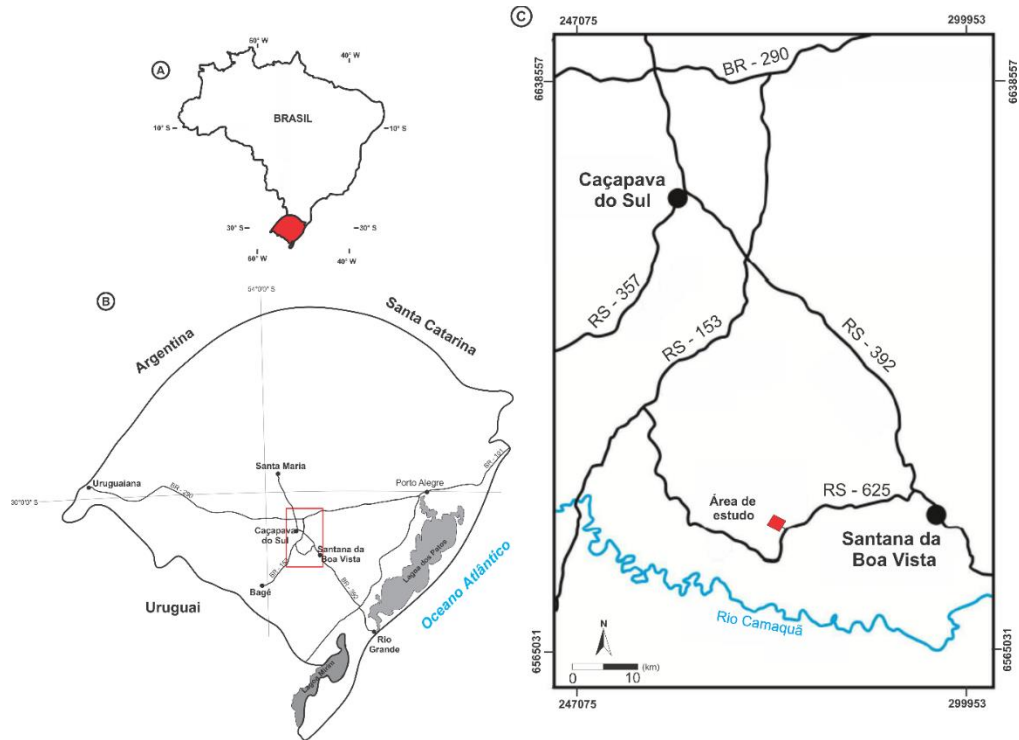
análogos. Além disso, o fluxo de fluídos de reservatórios de água, óleo e gás são fortemente controlados por fatores sedimentológicos/estratigráficos que geram rápidas mudanças laterais e verticais das propriedades petrofísicas, tornando a predição geológica de heterogeneidades extremamente difícil. Tem-se percebido que as propriedades petrofísicas são fortemente influenciadas por fatores deposicionais, associados à geometria dos corpos arenosos e das suas características faciológicas internas. Desta forma, um estudo buscando a compreensão da arquitetura de fácies e estratigrafia destes sistemas deposicionais a partir de MVA's é de fundamental importância na caracterização e gerenciamento de aquíferos e reservatórios de hidrocarbonetos em contextos geológicos similares.

A Formação Pedra Pintada foi escolhida como objeto desse estudo em razão de sua excelente exposição e grande continuidade lateral. A região da Serra do Apertado possui grandes exposições de rochas com fácil acesso, relativamente pouco vegetadas e presença de estruturas sedimentares com dimensões métricas, critérios importantes na hora de escolher áreas para o emprego da metodologia.

2. ÁREA DE ESTUDO

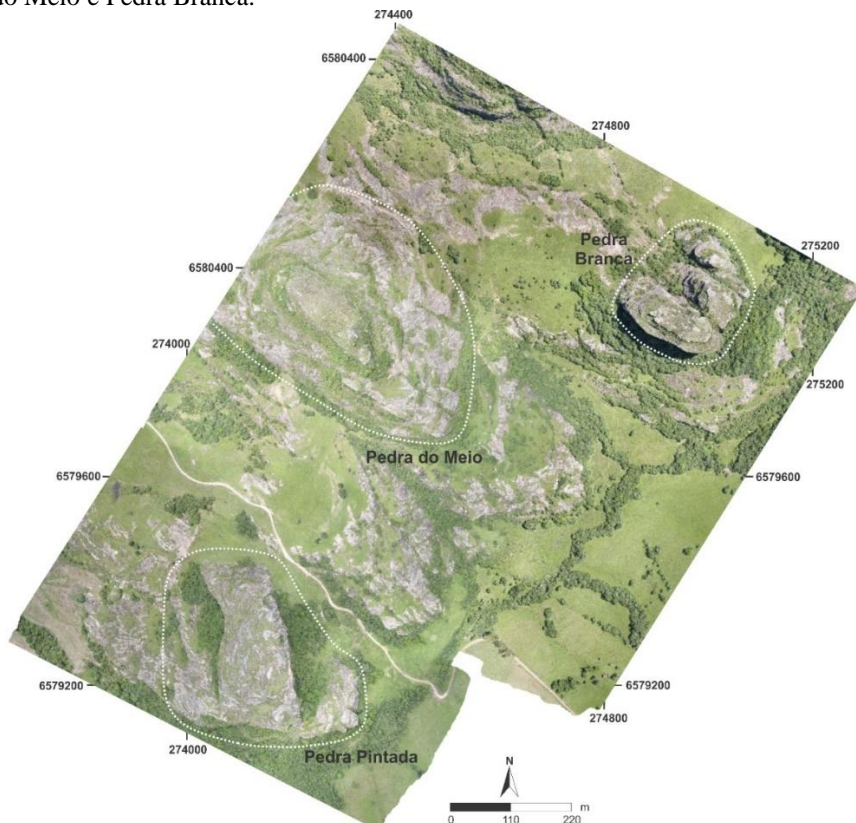
Localizada na porção centro sul do estado do Rio Grande do Sul, no município de Santana da Boa Vista - RS (Figura 1 e 2), a área de estudo possui cerca de 2.5 km² e está situada na região da Serra do Apertado entre as coordenadas 274.080 a 275.155 mE / 6.580.588 a 6.578.531 mS (Projeção Universal Transversa de Mercator/UTM, zona 22S, DATUM SIRGAS 2000). O acesso à área, a partir de Porto Alegre, se dá por meio da BR-290, tomando a BR-392 para Sudeste, onde segue até o entroncamento com a RS-625, em uma estrada não pavimentada seguindo por cerca de 11 km em direção a sudoeste.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. A) Brasil; B) Estado do Rio Grande do Sul; C) Área em destaque em B, mostrando o acesso a região estudada.



Fonte: Adaptado da base cartográfica contínua do Rio Grande do Sul (HASENACK; WEBER, 2010).

Figura 2 - Ortofotomosaico da área de estudo, mostrando em detalhe todos os afloramentos estudados: Pedra Pintada, Pedra do Meio e Pedra Branca.



Fonte: Autora.

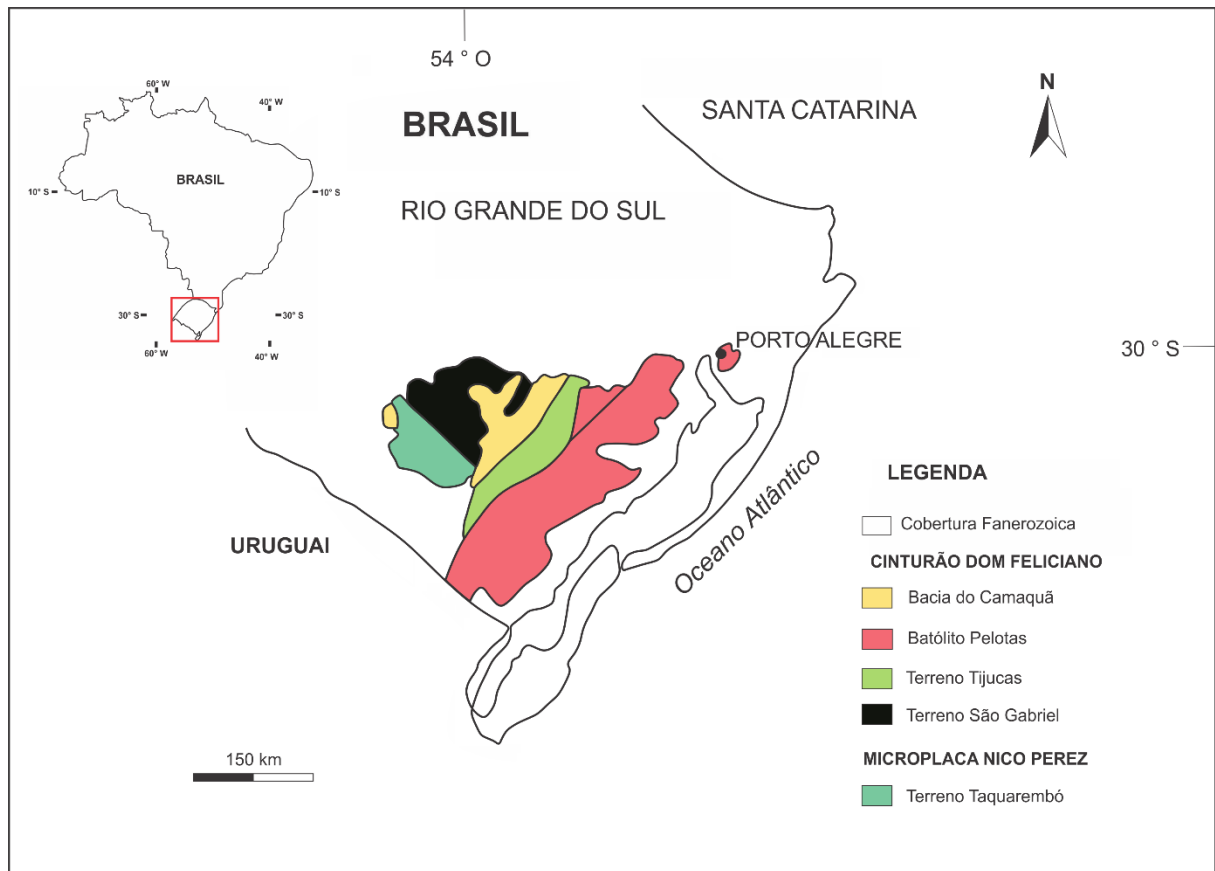
2.1 Contexto Geológico

A área de estudo está inserida na Bacia do Camaquã (BC), a qual compreende sequências vulcano-sedimentares do Ediacarano ao Eopaleozóico, inserida no contexto geotectônico do Escudo Sul-riograndense (ESRG). A BC foi formada durante as últimas fases do Ciclo Brasileiro do Cinturão Dom Feliciano (CHEMALE JR.; SILVA; HARTMANN, 1995; PAIM; CHEMALE JR; CUNHA, 2000), levando à consolidação do supercontinente Gondwana (MATTE *et al.*, 2016). A BC está posicionada sobre o Terreno São Gabriel e Terreno Taquarembó e margeada pelos Cinturões Tijuca e Dom Feliciano (PAIM; CHEMALE JR.; WILDNER, 2014).

O ESRG está localizado na porção sul da Província Mantiqueira, compreende rochas arqueanas a cristalinas eopaleozóicas (CHEMALE JR, 2000; HARTMANN; CHEMALE JR; PHILIPP, 2007), compartimentado em quatro domínios (Figura 3): Terreno Tijuca, Terreno São Gabriel e Batólito Pelotas que juntos formam o Cinturão Dom Feliciano (HARTMANN; CHEMALE JR; PHILLIP, 2007), e Terreno Taquarembó, localizado na Microplaca Nico Perez (PHILLIP; PIMENTEL; CHEMALE JR, 2016).

A evolução tectônica da BC é associada a um sistema de riftes 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). Durante sua evolução tectono-sedimentar devido ao soergimento de altos do embasamento (Alto de Caçapava do Sul e da Serra Encantadas) a BC foi dividida em três sub-bacias (Camaquã Ocidental, Camaquã Central e Camaquã Oriental; ALMEIDA *et al.*, 2009). Com o avanço do conhecimento sobre as unidades que compõem a BC foram publicadas diversas subdivisões a respeito da mesma. Atualmente há um consenso quanto a quatro unidades que subdividem o Supergrupo/Alosupergrupo Camaquã, utilizando os conceitos da Litoestratigrafia e Aloestratigrafia respectivamente, que correspondem aos Grupos/Alogrupos: Maricá, Bom Jardim, Santa Bárbara e Guaritas (PAIM; LOPES; CHEMALE JR, 1995; FRAGOSO-CÉSAR *et al.*, 2003; FAMBRINI, 2003).

Figura 3 - Mapa geotectônico do Escudo Sul-Riograndense.

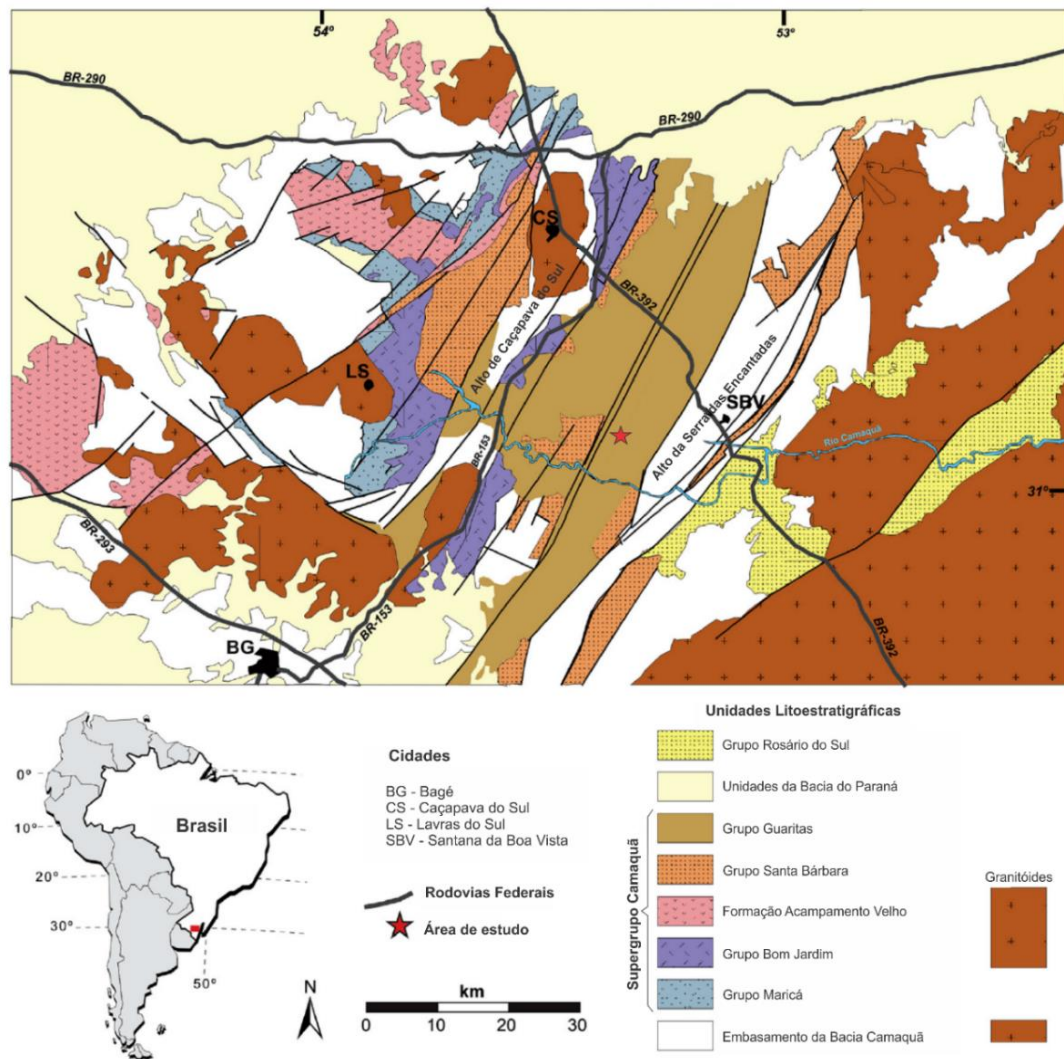


Fonte: Extraído e modificado de Phillip, Pimentel, Chemale JR (2016).

Trabalhos como o de Almeida *et al.* (2012) e Fambrini, Almeida e Frago-César (2006) mostram pequenas variações. Segundo estes autores, o Supergrupo Camaquã compreende, da base para o topo: (i) Grupo Maricá, (ii) Grupo Bom Jardim, (iii) Formação Acampamento Velho, (iv) Grupo Santa Bárbara, (v) Grupo Guaritas e (iv) Suíte intrusiva Rodeio Velho, totalizando mais de 8000 metros de espessura (Figura 4; FAMBRINI; ALMEIDA; FRAGOSO-CÉSAR, 2006). Neste trabalho foi utilizada a subdivisão do Supergrupo Camaquã proposta por Fambrini, Almeida e Frago-César (2006).

O grupo Maricá corresponde a unidade inferior do Supergrupo Camaquã, está em discordância angular com o Grupo Bom Jardim (PAIM, CHEMALE JR.; WILDNER, 2014), possui idade entre ± 630 e 601 Ma (ALMEIDA *et al.*, 2012). Este grupo é composto por sucessões: fluvial entrelaçada, marinho raso e flúvio-deltaica (BORBA *et al.*, 2008; PAIM; CHEMALE JR; WILDNER, 2014), depositados em uma bacia de antepaís em posição de retroarco (BORBA *et al.*, 2008; Figura 5).

Figura 4 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Camaquã e unidades relacionadas.



Fonte: Extraído e modificado de Almeida (2005).

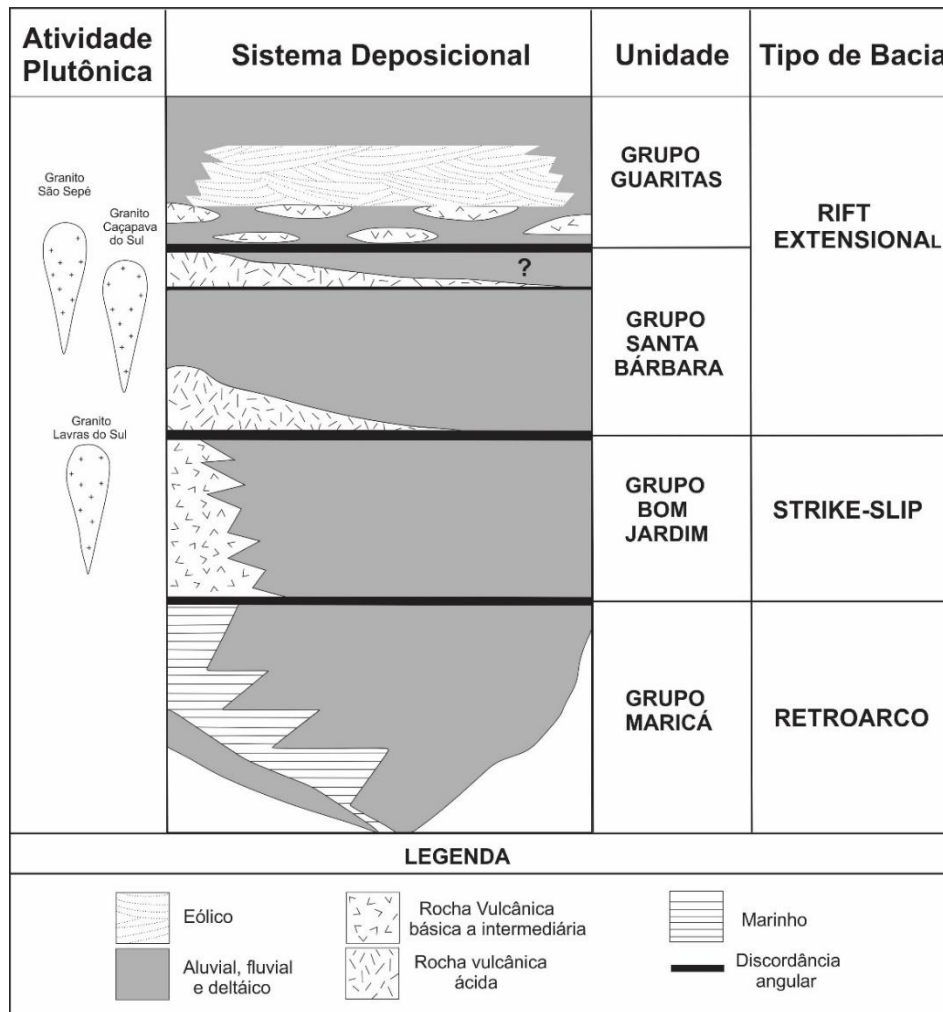
O Grupo Bom Jardim possui idade entre ± 593 e 580 Ma (ALMEIDA *et al.*, 2012), compreende depósitos aluviais e deltaicos intercalados com rochas vulcânicas de composição intermediária da Fm. Hilário (OLIVEIRA *et al.*, 2014), depositada em uma bacia transcorrente strike-slip (PAIM, CHEMALE JR.; WILDNER, 2014; Figura 5).

O Grupo Santa Bárbara compreende depósitos aluviais, lacustres e fluviais (BORBA; MIZUSAKI, 2003) com idades entre ± 567 e 547 Ma (OLIVEIRA *et al.* 2014) contemporânea à Formação Acampamento Velho, a qual compreende depósitos de rochas ácidas efusivas e piroclásticas associadas a lavas e diques básicos (MATTÉ, *et al.*, 2016), depositados em uma bacia extencional tipo rift extencional (PAIM, CHEMALE JR.; WILDNER, 2014; Figura 5).

O Grupo Guaritas compreende depósitos aluviais, fluviais e eólicos, intrudidos por rochas básicas da Suíte Intrusiva Rodeio Velho (ALMEIDA *et al.*, 2009), de idade ± 547 e 535

Ma (ALMEIDA *et al.* 2012), depositados em uma bacia extensional tipo rift (PAIM, CHEMALE JR.; WILDNER, 2014; Figura 5). A Formação Pedra Pintada (foco do estudo) pertence ao Grupo Guritas, por isso, este foi detalhado no item 2.1.1.

Figura 5 - Unidades da Bacia do Camaquã e eventos ígneos contemporâneos.



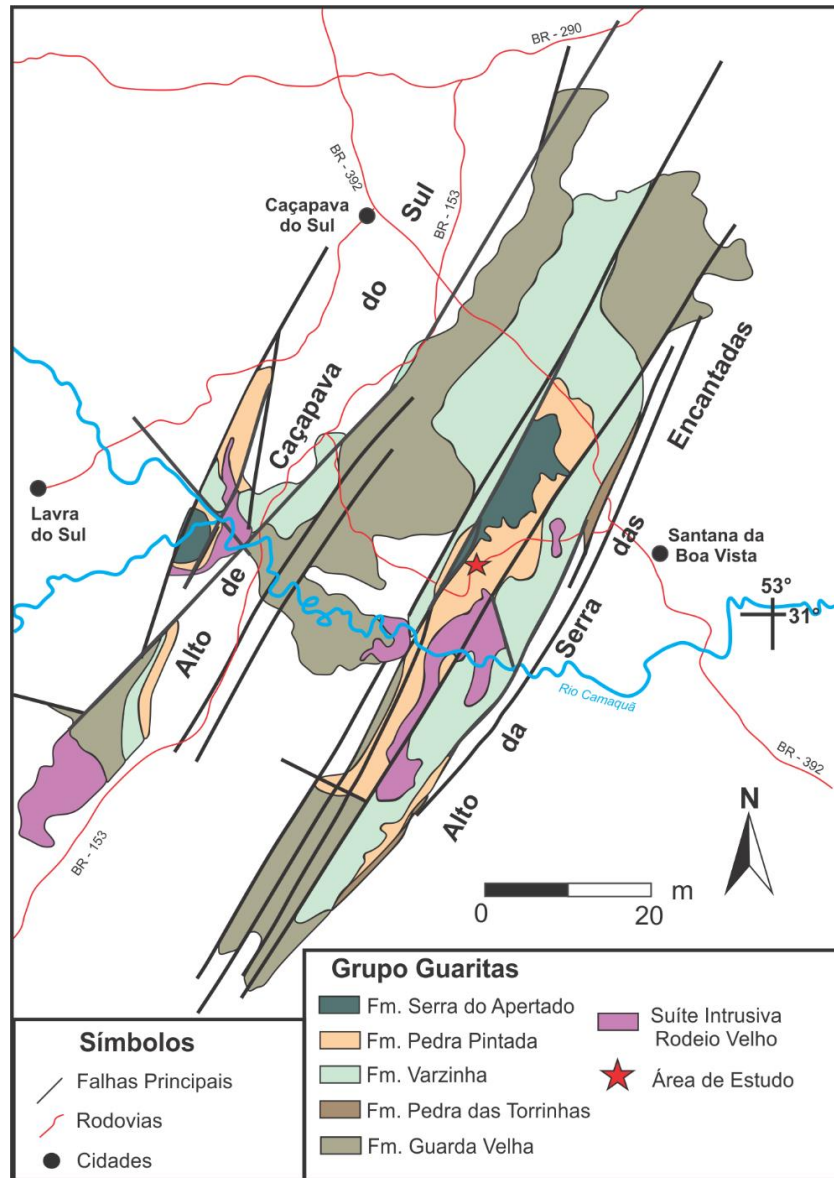
Fonte: Extraído e modificado de Oliveira *et al.* (2014).

2.1.1 Grupo Guaritas

O Grupo Guaritas corresponde a unidade topo do Supergrupo Camaquã, situada na sub-bacia Camaquã Central, está tectonicamente alojado entre os altos do embasamento da Serra das Encantadas e de Caçapava do Sul (ALMEIDA, 2005). É aflorante em uma área de 50 km de largura e cerca de 150 km de comprimento (ALMEIDA, *et al.* 2009). Compreende uma sucessão de sedimentos de mais de 1500 m de espessura de arenitos conglomeráticos,

conglomerados, ritmitos areno-pelíticos e arenitos finos a médios, com estruturas cruzadas acanaladas de grande porte (ALMEIDA, *et al.* 2009; Figura 6).

Figura 6 - Mapa Geológico do Grupo Guaritas.



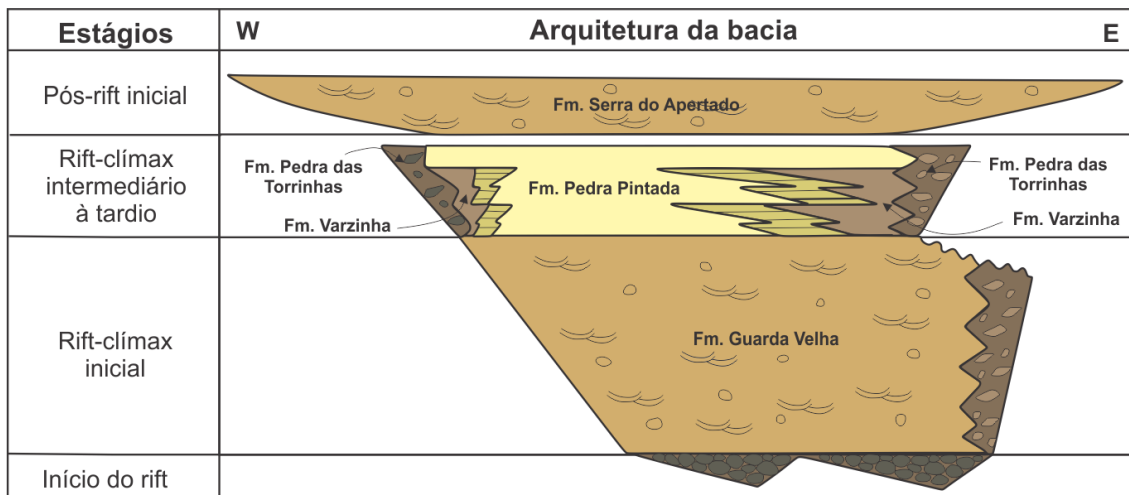
Fonte: Extraído e modificado de Almeida (2005) *apud* Nóbrega (2011).

O Grupo Guaritas foi definido primeiramente por Robertson (1966) como Formação Guaritas o qual excluía os depósitos eólicos. Paim e Scherer (2003) subdividiu o Grupo Guaritas em duas Aloformações: Pedra Pintada e Varzinha. A Aloformação Pedra Pintada é caracterizada por depósitos eólicos, lacustres e fluviais e inclui próximo a sua base, rochas magmáticas de composição básica a intermediária (PAIM; SCHERER, 2003). A Aloformação Varzinha é composta por depósitos deltáicos e eólicos, os quais possuem padrões de

paleocorrentes inversos aos ventos dominantes à época de deposição da Aloformação Pedra Pintada (PAIM; SCHERER, 2003).

Neste Trabalho será adotado a proposta de Almeida *et al.* (2009) o qual divide o Grupo Guaritas em cinco unidades litoestratigráficas, sendo elas da base para o topo: Fm. Guarda Velha, Fm. Varzinha, Fm. Pedra Pintada, Fm. Pedra das Torrinhas e Fm. Serra do Apertado (Figura 7).

Figura 7 - Coluna estratigráfica esquemática das Formações que compõem o Grupo Guaritas.



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

i) Formação Guarda Velha: corresponde a unidade basal composta por conglomerados e arenitos de textura grossa de sistemas fluviais dominados por carga de fundo (ALMEIDA *et al.*, 2009). Esta unidade assenta em discordância angular sobre o Grupo Santa Bárbara e em discordância litológica sobre rochas metamórficas e plutônicas do embasamento da Bacia do Camaquã (GODINHO *et al.*, 2013).

ii) Formação Varzinha: é caracterizada por ritimitos (intercalações de arenitos e pelitos) correspondentes a depósitos de planícies de inundação (ALMEIDA *et al.*, 2009).

iii) Formação Pedra Pintada: caracterizada por depósitos de estratificação cruzada de grade porte, lateralmente correspondente a Formação Varzinha (GODINHO *et al.*, 2013).

iv) Formação Pedra das Torrinhas: é composta por brechas e intercalações de conglomerados estratificados com arenitos conglomeráticos (ALMEIDA *et al.*, 2009). Esta formação é lateralmente equivalente a Formação Varzinha, onde a passagem lateral é caracterizada pela diminuição da frequência de seixos provenientes do embasamento e da diminuição gradual da granulometria (GODINHO *et al.*, 2009); e a Formação Pedra Pintada,

onde a passagem lateral é marcada pela expansão dos campos de dunas sobre depósitos aluviais (GODINHO *et al.*, 2009).

v) Formação Serra do Apertado: corresponde a unidade superior do Grupo Guaritas. Esta unidade é caracterizada por sucessões de arenitos finos a grossos e conglomerados fluviais muito semelhante a Formação Guarda Velha, mas se diferencia desta por estar sobreposta a Formação Pedra Pintada e por apresentar arquitetura deposicional diferente (GODINHO *et al.*, 2013).

2.1.2 Formação Pedra Pintada

A Fm. Pedra Pintada é interpretada como depósitos de campos de dunas formados pelo retrabalhamento eólico de sedimentos aluviais, coexistindo com sistemas de rios efêmeros (ALMEIDA *et al.*, 2009). Essa coexistência é marcada pela existência de fácies de canais efêmeros e fácies de interdunas inundadas (ALMEIDA *et al.*, 2009). Medidas de Paleocorrentes revelam duas direções em diferentes intervalos estratigráficos, uma para sudoeste e outra para nordeste (ALMEIDA *et al.*, 2009). A Fm. Pedra Pintada apresenta contato inferior brusco com a Fm. Guarda Velha e superior discordante da Fm. Serra do Apertado (GODINHO *et al.* 2013). Possui equivalência lateral com os depósitos da Fm. Pedra das Torrinhas e com a Fm. Varzinha (GODINHO *et al.*, 2013).

Paim e Scherer (2003) consideraram a existência de duas aloformações eólicas distintas, Aloformação Pedra Pintada e Aloformação Varzinha, onde a primeira é caracterizada por depósitos eólicos, lacustres e fluviais e a segunda por depósitos deltáicos e eólicos, com padrões de paleocorrentes inversos a Aloformação anterior (PAIM; SCHERER, 2003). Almeida (2005) também considerou duas unidades eólicas, as quais eram subdivididas em Fm. Pedra da Arara, caracterizada por depósitos de arenitos finos a médios com estratificação cruzadas de grande porte, com variação lateral e vertical para fácies de arenitos conglomeráticos, distinguindo-se da Fm. Pedra Pintada pelo rumo dos mergulhos das estratificações cruzadas; e Fm. Pedra Pintada, caracterizada por depósitos de arenitos finos a médios com estratificação cruzada de grande porte e arenitos com estratificação plano paralela e intercalações esparsas de pelitos gretados. Neste trabalho será utilizado a subdivisão proposta por Almeida *et al.* (2009) o qual reuni essas duas unidades eólicas em uma única Formação (Fm. Pedra Pintada).

3. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse projeto será desenvolvido um modelo tridimensional de afloramentos com registro sedimentar de sistemas eólicos. O modelo análogo de reservatório que será construído propõe a subdivisão dos afloramentos utilizando os princípios da estratigrafia de sequências. Assim, serão detalhados os principais aspectos teóricos e conceitos básicos sobre sistemas eólicos, estratigrafia de sequências em sistemas eólicos, bem como os termos utilizados no método para elaboração e interpretação de modelos virtuais de afloramentos e fotoestratigrafia.

3.1 Sistemas eólicos

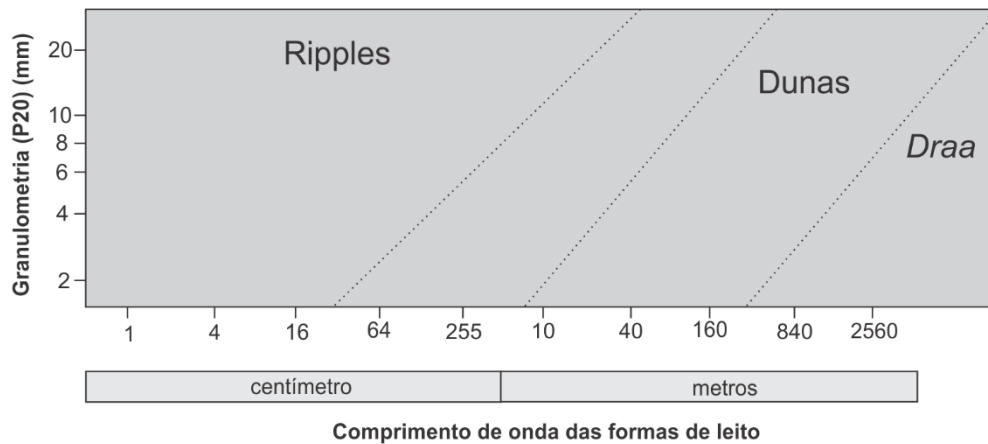
Processos eólicos envolvem a ação do vento, onde a erosão, o transporte e a deposição ocorrem devido ao movimento do vento na superfície terrestre. Tais processos moldam a superfície da Terra, sendo acumulados em regiões específicas como formas de leito complexas. Desta forma, o vento tem sido um importante agente de transporte e deposição de sedimentos em bacias sedimentares durante todos os períodos geológicos. Os processos eólicos ocorrem em diversos ambientes deposicionais como ambientes costeiros, planícies aluviais e ambientes desérticos.

Os maiores depósitos da atualidade encontram-se nos desertos, estes por sua vez são regiões extensas cobertas por dunas eólicas (ergs), em geral, localizados em zonas de médias latitudes. A distribuição geográfica dos ergs modernos sugerem que sua formação é favorecida em bacias sedimentares rasas, caracterizadas por alta evaporação, baixa precipitação (<150 mm), pouca ou nenhuma vegetação, com alta disponibilidade de areia e ventos frequentes e competentes para transportar grandes volumes de areia (WILSON, 1973).

3.1.1 Formas de leitos

Segundo Wilson (1972), existem três diferentes hierarquias de formas de leitos eólicas (formas onduladas, dunas e *draas*; Figura 8), associadas com a escala temporal dos seus eventos formadores. Essas formas de leitos possuem respostas independentes a fatores como: tamanho de grão, regime de vento e taxa de acumulação (LANCASTER, 1988). Cada forma de leito desta hierarquia corresponde a um componente do regime de vento em uma determinada área, com um período de tempo característico (tempo de reconstituição; ALLEN, 1974).

Figura 8 - Gráfico da relação entre o tamanho de grão *versus* o comprimento de onda das formas eólicas e sua classificação em três grupos distintos: *ripples*, dunas e *draas*.



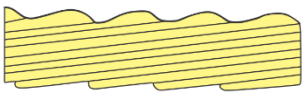
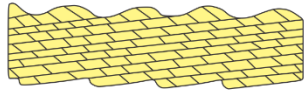
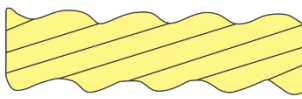
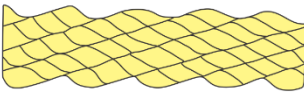
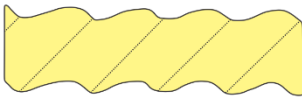
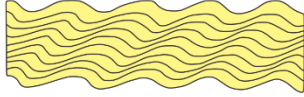
Fonte: Extraído e modificado de Wilson (1972).

3.1.1.1 Marcas onduladas

Marcas onduladas eólicas possuem a linha de crista perpendicular à direção do vento e possuem escala centimétrica. São geradas pela movimentação de grãos de areias (*sand ripples*) ou grânulos (*granule ripples*) por meio de saltação e rastejamento (FRYBERGER; SCHENK, 1981). Se desenvolvem em regiões de interdunas, em lençóis de areias ou na face frontal e no dorso de dunas e *draas* (SCHERER, 2004). Estas formas de leitos cavalgam umas sobre as outras sendo preservadas como estratos transladantes cavalgantes. O ângulo de cavalgamento é determinado pela relação entre a taxa de subida da superfície de acumulação e a taxa de migração da forma de leito (RODRÍGUEZ-LÓPEZ *et al.*, 2014), compondo três tipos principais: crítico, supercrítico e subcrítico (Figura 9).

O ângulo de cavalgamento crítico se forma quando o ângulo de cavalgamento (α) é igual ao ângulo da superfície de dorso (β) da marca ondulada ($\alpha = \beta$). O ângulo de cavalgamento supercrítico ocorre quando o ângulo de cavalgamento é maior que o ângulo de inclinação do dorso da marca ondulada precedente ($\alpha > \beta$). Já o ângulo de cavalgamento subcrítico se forma quando o ângulo de cavalgamento é menor que o ângulo de inclinação do dorso da forma de leito precedente ($\alpha < \beta$).

Figura 9 - Classificação do tipo de estratificação de marcas onduladas eólicas considerando o ângulo de cavalgamento.

		Estruturas transladantes	Laminações das marcas onduladas
Relação entre o ângulo de cavalgamento (α) e a inclinação do dorso das formas de leito (β)	Subcrítico ($\alpha < \beta$)	 <p>Estratos transladantes cavalgamento subcrítico</p>	 <p>Laminações cruzadas truncadas</p>
	Crítico ($\alpha = \beta$)	 <p>Estratos transladantes cavalgamento crítico</p>	 <p>Laminações cruzadas inteiramente preservadas</p>
	Supercrítico ($\alpha > \beta$)	 <p>Estratos transladantes cavalgamento supercrítico</p>	 <p>Preservação do dorso e da parte frontal das formas de leito</p>

Fonte: Extraído e modificado de Hunter (1977).

3.1.1.2 Dunas e *draas*

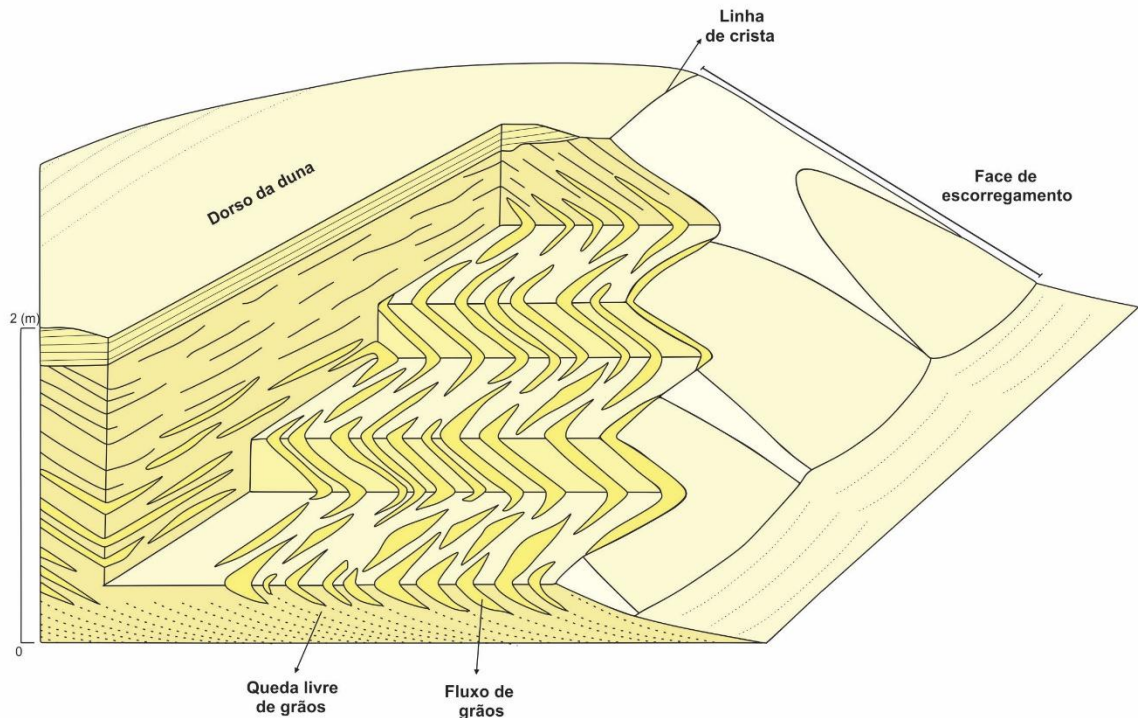
Dunas são formas de leito de escalas métricas, com comprimento de onda variando de 10 a 500 metros e altura de 0.1 a 100 metros e são caracterizadas por apresentarem estratos cruzados internos. *Draa* corresponde a dunas de grande porte (comprimento de onda entre 500 a 5000 metros e altura de 20 a 450 metros; WILSON, 1972), apresentam superposição de dunas menores no seu dorso e na face frontal (KOCUREK; 1981).

Os principais tipos de estratificações de dunas eólicas se encontram na face frontal, formados por processos gravitacionais que geram dois tipos de depósitos: fluxo de grão (*grain flow*) e queda livre de grão (*grain fall*; Figura 10) e também pode-se encontrar estratificações formadas por processos trativos como laminações transladantes cavalgantes e marcas onduladas eólicas.

Queda livre de grãos são gerados pelo assentamento de grãos de areia ao entrarem nas zonas protegidas do vento. Isso ocorre na face frontal das dunas onde se desenvolve uma zona de separação do fluxo. Extratos de queda livre de grão exibem geometria em forma de cunha e geralmente estão empacotados (KOCUREK, 1991).

Fluxo de grãos são gerados pela avalanche de areia não coesa ao longo da face de deslizamento das dunas, quando a acumulação de areia exceder o ângulo crítico de repouso da areia seca. Apresentam geometria línguóide e podem apresentar gradação inversa.

Figura 10 - Seções horizontais e transversais mostrando as estratificações eólicas internas à duna.

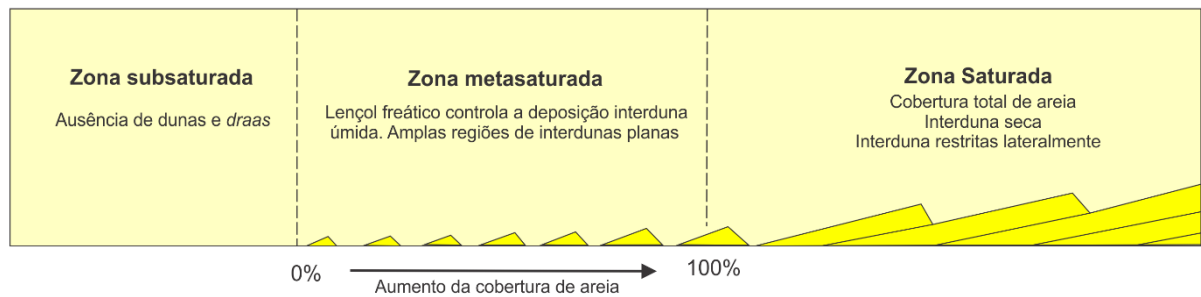


Fonte: Extraído e modificado de Hunter (1977).

3.1.2 Interdunas

As interdunas são zonas onde atuam processos eólicos, predominantemente erosivos e processos não eólicos, estes predominantemente deposicionais (MCKEE, 1979). Áreas de interdunas são depressões entre dunas ou *draas* que apresentam extensão e geometria variadas (SCHERER, 2004). Wilson (1971) estabeleceu que o tamanho das regiões de interdunas dependem diretamente da saturação de areia do sistema (Figura 11). Em zonas subsaturadas o fluxo de areia é inferior ao valor crítico necessário para a formação das formas de leito bem desenvolvida, portanto não formam dunas. Zona metassaturadas o fluxo de areia é menor que o fluxo potencial e maior que o valor crítico necessário para o desenvolvimento de formas de leito, marcada por dunas espaçadas entre si, sendo controladas pelo nível do freático (SCHERER, 2004). Zonas saturadas o fluxo de areia aproxima-se do fluxo de areia potencial, é marcada por sucessivos cavalgamentos de *draas* e interdunas secas.

Figura 11 - Seção esquemática da margem ao centro de um erg mostrando zonas saturadas, metassaturadas e subsaturadas de areia.

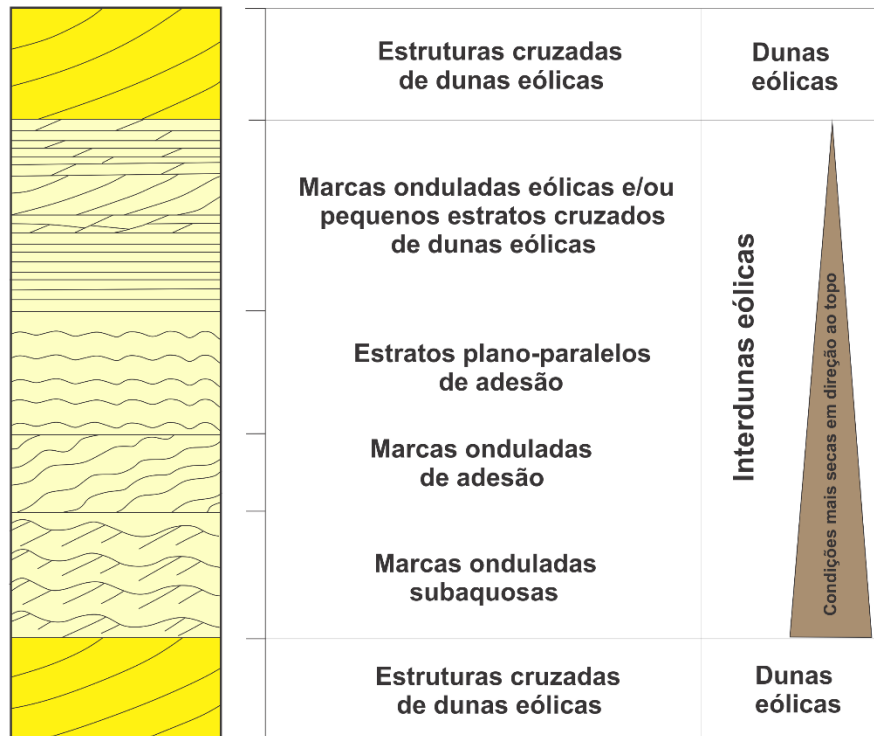


Fonte: Extraído de modificado de Scherer (2004).

As interdunas podem ser caracterizadas por processos deflacionários e deposicionais (AHLBRANDT; FRYBERGER, 1981). As interdunas deflacionárias são formadas nas regiões saturadas, onde os sedimentos são remobilizados e disponibilizados para a construção dos campos de dunas eólicas. Interdunas deposicionais ocorrem em zonas metassaturadas e podem ser subdivididas em: depósitos de interduna secas, úmidas e encharcadas (KOCUREK, 1981; Figura 12).

Depósitos de interdunas secas ocorrem em regiões onde a superfície deposicional é seca, são caracterizadas por estratos de marcas onduladas eólicas e pequenos estratos cruzados de dunas eólicas. Depósitos de interdunas úmidas ocorrem em regiões onde a superfície deposicional encontra-se próximas do nível freático ou da franja de capilaridade, marcadas por estruturas de adesão, como domos de adesão e estratos plano-paralelos de adesão. Depósitos de interdunas encharcadas são regiões onde a superfície deposicional sofre inundações periódicas podendo sofrer seguidas dissecações, apresentam deposição evaporítica (*e.g.* precipitação de calcita, dolomita ou anidrita) ou siliciclásticas de origem fluvial, lacustre ou estruturas deformadas (laminações brechadas e/ou contorcidas; KOCUREK, 1981).

Figura 12 - Sucessão vertical de fácies de interdunas.



Fonte: Extraído e modificado de Kocurek (1981).

3.1.3 Lençóis de areia

Lençóis de areia são áreas cobertas de areias eólicas onde não existem formas de leito com face de escorregamento bem desenvolvidas (KOCUREK; NIELSON, 1986). São áreas de baixo relevo cobertas por areias eólicas compondo dunas pouco desenvolvidas. Alguns fatores contribuem para sua formação sendo elas: baixa disponibilidade de areia seca devido ao posicionamento do nível freático; inundações periódicas, predominância de sedimentos de granulação grossa (areia grossa a cascalho), dificultando o transporte eólico; e presença de cobertura vegetal (KOCUREK; NIELSON, 1986). As estruturas sedimentares mais comuns encontradas nessas regiões são as estruturas cruzadas de baixo ângulo ($< 15^\circ$) e laminações de marcas onduladas eólicas variando de areia até grânulos. Pode ocorrer também a formação de *zibars* (formas de leito de baixa amplitude e grande comprimento de onda composta por depósitos de granulometria grossa).

3.1.4 Superfícies limítrofes

A utilização de superfícies limítrofes auxiliam no entendimento e reconstrução da dinâmica de sistemas eólicos. Os *sets* e *cosets* de estratos cruzados são separados por uma hierarquia de superfícies limítrofes que tem sua gênese vinculadas a diferentes processos (SCHERER, 2004). Brookfield (1977) definiu três ordens de superfícies limítrofes (1º, 2º e 3º ordem), com diferentes escalas que se desenvolvem a partir da migração e cavalgamento de dunas eólicas. Além destas três categorias de superfícies, pode ser identificado mais dois tipos de superfícies, supersuperfície (KOCUREK, 1988) e superfície de deriva de areia (*Sand drif surface*; CLEMMENSEN; TIRSGAARD, 1990).

3.1.4.1 Superfície de primeira ordem

Superfícies de primeira ordem são originadas pelo cavalgamento de dunas simples ou *draas*, marcada pela sobreposição de regiões de interdunas sobre depósitos de dunas eólicas (BROOKFIELD, 1977; KOCUREK, 1981), representando superfícies de interdunas (KOCUREK, 1996). Estas superfícies são planas, subparelas, que cortam as estruturas subjacentes e mergulham em baixo ângulo ($<5^\circ$) com sentido oposto a migração da duna subjacente (Figura 13 A e B; SCHERER, 2004). No registro, o reconhecimento de estratos de interdunas facilita a sua demarcação.

3.1.4.2 Superfície de segunda ordem

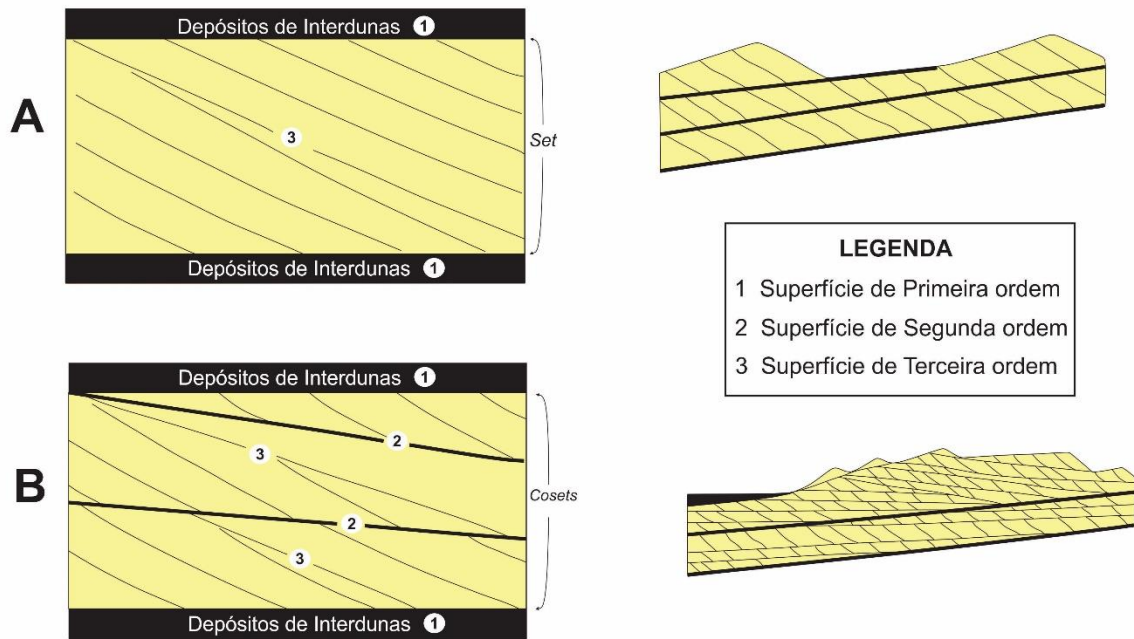
Superfícies de segunda ordem representam a migração de dunas na face frontal (sotavento) de um *draa* (BROOKFIELD, 1977; KOCUREK, 1996). Estas superfícies direção oblíqua as dunas adjacentes, apresentando mergulhos também variados (Figura 13 B; SCHERER, 2004), e são truncadas na base e no topo por superfícies de primeira ordem. Tais superfícies representam superfícies de superposição (KOCUREK, 1996).

3.1.4.3 Superfície de terceira ordem

Superfícies de terceira ordem ocorrem dentro de um *set* de estratificações cruzadas (Figura 13 A e B), sendo sua gênese vinculada ao efeito da erosão seguida de deposição devido às

flutuações locais do fluxo, mudanças na velocidade e/ou na direção do vento (BROOKFIELD, 1977; KOCUREK, 1996). Portanto, tais superfícies representam superfícies de reativação (KOCUREK, 1996), estas podem ser truncadas por superfícies de primeira ou segunda ordem.

Figura 13 - Modelo de formação de superfícies limítrofes pelo cavalgamento e migração de dunas eólicas: (A) dunas simples; (B) dunas compostas.

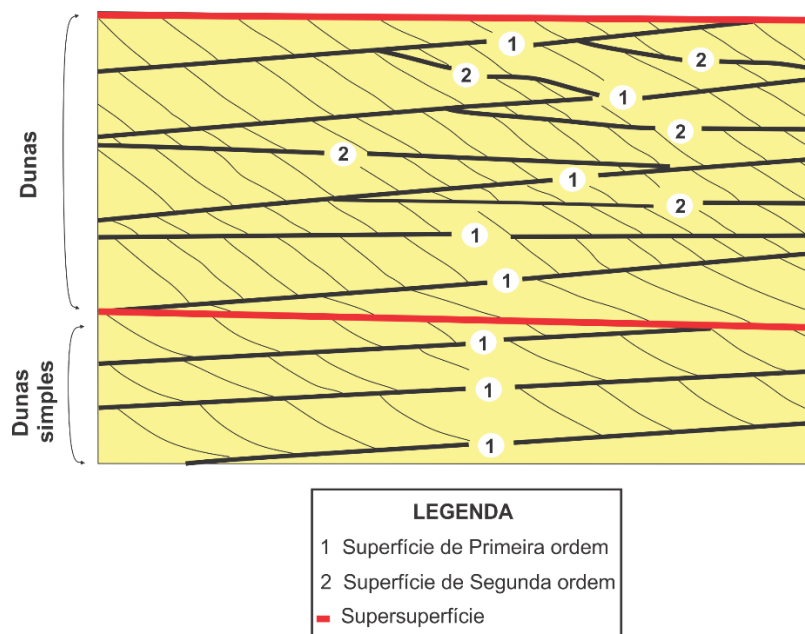


Fonte: Extraído e modificado de Kocurek (1988).

3.1.4.4 Supersuperfícies

As supersuperfícies são caracterizadas como superfícies limítrofes que representam o fim da acumulação eólica (Figura 14, KOCUREK; HAVHOLM, 1993). Sua gênese está vinculada a fatores alocíclicos, como disponibilidade de areias e/ou variação do nível freático, vinculados a variação do nível relativo do mar, ao soergimento tectônico ou mudanças climáticas (SCHERER, 2004). Suas características e geometria podem indicar os mecanismos controladores de sua formação.

Figura 14 - Supersuperfícies truncando distintos episódios de acumulação eólica.



Fonte: Extraído e modificado de Kocurek (1988).

Tais superfícies podem ser classificadas geneticamente em três tipos principais: deflação, inundação ou estabilização. Superfícies de deflação são superfícies planas com grandes extensões laterais. Representam o modelo clássico de supersuperfície (KOCUREK, 1988). Sua gênese está vinculada a erosão de areias eólicas pelo vento. As superfícies geradas por deflação próxima ao nível freático são designadas de superfícies de Stokes (STOKES, 1968) e podem gerar uma série de feições diagnósticas como: corrugação da superfície deflacionária, fraturas poligonais e *lags* de deflação. Superfícies de inundação são geradas por inundação fluvial ou lacustre de depósitos eólicos (LANGFORD; CHAN, 1993). São superfícies planas a onduladas com relevo aplainado (<10 m) gerado por sucessivas inundações acompanhadas pela migração de dunas eólicas não cavalgante (SCHERER, 2004). Superfícies de estabilização estão associadas à fixação de campos de dunas eólicas pela vegetação. Tais superfícies tendem a ser onduladas com relevo acentuado.

3.1.4.6 Superfície de deriva de areia

Superfície de deriva de areia (*sand-drift surface*; CLEMMENSEN; TIRSGAARD, 1990) são superfícies que marcam contatos erosionais ou deposicionais de sedimentos subaquosos e sedimentos eólicos sobrejacentes. São formadas por deflação eólica de sedimentos não eólicos. Tais superfícies caracterizam-se por serem de baixo ângulo, geralmente

sub-horizontais, abruptas e erosivas. Expressam um período de erosão ou de não acumulação (*bypass*).

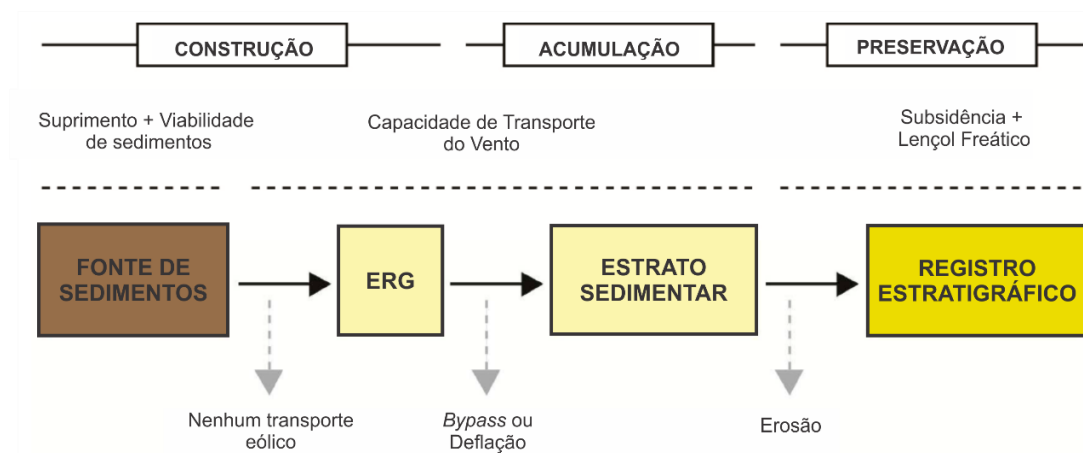
3.1.5 Estratigrafia de sequências de sistemas eólicos

O estudo da dinâmica de sistemas eólicos baseado em análise de superfícies de discontinuidades físicas, tais como as supersuperfícies, e na sua correlação com as mudanças na eustasia e tectônica condiz com o modelo conceitual da estratigrafia de sequências (GIANNINI; ASSINE; SAWAKUCHI, 2008). Os conceitos da estratigrafia de sequências são bem aplicados em sistemas marinhos e costeiros, tornando-se necessário a criação de um arcabouço conceitual que se adapte a sistemas eólicos (GIANNINI; ASSINE; SAWAKUCHI, 2008).

Enquanto em sistemas costeiros e marinhos a sua distribuição e acumulação são controlados pelas variações relativas do nível do mar, em sistemas eólicos a acumulação e preservação são controlados pela interação entre fatores alocíclicos e autocíclicos.

A inclusão dos sistemas eólicos no registro estratigráfico depende de muitas variáveis que incluem desde a construção do erg até a preservação dos estratos eólicos acumulados. Segundo Kocurek (1999), a criação de um registro estratigráfico de sistemas eólicos é realizado em três fases: construção, acumulação e preservação (Figura 15).

Figura 15 - As principais fases em um sistema eólico para ocorrer a sua preservação.



Fonte: Extraído e modificado de Rodríguez-López *et al.* (2014).

3.1.5.1 Fase de construção

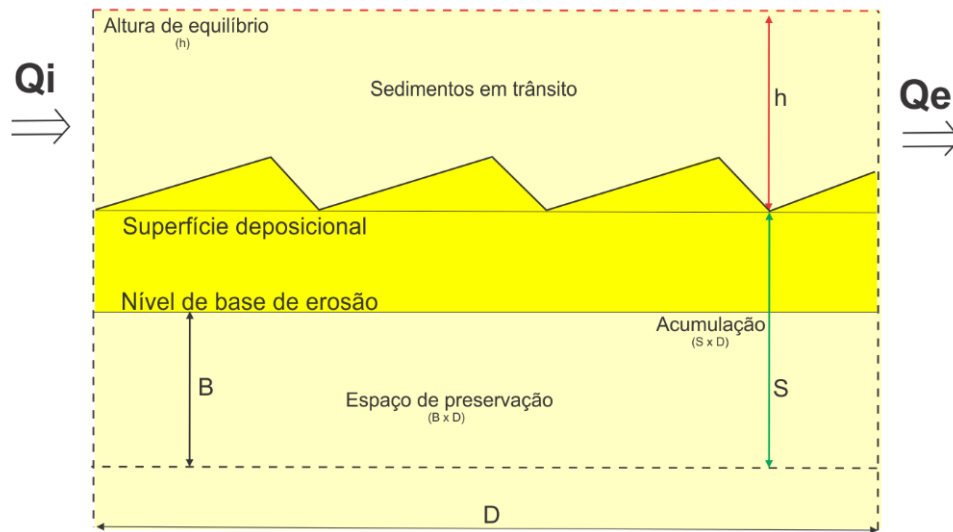
A construção é dada em função do suprimento sedimentar, disponibilidade de sedimentos para o transporte eólico e a capacidade de transporte de sedimento pelo vento (KOCUREK; LANCASTER, 1999). O suprimento sedimentar corresponde ao volume de sedimentos gerados em um determinado intervalo de tempo, servindo como fonte para o sistema. A disponibilidade de sedimentos secos corresponde a suscetibilidade dos grãos superficiais a serem transportados pelo vento (KOCUREK; LANCASTER, 1999).

Apenas um alto suprimento sedimentar não é suficiente para que ocorra a construção, é necessário também que haja uma alta disponibilidade de areia não coesa (seca). Alguns fatores estabilizantes como cobertura vegetal, cimentos intergranulares (*e.g.* gipsita), *lags* de areias e o nível elevado do freático podem limitar a disponibilidade de areia seca (RODRÍGUEZ-LÓPEZ *et al.*, 2014). A capacidade de transporte é uma medida da capacidade que o vento tem para transportar sedimentos (“energia do vento”) e independe da disponibilidade de areia (KOCUREK; LANCASTER, 1999). A capacidade máxima de transporte (saturação do vento) é alcançada em fração de segundos se houver uma alta disponibilidade de areia. Juntos, esses fatores irão determinar o regime sedimentar de um sistema eólico (KOCUREK; LANCASTER, 1999).

3.1.5.2 Fase de acumulação

A acumulação eólica consiste na deposição total de sedimentos através do tempo, gerando um corpo tridimensional de estratos que pode ser incorporado no registro geológico (KOCUREK; HAVHOLM, 1993). É o mecanismo pelo qual os sedimentos depositados ao longo do tempo constituam um corpo tridimensional (GIANNINI; ASSINE; SAWAKUCHI, 2008). Para que ocorra acumulação é necessário que o balanço entre a entrada e a saída de sedimentos seja positivo (entrada de sedimentos > saída de sedimentos) e deve haver uma alta disponibilidade de areia (GIANNINI; ASSINE; SAWAKUCHI, 2008; Figura 16). O balanço sedimentar positivo requerido para a acumulação necessita uma desaceleração do fluxo que por consequência ocasiona uma diminuição na taxa de transporte e a concomitante deposição. Por outro lado, um balanço neutro ou negativo cessa a acumulação, resultando em *bypass* ou erosão, respectivamente, desenvolvendo supersuperfícies que marcam o fim da acumulação e delimitam sequências eólicas distintas (RODRÍGUEZ-LÓPEZ *et al.*, 2014).

Figura 16 - A acumulação eólica ocorre pela migração e cavalgamento de formas de leito em contextos com um balanço. Q_i : fluxo de entrada de sedimentos (influxo); Q_e : fluxo de saída de sedimentos (efluxo).



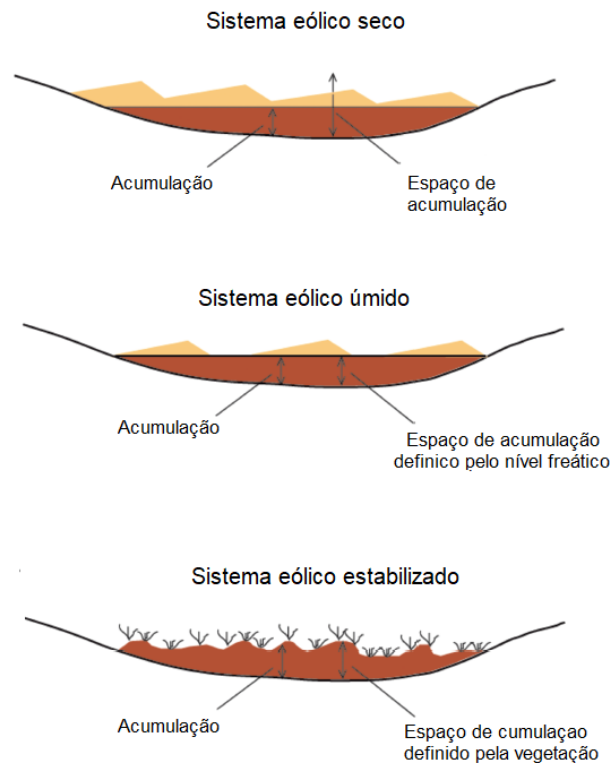
Fonte: Extraído e modificado de Giannini, Assine e Sawakuchi (2008).

O mecanismo para a acumulação eólica ocorre em decorrência da migração e cavalgamento de dunas e *draas* em relação a superfície de acumulação (plano que une as depressões interdunas). A superfície de acumulação representa uma superfície de equilíbrio, no qual acima dela ocorre o transporte de sedimentos e abaixo nenhuma partícula é deslocada pelo vento (SCHERER, 2004).

O ângulo de cavalgamento é determinado pela relação entre taxa de migração da forma de leito e a taxa de subida da superfície de acumulação (RODRÍGUEZ-LÓPEZ *et al.*, 2014), tendo três possíveis configurações (crítico, supercrítico e subcrítico). Ângulo de cavalgamento positivo faz com que a maioria dos depósitos de dunas eólicas sejam preservados no registro geológico, e também controla a espessura dos estratos preservados (RODRÍGUEZ-LÓPEZ *et al.*, 2014).

A maioria das dunas eólicas são representadas no registro sedimentar por estratos transladantes cavalgantes subcríticos, isto porque na maioria das vezes a taxa de deposição é menor que a taxa de migração (KOCUREK, 1996). Os processos de acumulação eólica variam conforme o tipo de sistema eólico, podendo ser secos, úmidos e estabilizados (Figura 17; KOCUREK; HAVHOLM, 1993).

Figura 17 - Acumulação em sistemas eólicos secos, úmidos e estabilizados.



Fonte: Extraído e modificado de Rodríguez-López (2014).

3.1.5.3 Fase de preservação

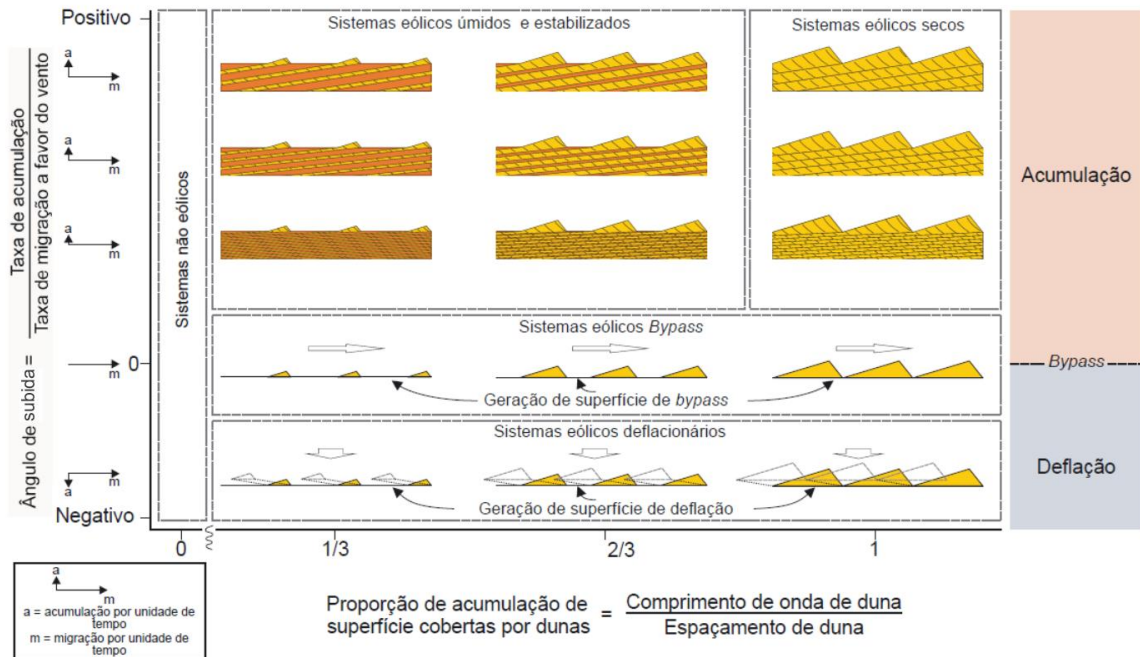
A preservação corresponde ao conjunto de processos necessários para que a acumulação seja preservada no registro geológico (KOCUREK; HAVHOLM, 1994). A preservação é a incorporação da acumulação ao registro estratigráfico (GIANNINI; ASSINE; SAWAKUCHI, 2008). O espaço de preservação é a parcela do espaço de acumulação que é incorporada no registro, sendo seu limite superior o nível de base de erosão.

Em sistemas marinhos, o nível de base de erosão coincide com o nível do mar, portanto existe uma equivalência entre o espaço de acomodação e o espaço de preservação. Entretanto, isso não se verifica em sistemas eólicos. Enquanto em sistemas eólicos secos a acumulação ocorre acima do espaço de preservação, em sistemas eólicos úmidos, o espaço de preservação e acumulação são coincidentes, pois ambos são controlados pelo nível freático (SCHERER, 2004).

3.1.6 Tipos de sistemas deposicionais eólicos

Os tipos de sistemas eólicos são classificados segundo Kocurek e Havholm (1993) conforme os fatores que provocam sua estabilização, subdivididos em: sistemas eólicos secos, úmidos e estabilizados (Figura 18). A franja de capilaridade e a posição do nível freático em relação a superfície de deposição são os principais fatores de classificação (GIANNINI; ASSINE; SAWAKUCHI, 2008).

Figura 18 - Sistemas eólicos e as suas variações arquiteturas conforme o tipo de sistema.



Fonte: Extraído e modificado de Rodríguez-López (2014).

3.1.6.1 Sistemas eólicos secos

Em sistemas eólicos secos, o nível freático e a franja de capilaridade estão localizados abaixo da superfície de deposição e não há nenhum fator de estabilização que controle a sedimentação. Nestes tipos de sistemas há uma constante disponibilidade de areia seca disponível para o transporte eólico. Fatores aerodinâmicos são os únicos fatores controladores dos processos de erosão, deposição e *bypass* (KOCUREK; HAVHOLM, 1993).

A acumulação requer uma alta taxa de aporte sedimentar e que a superfície de deposição atinja a condição de saturação de areia, pois a acumulação só inicia quando houver o cavalcamento (com ângulos positivos) entre as formas de leito subsequentes. Como consequência disto, não há o desenvolvimento de depósitos de interdunas planas. O final da acumulação pode ocorrer por meio da queda do aporte sedimentar ou quando os depósitos de

areias atingirem a sua altura máxima para que não haja mais desaceleração do vento (GIANNINI; ASSINE; SAWAKUCHI, 2008).

O ângulo de cavalgamento é controlado pelo aporte sedimentar e pela taxa de subsidência, sendo assim, quanto maior a taxa de subsidência e o influxo sedimentar, maior será o ângulo de cavalgamento (MOUNTNEY; HOWELL, 2000).

3.1.6.2 Sistemas eólicos úmidos

Sistemas eólicos úmidos caracterizam-se pelo nível do freático ou a franja de capilaridade próximo ou coincidente (aflorante) à superfície deposicional (GIANNINI; ASSINE; SAWAKUCHI, 2008). A presença de água restringe a disponibilidade de areia incoesa para o transporte eólico e diminui o potencial erosivo. Como consequência da redução dos processos erosivos, depósitos de interdunas são bem preservados, sejam eles úmidos, encharcados ou secos. Os fatores que controlam os processos de erosão, deposição e *bypass* são fatores aerodinâmicos e a umidade do substrato (KOCUREK; HAVHOLM, 1993).

A acumulação neste tipo de sistema ocorre em zonas metassaturadas, onde há uma progressiva subida do nível freático juntamente com um contínuo influxo (KOCUREK; HAVHOLM, 1993). A subida do nível freático pode ser absoluta, devido a elevação do nível do mar ou por mudança climática; ou relativa, devido a subsidência da coluna sedimentar através do nível freático, que em termos absolutos são estáticos (SCHERER, 2004).

O ângulo de cavalgamento é controlado pela taxa de subida do nível freático e pela taxa de migração das formas de leito (SCHERER, 2004). Para uma taxa de subida do nível freático constante, menor será o ângulo de cavalgamento quanto maior for a taxa de migração das dunas eólicas (SCHERER, 2004).

3.1.6.3 Sistemas eólicos estabilizados

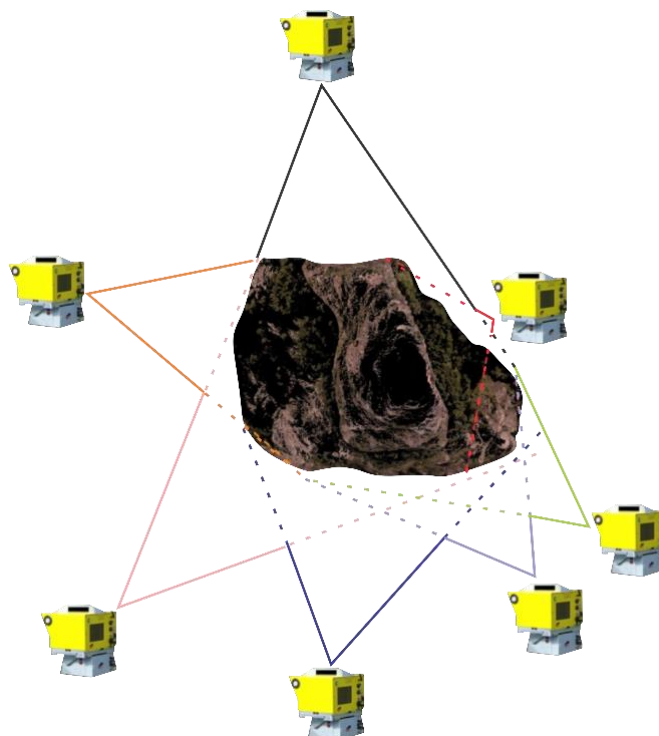
Os sistemas eólicos estabilizados são aqueles nos quais os fatores estabilizantes atuam periodicamente ou continuamente para estabilizar o substrato, enquanto o sistema permanece ativo (KOCUREK; HAVHOLM, 1993). Este sistema é semelhante aos sistemas eólicos úmidos, onde a umidade pode ser considerada como grande agente de estabilização. Entretanto, incluem outros fatores estabilizantes, dos quais destacam-se: vegetação, superfícies residuais, cimentação diagenética, *drapes* de lama, entre outros. A estabilização pode ser um processo

contínuo ou episódico, este último caracterizado por intervalos esporádicos de agitação de areia eólica (KOCUREK; HAVHOLM, 1993).

3.2 Modelos virtuais de afloramentos

Modelos virtuais de afloramento (MVA) são representações 3D fotorealistas com resolução milimétrica da superfície de afloramentos rochosos. Esse método permite a reconstrução dos afloramentos em plataforma digital, possibilitando a análise em perspectiva das mesmas. Os MVA's se aplicam em diversas áreas no ramo das geociências, como na geologia estrutural, estratigrafia, sedimentologia, mapeamento geológico e modelagem de reservatórios. Tais modelos podem ser construídos através de dois métodos diferentes: a partir do *Light Detecting and Ranging* (LiDAR) e a partir da fotogrametria digital SfM-MVS (*Structure from Motion – Multi View Stereo*). Tradicionalmente, os MVA's são construídos a partir da técnica do LiDAR. Esta técnica utiliza *scanners a laser*, posicionados em diferentes locais, a uma certa distância do afloramento, para a obtenção de uma nuvem de pontos (Figura 19; PRINGLE *et al.*, 2006).

Figura 19 - Exemplo de como é realizado o imageamento pela técnica do LiDAR.

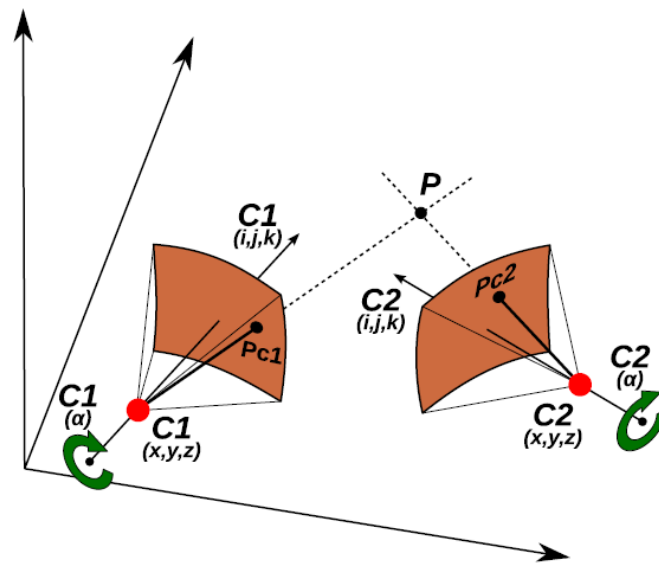


Fonte: Extraído e modificado de Ferrari *et al.*, (2012).

A fotogrametria é uma ferramenta que utiliza pares de fotografias sobrepostas para adquirir dados da superfície terrestre em 3D (CARRIVICK; SMITH; QUINCEY, 2016). O

algoritmo SfM-MVS utiliza pares estéreos, trabalhando com os mesmos princípios da estereofotogrametria (TAVANI *et al.*, 2014; Figura 20). Em outras palavras, o algoritmo detecta pontos em comum em pares de fotografias de um mesmo alvo a partir de posições distintas, realizando a sobreposição das imagens para reconstruir a geometria de feições e objetos.

Figura 20 - Representação gráfica dos parâmetros envolvidos na visualização estereoscópica. Considerando um objeto P, fotografado de duas câmeras (C1 e C2). A posição de P, nas duas fotos vai depender dos parâmetros da câmera (distância focal) e a sua orientação.



Fonte: Extraído de Tavani *et al.*, (2014).

A visibilidade em 3D ocorre através do reconhecimento da orientação, posição e distância focal das imagens, permitindo que qualquer ponto no espaço possa ser calculado com base nas suas coordenadas 2D (TAVANI *et al.* 2014). As fotografias podem ser adquiridas usando qualquer câmera digital terrestre ou aérea (por meio de helicópteros, aviões e veículos aéreos não tripulados; CARRIVICK; SMITH; QUINCEY, 2016). O advento do Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), e a sua popularização, fez com que esta ferramenta tornasse o método mais viável para obter fotografias aéreas de forma rápida, barata e com melhor cobertura de aquisição (CAWOOD *et al.*, 2017). Devido ao baixo custo de aquisição, maior agilidade de processamento e a possibilidade de obtenção de fotografias aéreas utilizando veículos aéreos não-tripulados (VANT), o uso do SfM-MVS ampliou-se significativamente em substituição do método tradicional LiDAR.

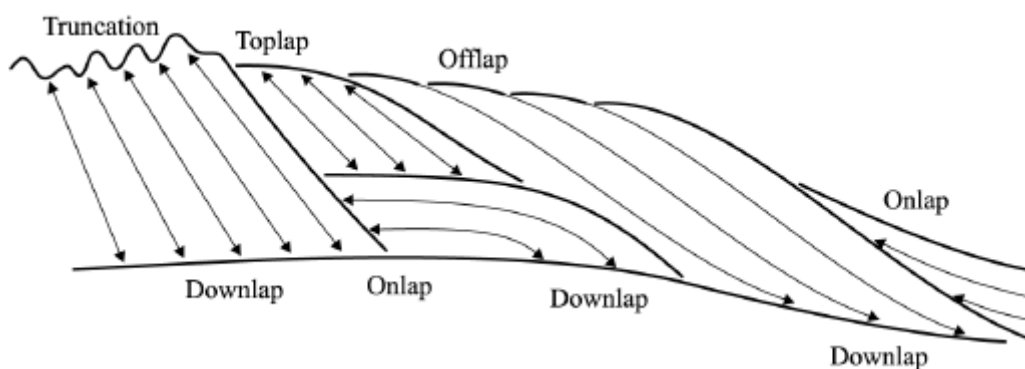
3.3 Fotoestratigrafia

A fotoestratigrafia consiste em uma técnica de fotointerpretação para o estudo de sucessões estratigráficas (SGAVETTI, 1991). Segundo a autora, esta técnica é utilizada para delimitar e distinguir superfícies no registro sedimentar aflorante, expressas em fotofácies e fotohorizontes. A fotoestratigrafia é baseada nos mesmos princípios da sismoestratigrafia, permitindo a reconstrução de padrões cronoestratigráficos em dados de afloramento (SGAVETTI, 1991).

Fotohorizontes exibem arranjos característicos, compostas por grupos de terminações de estratos cujos parâmetros diferem daqueles das unidades adjacentes, semelhante às sismofácies (sismoestratigrafia) descritas por Mitchum JR, Vail e Sangree (1977). Fotofácies são definidas como unidades fotogeológicas tridimensionais mapeáveis, podendo ser interpretadas em termos de ambientes e processos deposicionais (SGAVETTI, 1991) ou sequências estratigráficas.

O mapeamento das terminações estratais do tipo *onlap*, *offlap*, *downlap*, *toplap* e truncamento (*e.g.* Figura 21) permite determinar a superfície de topo e base (fotohorizontes), dessa forma individualizando as diferentes fotofácies presentes no afloramento. A configuração interna das fotofácies é determinada de acordo com a estruturas primárias presentes, coloração (RGB ou espectral) e textura; e a geometria externa é determinada de acordo com a variação de espessura entre os fotohorizontes.

Figura 21 - Terminações de Refletores da Sismoestratigrafia.



Fonte: Extraído de Mitchum JR., Vail e Sangree (1977).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia a ser adotado para aquisição dos dados geológicos e geração do modelo de reservatório seguirá as seguintes etapas: Revisão bibliográfica; Análise faciológica; Perfis colunares; Aquisição, processamento das fotografias aéreas e geração dos MVA's;

Georreferenciamento e resolução dos modelos; Interpretação geológica dos MVA's, levantamento digital de perfis colunares; Medição e identificação de superfícies eólicas e Modelagem do reservatório.

4.1 Revisão Bibliográfica

Compreende o levantamento de informações na literatura sobre geologia da Bacia do Camaquã, sistemas eólicos, modelos virtuais de afloramento e fotoestratigrafia. A revisão bibliográfica foi realizada em conjunto com todas as etapas deste trabalho.

4.2 Análise faciológica

Análise faciológica visa a interpretação dos sistemas deposicionais, ou seja, os processos físicos atuantes na deposição. Uma fácies é um corpo rochoso que apresenta características específicas. Segundo Tucker (2014) os atributos que definem uma fácies são: litologia, textura, estruturas sedimentares, cor, geometria, paleocorrente e conteúdo fóssilífero. Neste trabalho foi utilizado o termo litofácies, que é baseado em feições litológicas, estruturais, texturais e paleocorrentes, estas últimas foram utilizadas na interpretação das associações de litofácies, não sendo analisadas individualmente para cada fácies. Neste trabalho não considerando conteúdo fóssilífero pois não há registros dos mesmos na Fm. Pedra Pintada.

A nomenclatura e classificação das fácies foi realizada a partir de uma adaptação do código proposto por Miall (1996) para fácies do sistema fluvial (Quadro 1). A primeira letra é maiúscula e corresponde ao tamanho de grão predominante; a segunda letra é minúscula e corresponde a textura ou estrutura presente na rocha. Para melhor compreensão dos dados, para fácies eólicas será acrescentado a nomenclatura a letra “e” minúscula entre parênteses.

As litofácies, geneticamente relacionadas, foram agrupadas em associações de litofácies que são características de um determinado sistema deposicional. Cada litofácies dentro da associação representa o registro sedimentar do processo deposicional. Assim, por meio do empilhamento das associações de litofácies pode-se reconstruir o sistema deposicional (WALKER; JAMES, 1992).

Quadro 1 - Quadro de classificação de fácies para o sistema fluvial segundo Miall (1996).

Código	Fácies	Estruturas sedimentares	Interpretação
Gmm	Cascalho maciço matriz-suportado	Gradação incipiente	Fluxo de detritos plástico, fluxo viscoso, alta coesão interna
Gmg	Cascalho matriz-suportado	Gradação inversa a normal	Fluxo de detritos pseudoplástico, fluxo viscoso, baixa coesão interna
Gci	Cascalho clasto-suportado	Gradação inversa	Fluxo de detritos, alta concentração de clastos (alta coesão interna) ou fluxo de detritos pseudoplástico (baixa coesão)
Gh	Cascalho clasto-suportado, acamamento incipiente	Acamamento horizontal, imbricação	Formas de leito longitudinais, depósitos residuais (<i>lags</i>)
Gt	Cascalho estratificado	Estratificações cruzadas acanaladas	Preenchimento de pequenos canais
Gp	Cascalho estratificado	Estratificações cruzadas planares	Formas de leito transversais, crescimento deltaico a partir de barras remanescentes
St	Areia fina a muito grossa (podendo ser cascalhosa)	Estratificações cruzadas acanaladas	Dunas 3D, cristas sinuosas ou linguóides
Sp	Areia fina a muito grossa (podendo ser cascalhosa)	Estratificações cruzadas planares	Dunas transversais 2D
Sr	Areia muito fina a grossa	Laminações cruzadas de marcas onduladas	Marcas onduladas (regime de fluxo inferior)
Sh	Areia muito fina a grossa (podendo ser cascalhosa)	Laminação horizontal, lineação de partição	Formas de leito plano (regime de fluxo superior/ crítico)
Sl	Areia muito fina a grossa (podendo ser cascalhosa)	Estratificações cruzadas de baixo ângulo (<15°) (podendo ser sigmoidais)	Preenchimentos de suaves depressões (<i>scourfills</i>), dunas atenuadas, antidunas
Ss	Areia fina a muito grossa (podendo ser cascalhosa)	Amplas e suaves depressões	Preenchimentos de suaves depressões (<i>scourfills</i>)
Sm	Areia fina a grossa	Maciça ou laminação indistinta	Depósitos de fluxos hiperconcentrados, fluidizações ou intensa bioturbação
Fl	Areia, silte, lama	Laminações finas, Laminações cruzadas de marcas onduladas de muito pequeno porte	Depósitos externos ao canal, canais abandonados ou depósitos de inundação
Fsm	Silte, lama	Maciço	Depósitos externos ao canal ou canais abandonados
Fm	Lama, silte	Maciço, gretas de contração	Depósitos externos ao canal ou canais abandonados
Fr	Lama, silte	Maciço, raízes, bioturbação	Solo incipiente
C	Carvão, lama carbonosa	Restos vegetais, filmes de lama	Depósitos de pântanos vegetados (<i>swamps</i>)
P	Paleossolocarbonático (calcita, siderita)	Feições pedogênicas: nódulos, filamentos	Solo com precipitação química

Fonte: Extraído e modificado de Miall (1996).

4.3 Perfis colunares

O perfil colunar é um método usual para coleta de dados em campo ou de poço. Este serve para representar graficamente a sucessão vertical de fácies vista em campo, fornecendo uma percepção imediata do pacote sedimentar e facilitando a interpretação da sucessão.

Em um perfil colunar, o eixo vertical corresponde a espessura das camadas, sua escala irá depender do nível de detalhamento de cada estudo, já o eixo horizontal indica o tamanho de grão (granulometria) da rocha. Outras feições podem compor um perfil como: descrição das principais fácies, dados estruturais, conteúdo fossilífero, medidas de paleocorrentes, dentre outros.

A descrição foi feita da base para o topo da seção e foi utilizada uma folha modelo (Figura 22) para o levantamento, utilizando uma escala de 1:50, buscando maior detalhamento das fácies e estruturas internas. O levantamento foi acompanhado pelo imageamento fotográfico convencional utilizando máquina digital e pela aquisição sistemática de paleocorrentes das diferentes litofácies e associações de litofácies

As medidas das estruturas sedimentares (S_0 e paleocorrentes) foram feitas por *Dip Direction* (sentido do mergulho/trama) que fornece o sentido e o ângulo de mergulho da camada. Para medidas retiradas em camadas com basculamento superior a 5° será feito a correção destas medidas para suas orientações anteriores ao basculamento.

O perfil colunar em campo foi levantado apenas para a Pedra Pintada, o perfil colunar das outras pedras foram levantadas digitalmente no *software Agisoft Metashape*. A metragem total levantada foi 73 m. Este perfil foi digitalizado e padronizado no *software CorelDraw Graphics Suite 2018*.

4.4 Aquisição, processamento das fotografias aéreas e geração dos MVA's

A aquisição das fotografias aéreas foram realizadas utilizando um VANT, da marca DJI, modelo *Phantom 4 PRO* (Quadro 2), equipado com o *software Universal Ground Control System* (UgCS). Com este *software*, é possível programar rotas de voo, altura de voo, espaçamento entre as linhas de voo e intervalo de aquisição de fotos. O UgCS controla a altura de voo com base em modelos digitais de superfície (MDS) da área de estudo. Modelos digitais de superfície (MDS) são construídos a partir do imageamento aéreo, são similares ao MDE (modelos digitais de elevação), a diferença entre MDE e MDS, este último é criado sem a retirada da cobertura vegetal.

Figura 22 - Modelo utilizado para levantamento de perfil colunar em campo.

COLUNA ESTRATIGRÁFICA		SEÇÃO/UNIDADE:			NOMES:				
ALGUMAS ESTRUTURAS GERADAS POR PROCESSOS HIDRODINÂMICOS OU DEFORMACIONAIS M Maciço Lam. Plano Paralela Lam. Cruz. de ripples Ripples assimétricas Ripples simétricas E.Cruz. Baixo Ângulo				ALGUMAS ESTRUTURAS GERADAS POR PROCESSOS EÓLICOS Estratificação horizontal Estratificação cruzada de baixo ângulo Estratificação cruzada planar Estratificação cruzada tangencial Estratificação cruzada acanalada Estruturas de adesão		Ponto: Coord. UTM E: N: Data: Escala:			
E. Cruzada Planar E. Cruz. Tangencial E. Cruz. Acanalada Lam. Ondulada Truncada Estrutura de Carga Estrutura em Chama				Fluidização Lam. Convoluta Escorregamento					
Areia BI Sx Gr Mg G M F M ⁺ S Ag				Cód. Fácies	Paleoconcreto Estruturas	Fotos Amostras	Assoc. de fácies	DESCRIÇÃO LITOLÓGICA	
Areia BI Sx Gr Mg G M F M ⁺ S Ag								Página /	

Fonte: Extraído de Souza (2012).

Quadro 2 - Especificações técnicas do VANT utilizado.

Modelo	<i>Phanton 4 PRO</i>
Câmera	Sensor: 1” y <i>Metal-Oxide Semiconductor</i> (CMOS) de 35 mm Resolução de 20 megapixels (5472 x 3648) Tamanho de pixel de 1.55 x 1.55 μm Lentes de 35 mm Distância focal de 3,61mm Campo de visão de 94°

Fonte: Autora.

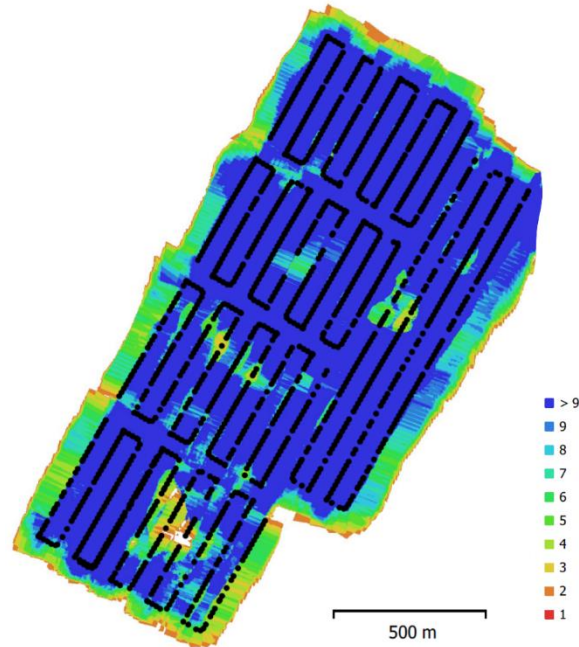
A campanha de aquisição das aerofotografias foi realizada em duas etapas. A primeira etapa consistiu em realizar um voo com o intuito de construir um MDS de média resolução da área de estudo, que serviu de base para aquisição posterior. A segunda campanha de aquisição das fotografias aéreas utilizou o MDS resultante da aquisição anterior, afim de realizar voos de menor altitude com objetivo de construir MVA's de alta resolução.

A primeira etapa de aquisição de fotografias aéreas foi programada na interface do *software* UgCS, o qual utilizou informações topográficas de SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), o qual possui 30 m/pixel de resolução espacial. Foram realizados 5 voos com altura de 70 m (em relação ao solo) e um espaçamento de 50 m entre as linhas de voo (Figura 23). Ao todo foram capturadas 1.594 fotografias que cobriram toda a região de estudo as quais foram utilizadas para construir um MDS de média resolução.

A segunda campanha de aquisição das fotografias aéreas também foi planejada no *software* UgCS, o qual utilizou o MDS resultante da aquisição anterior. Foram planejados voos para cada afloramento, assim foram realizados 5 voos diferentes (Figura 24).

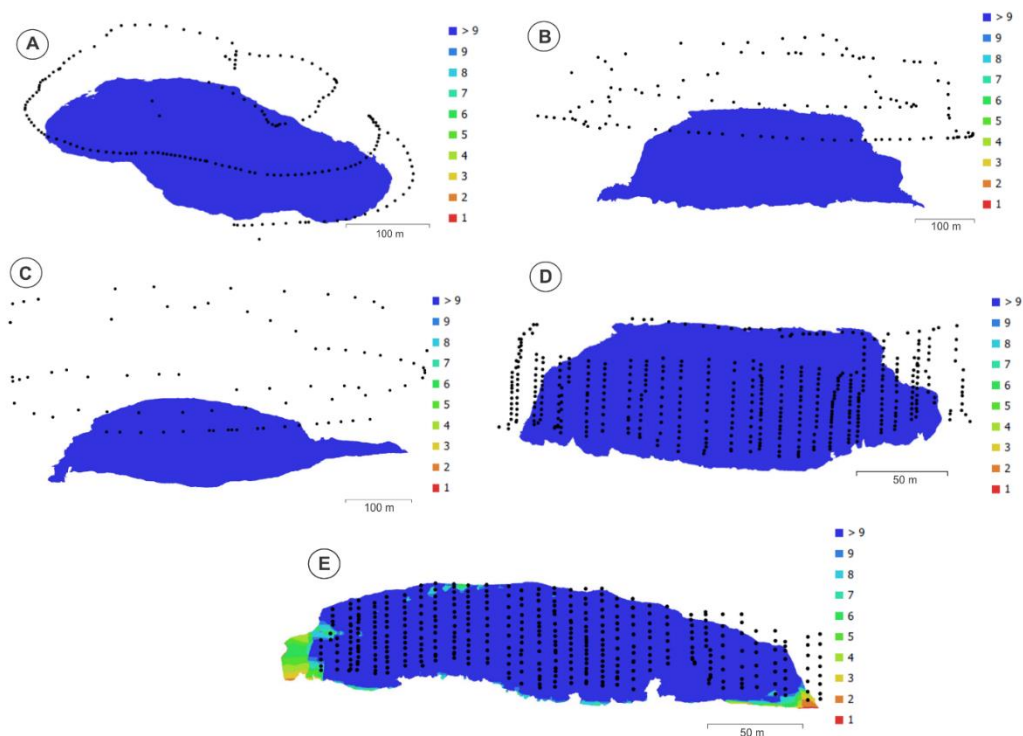
O processamento dos dados em ambas etapas foram realizados no *software* Agisoft *Metashape* 1.5.2 seguindo as seguintes etapas: (i) avaliação e edição, (ii) alinhamento, (iii) geração da nuvem densa, (iv) construção da malha triangulada ou MDS, (v) texturização da malha (Figura 25).

Figura 23 - Aquisição aérea para a construção do MDS, produto da primeira aquisição aérea. Representação esquemática da área de estudo, mostrando as linhas de voo e as fotografias adquiridas (linha pontilhada preta). A variação nas cores representam a quantidade de fotografias que imagearam um mesmo ponto 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 fotografias.



Fonte: Autora.

Figura 24 - Aquisição aérea dos afloramentos Pedra do Meio, Pedra Branca e Pedra Pintada para a construção dos MVA's. Em A, B, C, D e E são mostrados os afloramentos PM, PB média, PP média; PB alta e PP alta, respectivamente. A linha preta pontilhada representa a linha de voo e as cores variando de azul a vermelho representam a quantidade de fotografias que imagearam um mesmo ponto (pixel) durante a aquisição.



Fonte: Autora.

Na etapa de avaliação e edição é feita a análise de parâmetros de orientação e qualidade das fotografias. Neste procedimento é realizado a remoção manual das fotografias que não imagearam o objeto de estudo, depois é feita a converção das coordenadas das fotografias (se houver) para o sistema de coordenadas dos pontos de controle, por último estima-se a qualidade das imagens de modo que fotografias com qualidade inferior a 0,7 serão removidas.

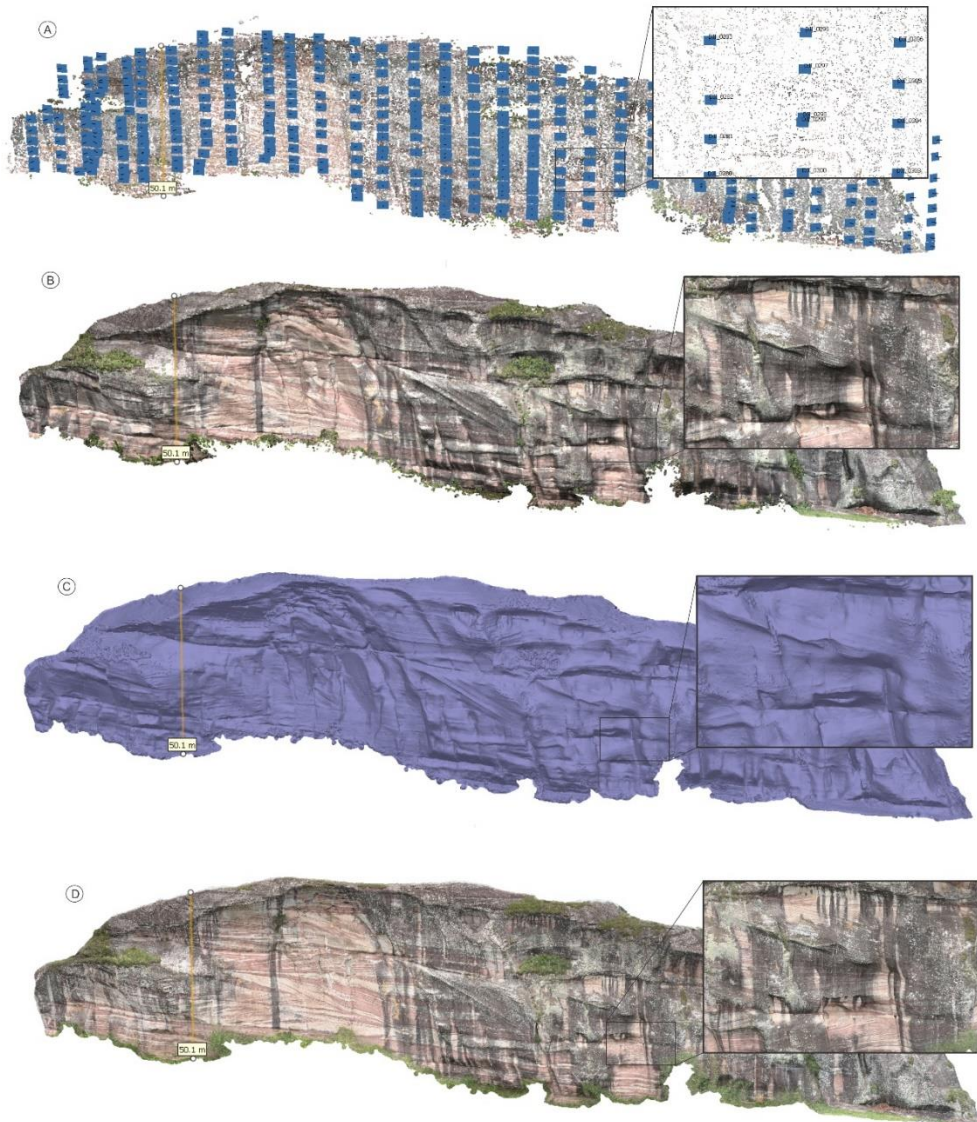
O alinhamento das fotografias é feito por meio do reconhecimento dos pontos nas diferentes fotos sobrepostas, para assim reconhecer a posição e orientação das fotos. Têm-se como resultado deste processo a nuvem esparsa de pontos. No final deste procedimento, é feito o reconhecimento das fotografias que foram alinhadas e as que não foram alinhadas, estas últimas foram desconsideradas nas próximas etapas.

A nuvem densa de pontos é construída através do posicionamento das fotografias alinhadas. Após a construção da nuvem densa de pontos pode ser gerado a *mesh* (malha) ou MDS. A malha é composta por triângulos irregulares, é gerada a partir dos pontos que compõe a nuvem densa de pontos os quais são unidos por triangulação. O modelo digital de elevação representa as altitudes da superfície topográfica em uma escala de cores, pode ser gerado nas projeções geográficas, planar ou cilíndricas.

A texturização reconstrói a textura sobre a *mesh* triangulada. Duas coordenadas (U e V) são atribuídas a cada vértice dos triângulos da *mesh*, e associa aos pontos de mesma coordenadas nas fotografias. As coordenadas U e V permitem cortar um triângulo da textura da foto e colá-lo no triângulo correspondente da malha (Figura 26). O produto gerados de tais procedimentos são: MDS, MVA's e ortofotomosaicos.

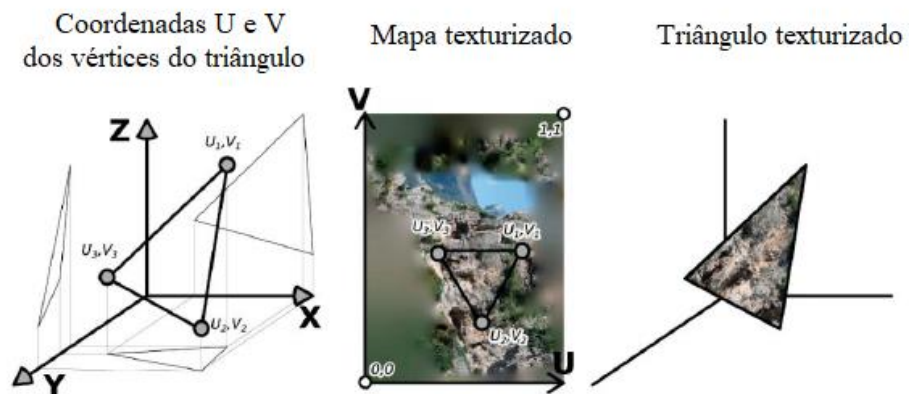
Ao final do processamento das fotografias no *Software Agisoft Metashape* resultou na produção de um MDS de média resolução e cinco MVA's: MVA Pedra Pintada (MVA-PP) de média e alta resolução, MVA Pedra Branca (MVA-PB) de média e alta resolução e MVA Pedra do Meio (MVA-PM) de média resolução.

Figura 25 - Etapas do processamentos das aerotografias no *software Agisoft Metashape*. Em A alinhamento das fotografias aéreas; B nuvem densa de Pontos; C Mesh; D modelo texturizado.



Fonte: Autora.

Figura 26 - Procedimento de texturização da malha triângulada.



Fonte: Extraído e modificado de Tavani *et al.*, (2014).

4.5 Resolução e georreferenciamento de MVA's

A resolução de um MVA depende de alguns parâmetros, como taxa de sobreposição das fotografias durante o alinhamento, resolução das fotografias, distância entre a câmera e o objeto e a configuração de *hardware* e *software* utilizada no processamento (VOLLGER; CRUDEN, 2016). A taxa de sobreposição das fotografias durante o alinhamento deve ser no mínimo de 80% ao longo das linhas de voo e de 60% entre as diferentes linhas de voo, para que a reconstrução do objeto em 3D seja satisfatória. A resolução das fotografias são determinadas pelo número de *pixels* que compõem a imagem, sendo sua quantidade diretamente proporcional a resolução das fotografias. Câmeras que possuem alto grau de resolução (acima de cinco megapixels) são ideais para a construção de MVA's, pois fotografias com maior qualidade e resolução são geradas. A distância entre o objeto de interesse e a câmera determina o GSD (*Ground Sampling Distance*). O GSD trata-se da relação entre o tamanho de um pixel em unidades de terreno, dada em centímetros ou milímetros. Quanto mais próximo do objeto estiver localizada a câmera, maior será a resolução espacial do MVA, assim, quanto menor o valor GSD, maior será a resolução da foto (VOLLGER; CRUDEN, 2016), ou seja, melhor será a definição da imagem. A configuração de *hardware* e *software* dos computadores utilizados no processamento definirá a resolução final dos MVA's baseados na qualidade dos dados adquiridos durante a campanha de aquisição das fotografias. Quanto menor a capacidade do hardware do computador, menor serão as configurações utilizadas para o processamento.

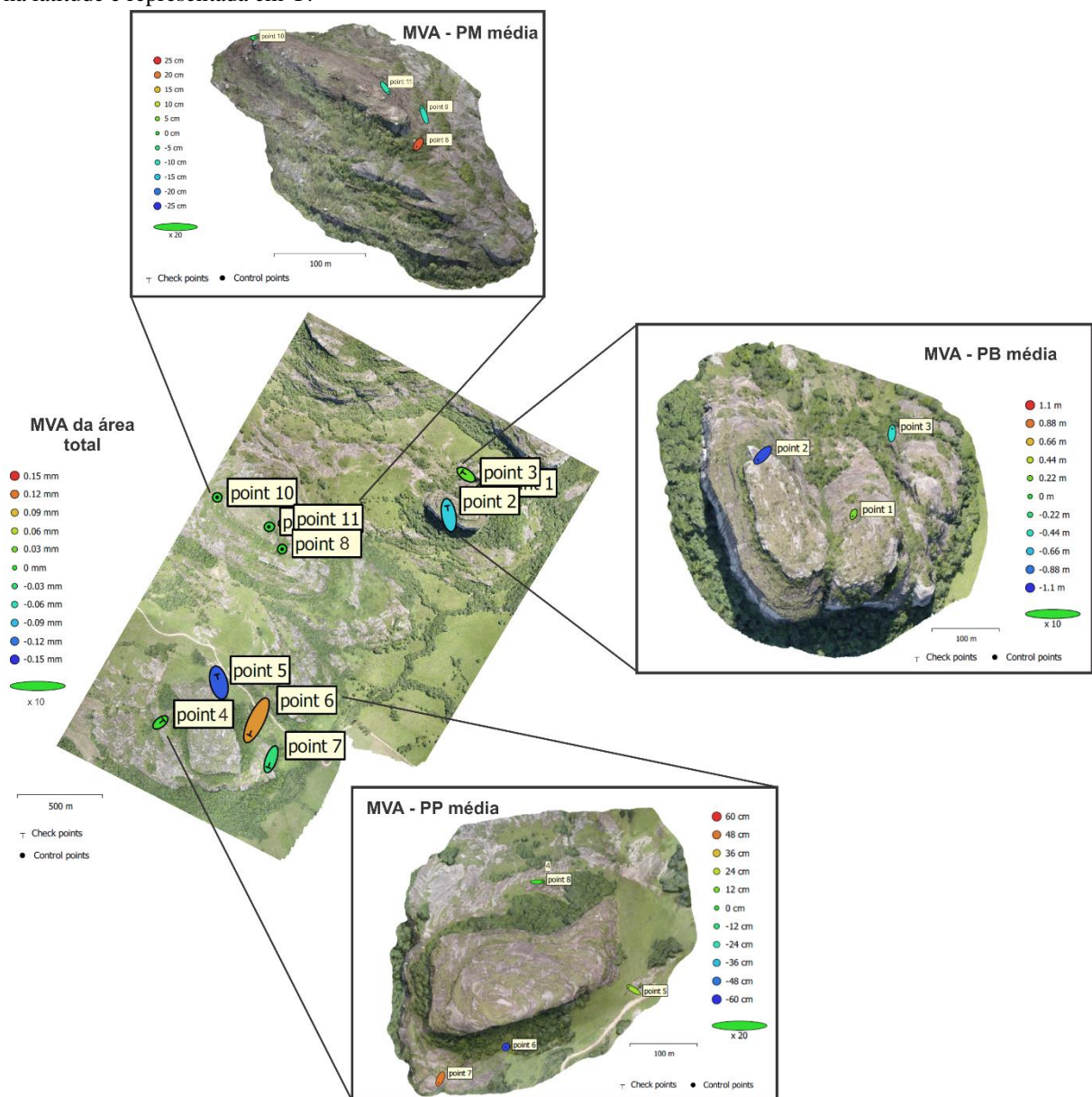
Após o processamento e geração dos MVA's de diferentes resoluções deve-se agrupá-los em um sistema de coordenada único, para isso é realizado o georreferenciamento dos mesmos no *software Agisoft Metashape*. A aquisição aérea dos modelos de diferentes resoluções foram realizadas em dias diferentes, o que pode ocasionar uma diferença nas coordenadas das fotografias, devido a fatores climáticos, pressão atmosférica, etc. Por isso, se faz necessário colocá-los na mesma coordenada.

O georreferenciamento é realizado a partir do reconhecimento de pontos em comum nos MVA's, marcados pontos iguais nos modelos de resoluções diferentes, sendo tal processo realizado manualmente através de marcadores. Primeiramente é feito a conversão do sistema de coordenadas do modelos. Originalmente os modelos são gerados em coordenadas lat-long (coordenadas geográficas) e são convertidos para coordenada UTM (*Universal Transversa de Mercator*).

Foram reconhecidas feições em comum em pares de MVA's iguais, mas com resoluções diferentes. Estas feições devem ser bem nítidas e bem visíveis em ambos MVA's, de maneira

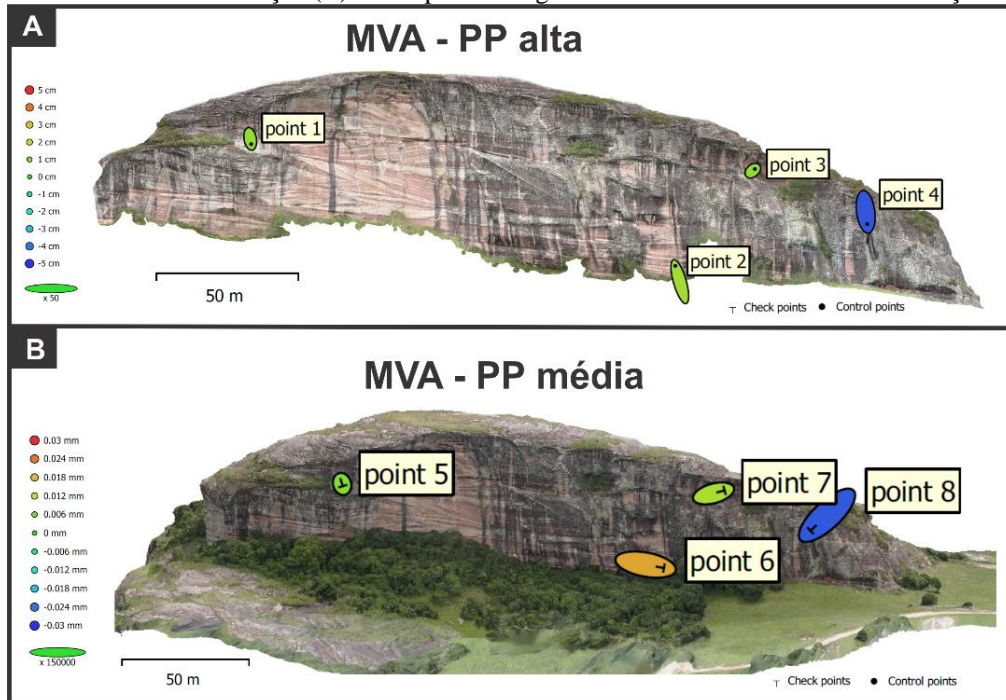
que todos os pontos identificados pertencessem a mesma cota na topografia e mesma coordenada, e conseqüentemente representassem a mesma feição exposta nos modelos. O georreferenciamento foi realizado primeiramente no modelo de média resolução para o MDS total (de média resolução), depois é feito no de alta resolução para o de média resolução (já georreferenciado). No total foram identificados 36 pontos, que corresponderam a pontos de controle para o georreferenciamento de cada modelo (Figura 27, 28 e 29).

Figura 27 - Georreferenciamento dos MVA's de média resolução com base no MVA da área total. As elipses nas figuras indicam o erro médio de localização dos pontos em X e Y. O erro na longitude é representada em X e erro na latitude é representada em Y.



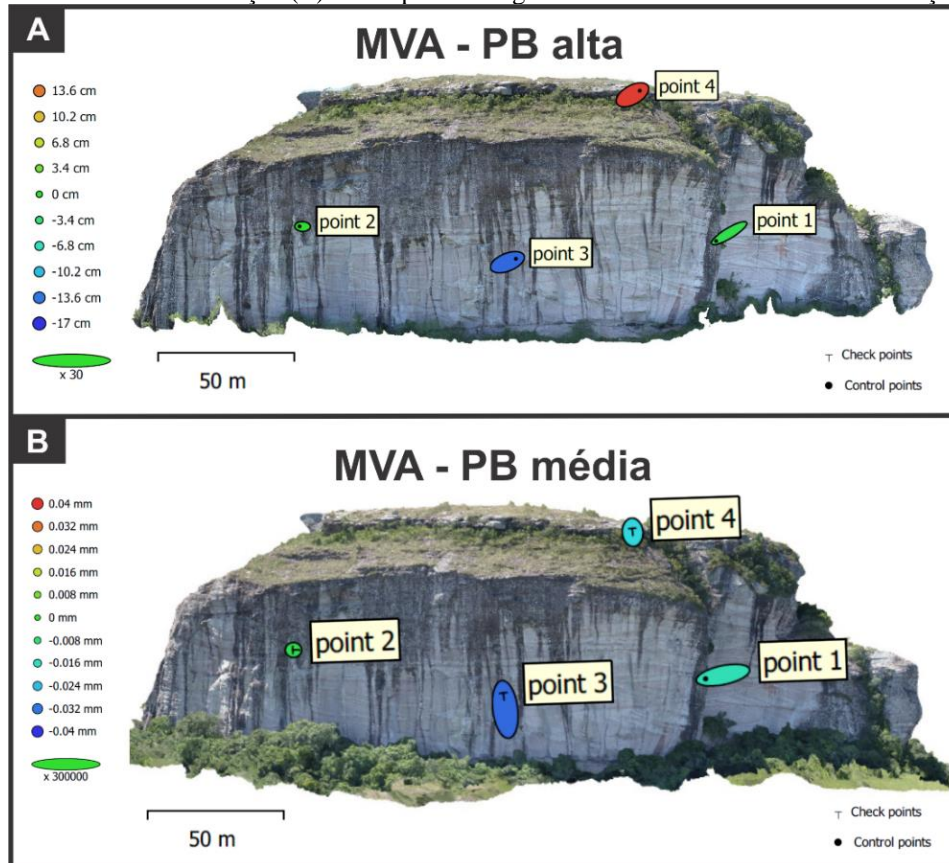
Fonte: Autora.

Figura 28 – Localização do pontos utilizados para o georreferenciamento do MVA PP de alta resolução (A) com base no MVA PP de média resolução (B). As elipses nas figuras indicam o erro médio de localização dos pontos.



Fonte: Autora.

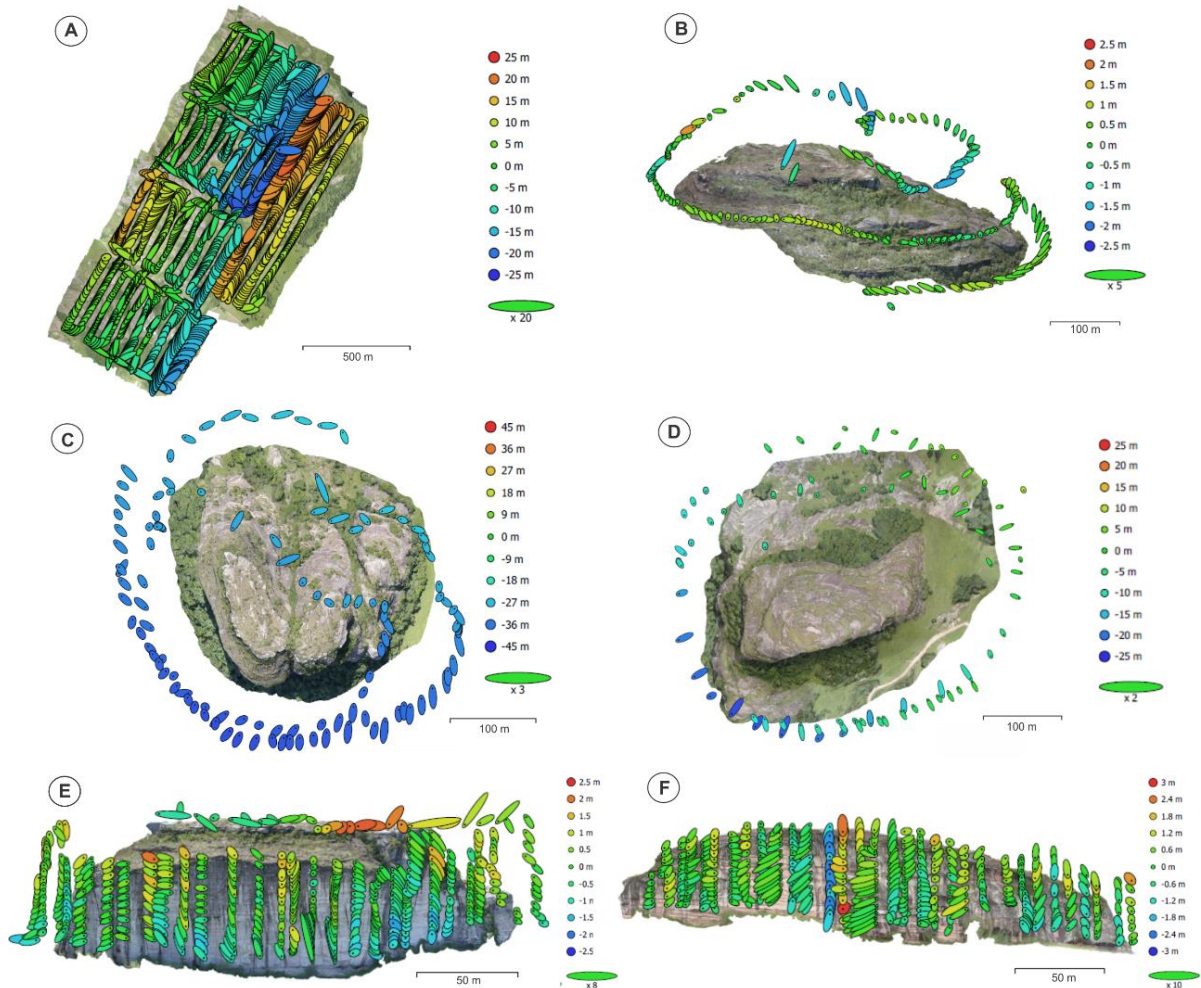
Figura 29 – Localização do pontos utilizados para o georreferenciamento do MVA PB de alta resolução (A) com base no MVA PB de média resolução (B). As elipses nas figuras indicam o erro médio de localização dos pontos.



Fonte: Autora.

O georreferenciamento também é importante para a diminuição do erro de posição das imagens. Estes erros ocorrem por causa de erros nas coordenadas devido a falhas no GPS. O *software* reconhece os erros de localização em cada foto utilizada nos MVA's, gerando um mapa de erros (Figura 30). Na figura 30, cada ponto representa a posição da câmera no momento do disparo e a cor representa a distorção da imagem ou ao erro associado em X e Y. A forma da elipse está associada ao erro em Z. No Quadro 3 apresenta os erros associados às localizações das fotografias nos modelos.

Figura 30 - 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. X representa o erro na longitude; Y representa o erro na latitude; Z representa o erro na altitude.



Fonte: Autora.

Quadro 3 - Média do erro de localização da câmera em cada MVA (X-longitude, Y - latitude e Z - Altitude).

MVA	Erro em X (m)	Erro em Y (m)	Erro em Z (m)	Erro em XY (m)	Erro total (m)
MDS total	2.08815	2.42151	10.0374	3.19751	10.5344
PM média	0.226561	0.434024	0.131292	0.489598	0.506896
PB média	1.76937	2.43049	3.37744	3.00632	33.9079
PP média	3.51344	4.49897	9.47678	5.70833	11.0632
PB alta	1.99717	2.97815	35.238	3.58582	35.4199
PP alta	1.84166	3.0298	3.76865	3.54561	5.17437

Fonte: Autora.

4.6 Interpretação geológica dos MVA's

A interpretação dos MVA's foi realizada em duas etapas no software *Agisoft Metashape 1.5.2* e *Midland Move 2017.1*. A primeira etapa consistiu na análise estrutural da nuvem densa de pontos e da malha triangulada texturizada para determinar a orientação espacial do acamamento sedimentar. A segunda etapa consistiu na análise fotoestratigráfica dos MVA's, esta é baseada nos princípios da fotoestratigrafia, pela definição de fotofácies e fotohorizontes (*e.g.* SGAVETTI, 1991).

Na análise estrutural determina-se a orientação e variação do acamamento sedimentar, mapeamento de falhas, fraturas e de paleocorrentes. A análise pode ser feita por três formas diferentes: i) estruturas expostas, na qual a orientação da superfície é feita isolando porções expostas da superfície do MVA; ii) estruturas não expostas, nas quais as linhas de intersecção são digitalizadas e planos de melhor ajuste são calculados; e iii) por vetores de paleocorrentes, onde as linhas do acamamento são digitalizadas sendo possível obter o valor do mergulho (verdadeiro ou aparente) da camada.

Na análise fotoestratigráfica realizou-se a identificação das fotofácies, a verificação das geometrias das superfícies de topo e base e obtenção das espessuras verdadeiras de cada fotofácie. Primeiramente, para a identificação das fotofácies, identificou-se as terminações estratiais, posteriormente foram definidas as configurações internas e geometrias externas dos estratos, buscando identificar diferentes estruturas sedimentares, texturas e colorações (Figura 31).

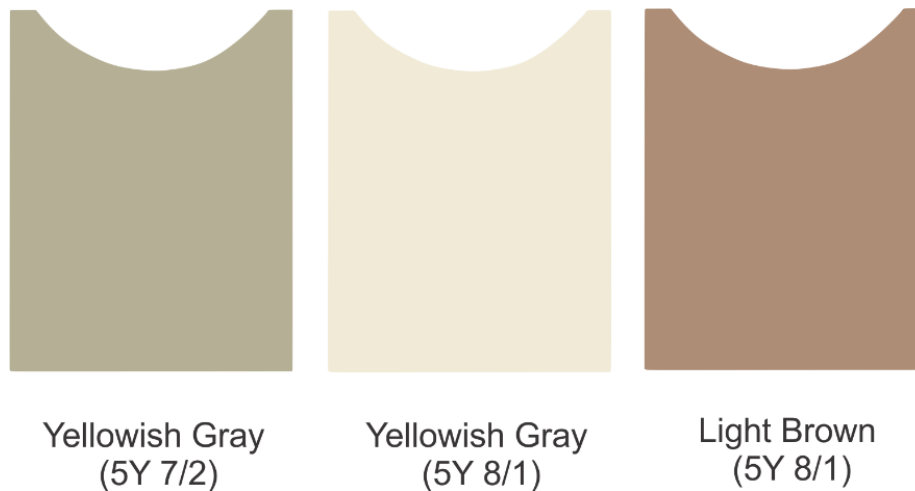
Figura 31 - Terminações de estratos encontrados nos afloramentos.



Fonte: Autora.

Para ajudar na identificação e descrição das fotofácies e evitar ambiguidade na identificação das cores, foi utilizada a tabela geológica de cores proposta por Munsell (2009, Figura 32). A cor da rocha foi comparada com a escala de Munsell (2009), obtendo assim para cada fácies uma cor código alfa numérico e nome específico, permitindo a visualização precisa da cor descrita e evitando confusões.

Figura 32 - Padrões de cores utilizados neste trabalho para a descrição das fotofácies.



Fonte: Extraído e modificado de Munsell (2009).

4.7 Levantamento digital de perfis colunares

O levantamento digital de perfis colunares nos MVA's foi realizado no *software Agisoft Metashape 1.5.2*. Este *software* permite aproximar e distanciar a imagem, tornando

possível a identificação e a medição de diferentes tamanhos de grãos da rocha (depende da resolução do modelo), espessuras verticais e laterais das camadas. A resolução dos modelos gerados neste trabalho não permitiram a identificação e diferenciação entre os diferentes tamanhos de grãos de areia bem como a identificação de algumas estruturas (*e.g.* presença de *ripples* e grânulos) sendo de extrema importância a utilização dos dados de campo para auxiliar e complementar a interpretação e análise dos modelos virtuais. Assim, foi utilizado o tamanho de grão médio observado na seção tipo (Perfil Pedra Pintada), para poder definir a textura da fotofácie, realizando o levantamento digital do modelo analisado.

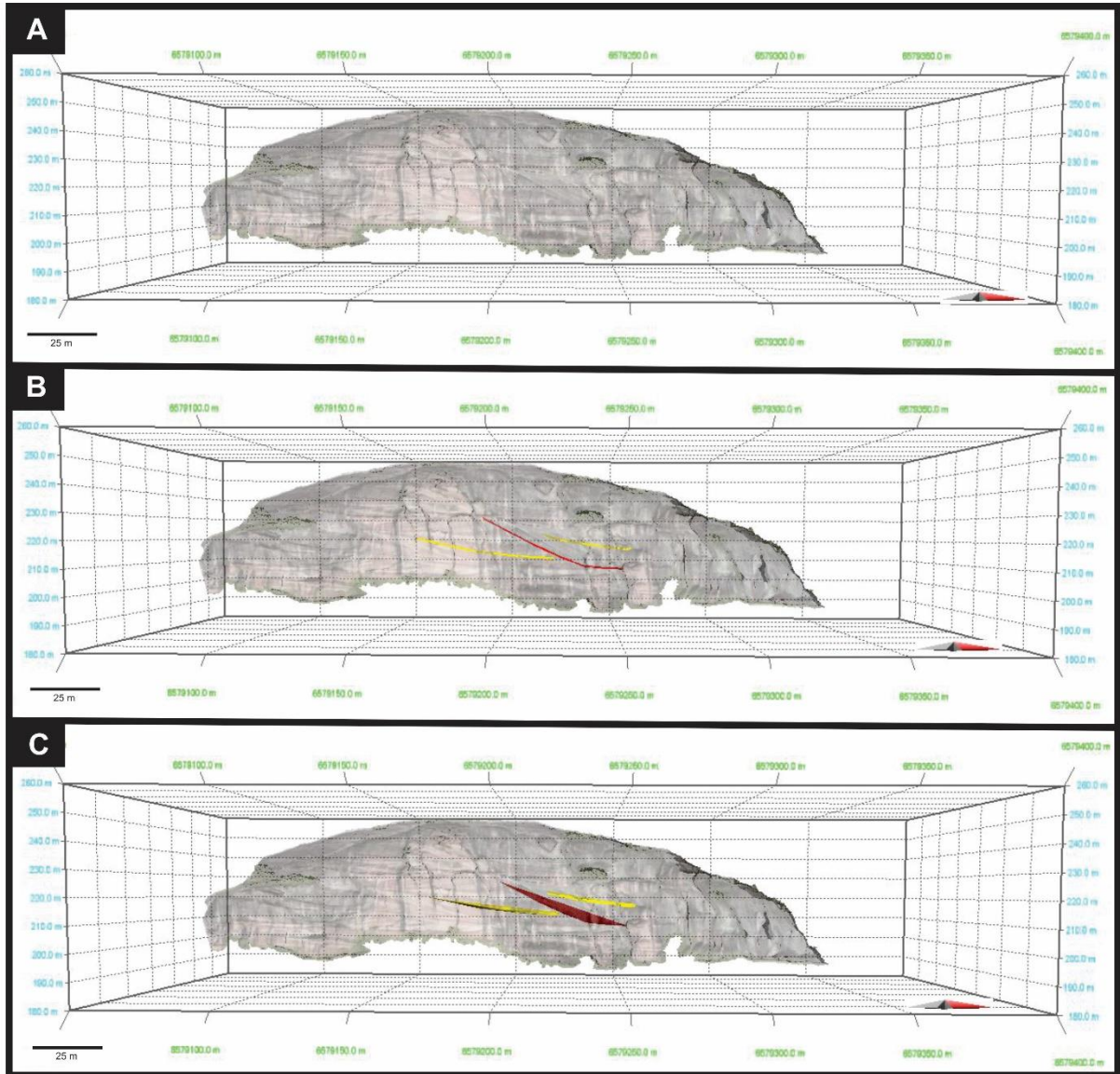
4.8 Medição e identificação de superfícies eólicas

A medição das orientações das superfícies e suas respectivas interpretações foram realizadas no software *Move 2017.1* através de estruturas não expostas (Figura 33). Linhas de intersecção (geometria da intersecção entre a superfície topográfica e a superfície geológica) foram digitalizadas e posteriormente foram gerados planos (por triangulação) a partir destas, obtendo a direção e mergulho preferencial do plano gerado. Foram criados planos para os extratos abaixo e acima das superfícies e para as superfícies, onde foram analisados as suas respectivas orientações. Se a superfície que limita os sets tiver o mesmo sentido ou sentido oblíquo ($< 60^\circ$) aos mesmos, estas serão classificadas como superfície eólica de 2º ordem; Se a superfície que limitam os sets possuírem sentido oposto aos mesmo serão classificadas como superfície eólica de 1º ordem.

4.9 Modelagem de reservatório

O modelo de reservatório foi realizado no *Software Midland MOVE 2017.1*. A geração dos modelos de reservatórios segue quatro etapas sequenciais: i) importação dos MVA's; ii) digitalização das linhas de topo e base; iii) confecção das superfícies de topo e base; iv) confecção de modelos geocelulares (Figura 34).

Figura 33 – Método utilizado para a medição e interpretação de superfícies eólicas de 1° e 2° ordens. A) Modelo virtual de afloramento referente ao MVA-PP de alta resolução; B) Digitalização da linha de intersecção, em vermelho superfície eólica, em amarelo estratos cruzados; C) Construção dos planos por triangulação para a extração de suas orientações principais, em vermelho plano correspondente a superfície eólica, em amarelo palnos referentes aos estratos cruzados.

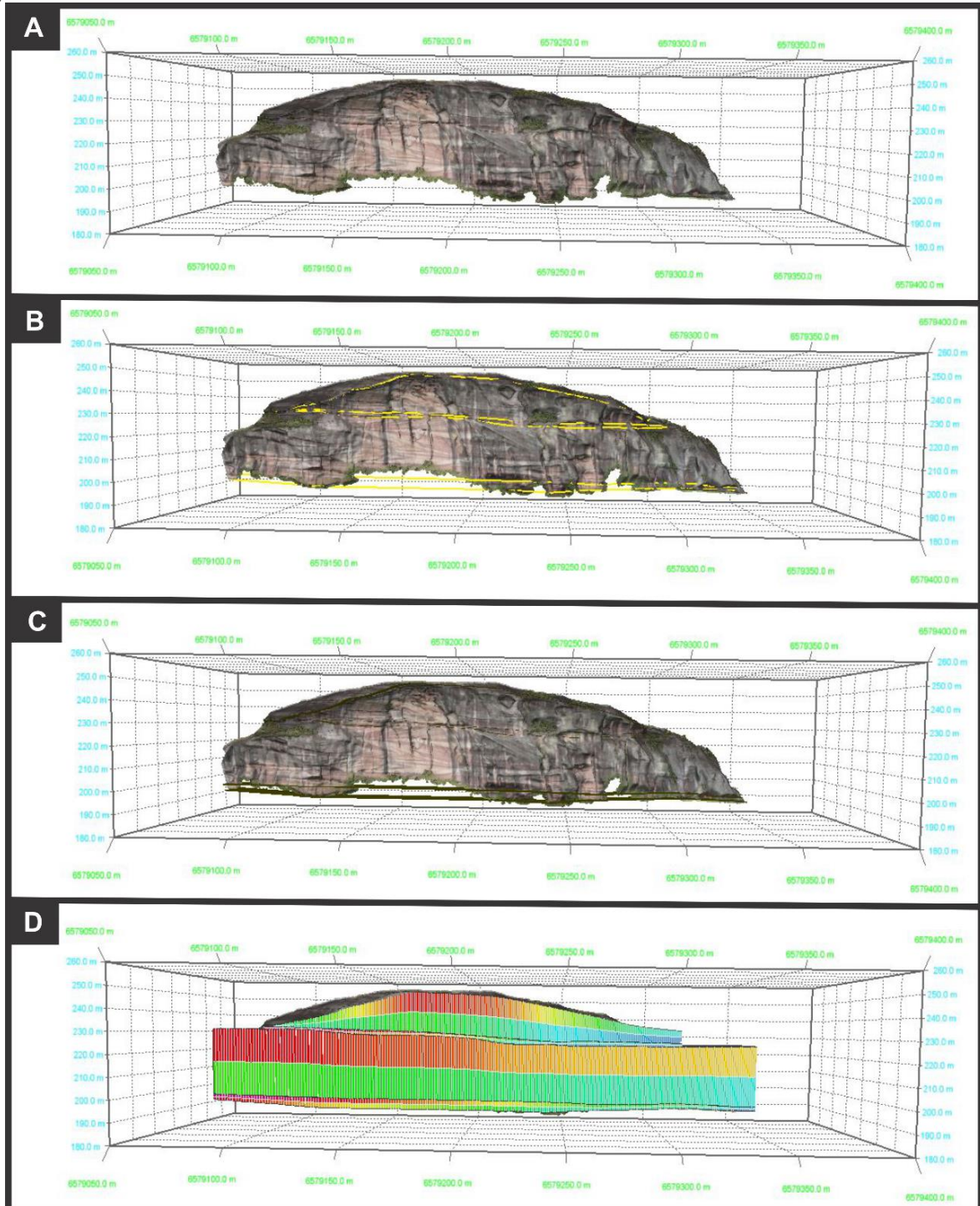


Fonte: Autora.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do presente trabalho compreendem quatro etapas principais, são elas: i) construção de MVA's; ii) análise e interpretação faciológica e estratigráfica de campo e nos MVA's (fotoestratigrafia); iii) caracterização das heterogeneidades e iv) construção e interpretação do modelo de reservatório análogo com base nas heterogeneidades.

Figura 34 - Método utilizado para a construção de volumes geocelulares. A) Modelo virtual de afloramento – MVA; B) Digitalização das linhas de base e topo das camadas; C) Extrusão das superfícies; D) Geração de volumes geocelulares.



Fonte: Autora.

5.1 Construção dos MVA's

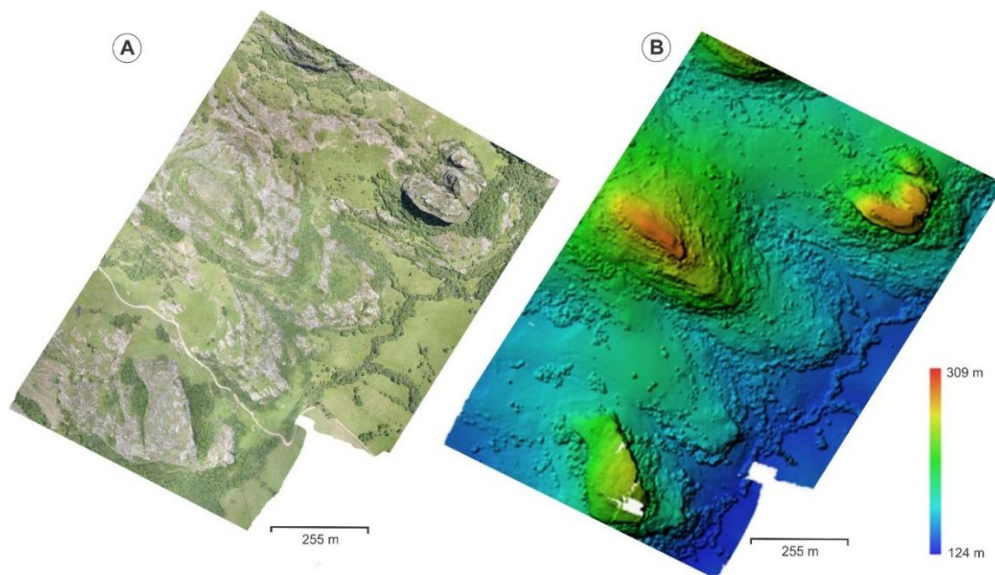
Para a construção dos MVA's compreendeu a construção de um MDS da área total e cinco MVA's. O MDS é produto da primeira aquisição aérea, utilizado para a identificação e

reconhecimento da topografia e da geomorfologia da área de estudo. O MDS foi processado no *software Agisoft Metashape* seguindo todas as etapas citadas para o processamento, obtendo um ortofotomosaico com as feições da área, quando sobreposto ao MDS resulta em um MDS completo. Após a segunda etapa de aquisição das fotografias aéreas e seu processamento, resultou na construção de cinco MVA's.

5.1.1 Modelo digital de superfície (MDS)

O MDS total da área de estudo foi gerado a partir de 1.594 fotografias, a uma altura de voo de 109 metros. Foi coberta uma área de 2,46 km² sendo necessário 50 linhas de voo para cobrir a área toda. O MDS foi gerado com uma resolução de 2.8 cm/pix. Após a construção do MDS, foi gerado um ortofotomosaico que foi sobreposto ao MDS inicial resultando no MDS total final (Figura 35).

Figura 35 - (A): Ortofotomosaico superior da área de estudo. (B): Modelo Digital de Superfície (MDS) da área de estudo mostrando na escala de cores a variação das curvas de nível topográficas.



Fonte: Autora.

5.1.2 Modelos virtuais de afloramento

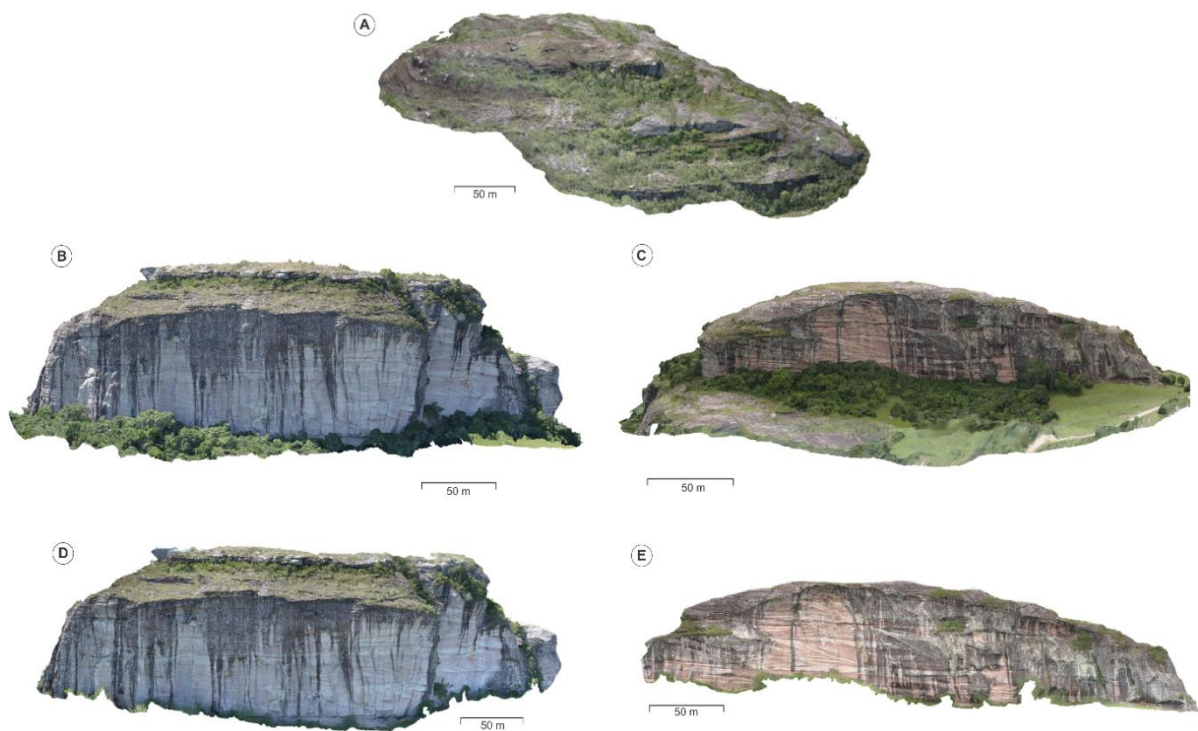
Os MVA's gerados são referentes aos afloramentos Pedra Pintada, Pedra Branca e Pedra do Meio (Figura 36). O Quadro 4 apresenta o número de fotos, altura média de voo e resolução (GSD) dos modelos gerados. Os MVA's Pedra Pintada e Pedra Branca de alta resolução encontra-se no apêndice localizado no fim deste volume (Apêndice I e II respectivamente).

Quadro 4 - Resolução (GSD) dos modelos.

MVA	Nº de fotos	Altura média de voo (m)	GSD
MDS total	1594	109	2.8 cm/pix
MVA - PM média	194	114	1.95 cm/pix
MVA - PB média	115	107	2.56 cm/pix
MVA - PP média	82	265	4.67 cm/pix
MVA - PB alta	461	26.3	6.82 mm/pix
MVA - PP alta	399	22.1	5.54 mm/pix

Fonte: Autora.

Figura 36 - MVA's referente aos afloramentos estudados. A) MVA-PM de média resolução; B) MVA-PB de média resolução. C) MVA-PP de média resolução. D) MVA-PB de alta resolução; E) MVA-PP de alta resolução.



Fonte: Autora.

5.2 Perfis Colunares

O afloramento Pedra Pintada foi escolhido para a descrição de campo pois é a seção tipo da Formação conforme Paim e Scherer (2003). Ao todo foram levantados aproximadamente 73 m de seção, comparados diretamente com os dados publicados por Paim e Scherer (2003 e

2007). O perfil colunar obtido em campo encontra-se no apêndice localizado no fim deste volume (Apêndice III).

A diferença principal do levantamento realizado neste trabalho com o levantamento de Paim e Scherer (2003) se dá nas espessuras das unidades (descritas no item 5.9). A primeira unidade eólica medida em campo possui uma espessura 7 metros e a espessura medida por Paim e Scherer (2003) é de 8 metros, não apresentando grandes diferenças quanto a espessura desta unidade (1 m). A primeira associação flúvio-lacustre medida em campo possui espessura de 11 metros enquanto a Paim e Scherer (2003) é de 3 metros, tendo uma diferença de 8 metros. A segunda unidade eólica reconhecida neste trabalho possui 12 metros de espessura, a espessura desta unidade medida por Paim e Scherer (2003) possui 6 metros a mais da medida deste trabalho. A segunda unidade flúvio-lacustre medida possui 4 metros de espessura, enquanto a de Paim e Scherer possui 6 metros, possuindo assim uma diferença de 2 metros entre as medidas. A última unidade eólica medida em campo possui 45 metros enquanto a mesma unidade medida por Paim e Scherer possui 50 metros, chegando assim a uma diferença de 5 metros. Provavelmente estas diferenças se deram devido ao ângulo de mergulho das camadas, fazendo com que a variação na hora de medi-las tenha hora subtraído e hora adicionado dezenas de centímetros.

5.3 Análise Litofaciológica

A análise faciológica permitiu o reconhecimento de oito litofácies (Quadro 5; Figura 37 e 38) definidas a partir da combinação de granulometria, composição e estruturas sedimentares.

Quadro 5 - Síntese das litofácies encontradas em campo.

Litofácies	Descrição	Processo/Interpretação
Sl(e)	Arenito fino a médio, quartzo-feldspático, bem selecionado, com grãos subarredondados a arredondados e alta esfericidade. Apresenta estratificações cruzadas de baixo ângulo (<15°), com espessura variando de 0,5 a 10 cm, marcadas por laminações finamente espaçadas, com gradação inversa e segregação entre os grãos finos e médios. Localmente observa-se foresets de marcas onduladas (< 2 cm) truncando as laminações.	Corrente trativa, unidirecional em meio subaéreo. Migração e cavalgamento em baixo ângulo de marcas onduladas cavalgantes transladantes. Porção basal de dunas eólicas ou depósitos de interdunas.

St(e)	<p>Arenito fino a médio, de composição quartzo-feldspática, bem selecionados com grãos subarredondados a arredondados e alta esfericidade, dispostos em sets de estratos cruzados tangenciais ou acanalados de médio a grande porte (< 17 m). Internamente possui gradação inversa em cunhas que localmente se interdigitam com laminações de marcas onduladas eólicas na porção inferior. Presença frequente de truncamento entre os foresets e laminações distorcidas em forma de prato e pilar.</p>	<p>Corrente trativa, unidirecional em meio subaéreo. Migração de dunas eólicas com cristas sinuosas (3D). Os foresets marcam a alternância entre queda livre e fluxos de grãos (gradação inversa) na porção mais superior. Na porção inferior tangenciam a base e intercalam, por vezes, com marcas onduladas eólicas, constituindo a porção basal das dunas. Os foresets truncados representam reativação no padrão de migração das dunas (superfícies 3ª ordem), enquanto as estruturas de prato e pilar representam fluidizações geradas pela proximidade do lençol freático.</p>
Sl	<p>Arenito fino a médio, quartzo-feldspático, moderadamente a mal selecionado, grãos subarredondados a subangulosos e baixa esfericidade. Apresenta estratificação cruzada de baixo ângulo (<15°) com grânulos dispersos ou concentrados na base dos foresets, laminação centimétrica (< 2 cm), por vezes com intraclastos lamosos.</p>	<p>Depósitos de forma de leito plano, gerados por correntes unidirecionais trativas em condição transicional entre regime de fluxo inferior e superior. Migração de formas de leito atenuadas, com alta razão comprimento de onda/amplitude, sob regime de fluxo inferior.</p>
Sw	<p>Arenito fino a médio, quartzo-feldspático, moderadamente selecionado, grãos subarredondados e com marcas onduladas truncadas de baixo ângulo. As formas são convexas, simétricas a levemente assimétricas, com até 4 cm de espessura, calhas arredondadas e linhas de cristas retas e agudas, geralmente bifurcadas e com índice de ripple 6. Localmente ocorrem drapes de lama recobrimdo-as.</p>	<p>Migração de marcas onduladas truncadas geradas em condições de fluxo trativo, oscilatório e subaquoso.</p>
Sr	<p>Arenito fino a médio, de composição quartzo-feldspática, moderadamente selecionado, grãos subarredondados e alta esfericidade, com marcas onduladas assimétricas, com até 5 cm de espessura. As faces de barlavento apresentam mergulho suave com maior extensão, enquanto as de sotavento são íngremes e estreitas. As linhas de crista são sinuosas, com calhas retas e índice de ripple 4.</p>	<p>Migração de marcas onduladas sinuosas geradas por correntes trativas, unidirecionais e subaquosas, em condições de regime de fluxo inferior.</p>

St	Arenito médio a grosso, mal selecionado, grãos subarredondados e esfericidade baixa de composição quartzo-feldspática. Apresenta sets com estrutura cruzada tangencial ou acanalada de até 2 m, com laminações centimétricas marcadas por gradação normal, com intraclastos argilosos e seixos dispersos subarredondados com esfericidade alta, concentrados na base dos foresets, sem orientação preferencial.	Migração de formas de leito subaquosas de crista sinuosa (3D) geradas por correntes trativas, unidirecionais em regime de fluxo inferior.
Sm	Arenito médio a grosso, quartzo-feldspático, moderadamente selecionados, grãos subarredondados com baixa esfericidade. Apresenta laminação indistinta, por vezes maciço, sem organização interna, com grânulos dispersos, ou concentrados em níveis.	Deposição de fluxos hiperconcentrados ou resultado de processos de fluidização pós-deposição que obliteram a estratificação original.
Fl	Siltitos a argilitos laminados, com intervalos de lamitos com gretas de contração com tamanho variado, curvadas onde o espaçamento entre elas é preenchido por areia média.	Deposição de sedimentos por assentamento gravitacional de partículas em suspensão que secaram devido à exposição subaérea.

Fonte: Autora.

5.4 Associação de Litofácies

Com base nas litofácies identificadas em campo foram identificadas três associações de litofácies produzidas pela ação de processos sedimentares diferentes associados a sistemas desérticos: dunas eólicas, depósitos de interdunas e depósitos flúvio-lacustres.

5.4.1 Depósitos de dunas eólicas

Descrição: esta associação é composta predominantemente por arenitos finos a médios, subarredondados a arredondados, bem selecionados, compreendendo pacotes tabulares dispostos em *sets* de estratos cruzados tangenciais ou acanalados de grande a médio porte (St(e)) que se intercalam com estratificações cruzadas de baixo ângulo (Sl(e)), formando pacotes de até 17 m (Figura 39). Internamente, são constituídos por laminações transladantes cavalgantes de marcas onduladas eólicas finamente espaçadas. Foram medidos 15 sentidos de fluxo a partir dos *foresets* das estratificações cruzadas com direção média para 78°, variando entre 050° a 105°.

Os *sets* de estratos cruzados tangenciais a acanalados de médio a grande porte são formados predominantemente por estratos de fluxo de grãos nas porções mais íngremes dos estratos frontais que se interdigitam em direção a base com laminações transladantes cavalgantes de marcas onduladas eólicas milimetricamente espaçadas e por estratos de queda livre de grãos. Internamente, os sets apresentam superfícies côncavas de alto ângulo (15° - 20°) que truncam os estratos subjacentes e mergulham no mesmo sentido dos estratos cruzados. Localmente a laminação está distorcida, possuindo um aspecto corrugado e relevo ondulado, causando deformação nos estratos cruzados.

Os estratos tangenciam a superfície limítrofe basal que é subhorizontal ou mergulha suavemente ($<2^{\circ}$) no sentido oposto aos dos estratos cruzados. Em alguns locais é possível observar, estratos cruzados compostos subdivididos em vários sets e delimitados por superfícies inclinadas (5° a 10°) no mesmo sentido do mergulhos dos *foresets*.

Interpretação: Os estratos cruzados tangenciais ou acanalados de médio a grande porte, constituídos por arenitos finos a médios, bem selecionados, com grãos subarredondados a arredondados com alta esfericidade, formados por estratos de fluxos de grãos, queda livre de grãos e estratos transladantes cavalgantes de marcas onduladas eólicas são interpretados como depósitos residuais de dunas eólicas (HUNTER, 1977; KOCUREK; DOTT, 1981). Os estratos cruzados com sentido para NE apresentam formas de leito migrando sobre um regime de ventos predominante de WNW-ENE.

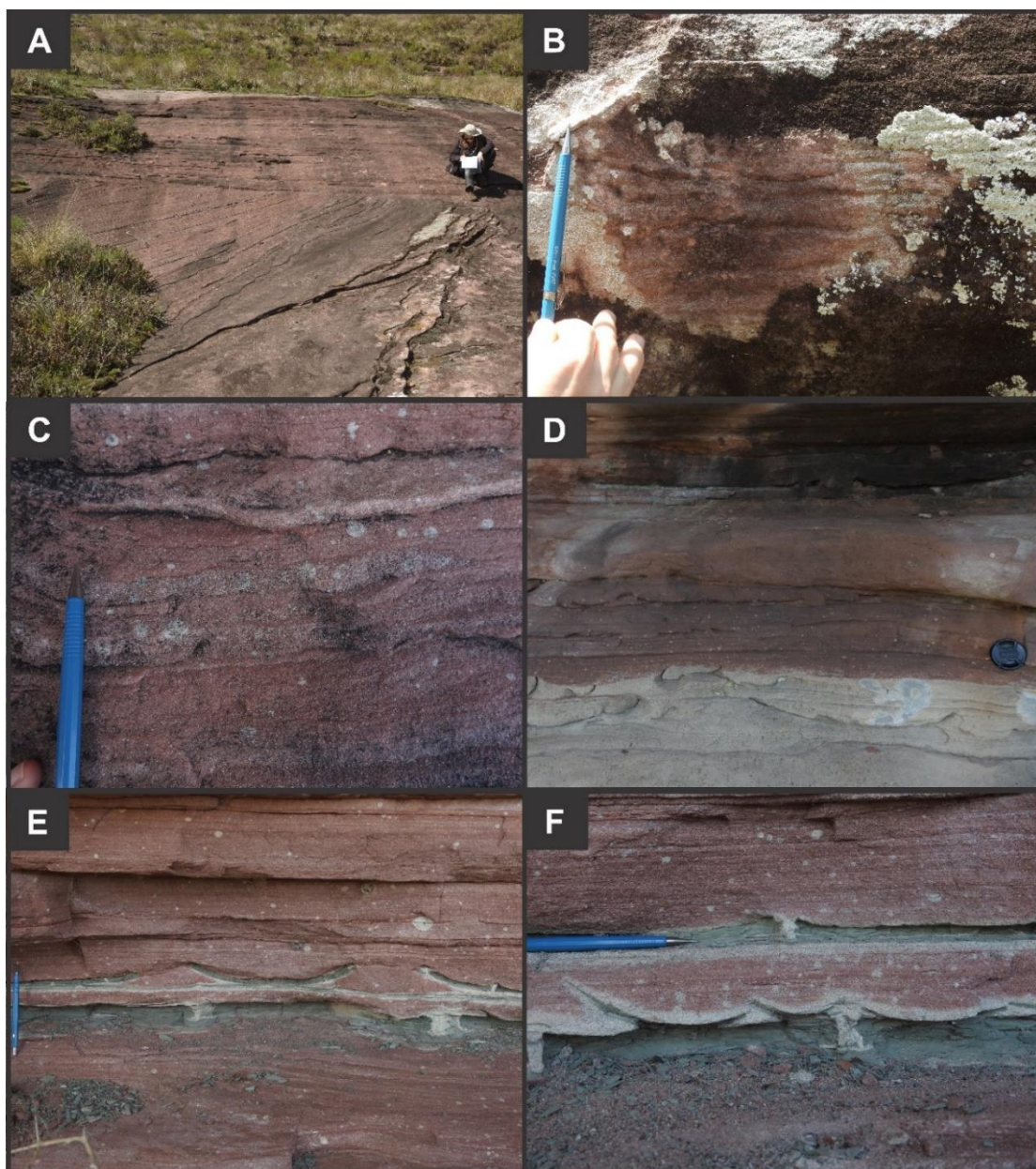
Os estratos cruzados de baixo ângulo constituídos essencialmente por laminações transladantes cavalgantes de marcas onduladas eólicas são interpretados como dunas eólicas com ângulo de cavalgamento muito baixo, preservando a porção basal das mesmas (“pés de dunas”; KOCUREK, 1990).

As superfícies subhorizontais que limitam sets e têm baixo ângulo de mergulho ($<2^{\circ}$) com sentido oposto aos mesmos são designadas superfícies de interduna (KOCUREK, 1996) ou superfícies de 1ª ordem (BOOKFIELD, 1977), formadas a partir do cavalgamento de dunas eólicas. As superfícies que mergulham no mesmo sentido em relação aos estratos cruzados são denominadas superfícies de superposição (KOCUREK, 1996) ou 2ª ordem (BOOKFIELD, 1977), formadas pela migração superposta de dunas sobre a face frontal de um *draa*.

As superfícies inclinadas a favor do fluxo que truncam em alto ângulo os estratos cruzados são interpretadas como superfícies de reativação (KOCUREK, 1996) ou 3ª ordem (BOOKFIELD, 1977). Estas superfícies são vinculadas ao efeito da erosão de um set de estratificação durante períodos de ventos reversos ou oblíquos (KOCUREK; DOTT, 1981), ou ainda por uma mudança na velocidade de migração, na declividade e/ou na assimetria das

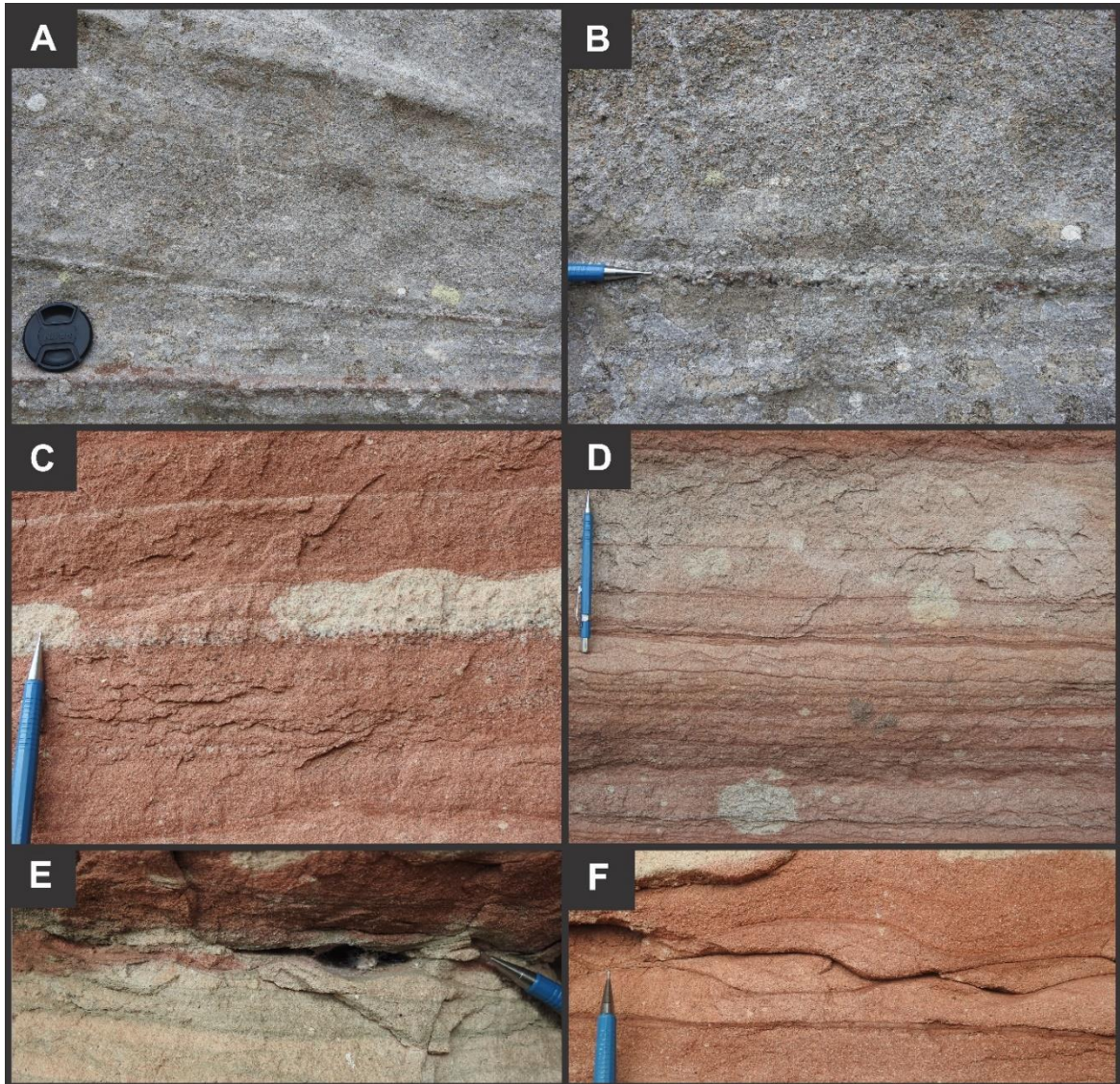
formas de leito (RODRÍGUEZ-LÓPEZ *et al.*, 2012). As laminações distorcidas são interpretadas como estruturas de adesão formadas pela aderência dos sedimentos a uma superfície úmida (KOCUREK, 1981). A superfície ondulada que fluidizou alguns sets de cruzadas tangenciais são interpretadas como uma superfície de *Stokes*, causada pela deflação eólica próximo ao lençol freático (STOKES, 1968).

Figura 37 - Fotos das litofácies eólicas encontrada no afloramento. A) Litofácies St(e) com estratos cruzados acanalados eólicos de grande porte e litofácies SI(e) com estratos cruzados de baixo ângulo; B) Litofácies SI(e) com laminações de marcas onduladas eólicas bem marcadas; C) Camadas com gradação inversa marcadas pela alternância de areia média e fina, levemente fluidizadas; D, E e F) Litofácies Fl, Sm, e SI(e) mostrando as fases de alternância de inundação e ressecamento.



Fonte: Autora.

Figura 38 - Fotos das litofácies fluviais encontradas no afloramento. A) Litofácies St com estratos cruzados tangenciais; B) Base dos estratos cruzados (St) com concentração de grânulos na base; C) Camadas com gradação normal marcada por granulos subarredondados com alta esfericidade, de composição quartzosa e intraclastos lamosos sem orientação preferencial; D) Pacote composto por intercalações das litofácies Sm, Sw e Fl mostrando os ciclos de aumento da espessura da fácies Sm; E) Litofácies Sw com marcas onduladas simétricas a levemente assimétricas e com drapes de lama recobrimdo-as; F) Litofácies Sr com marcas onduladas assimétricas com drapes de lama recobrimdo-as.



Fonte:Autora.

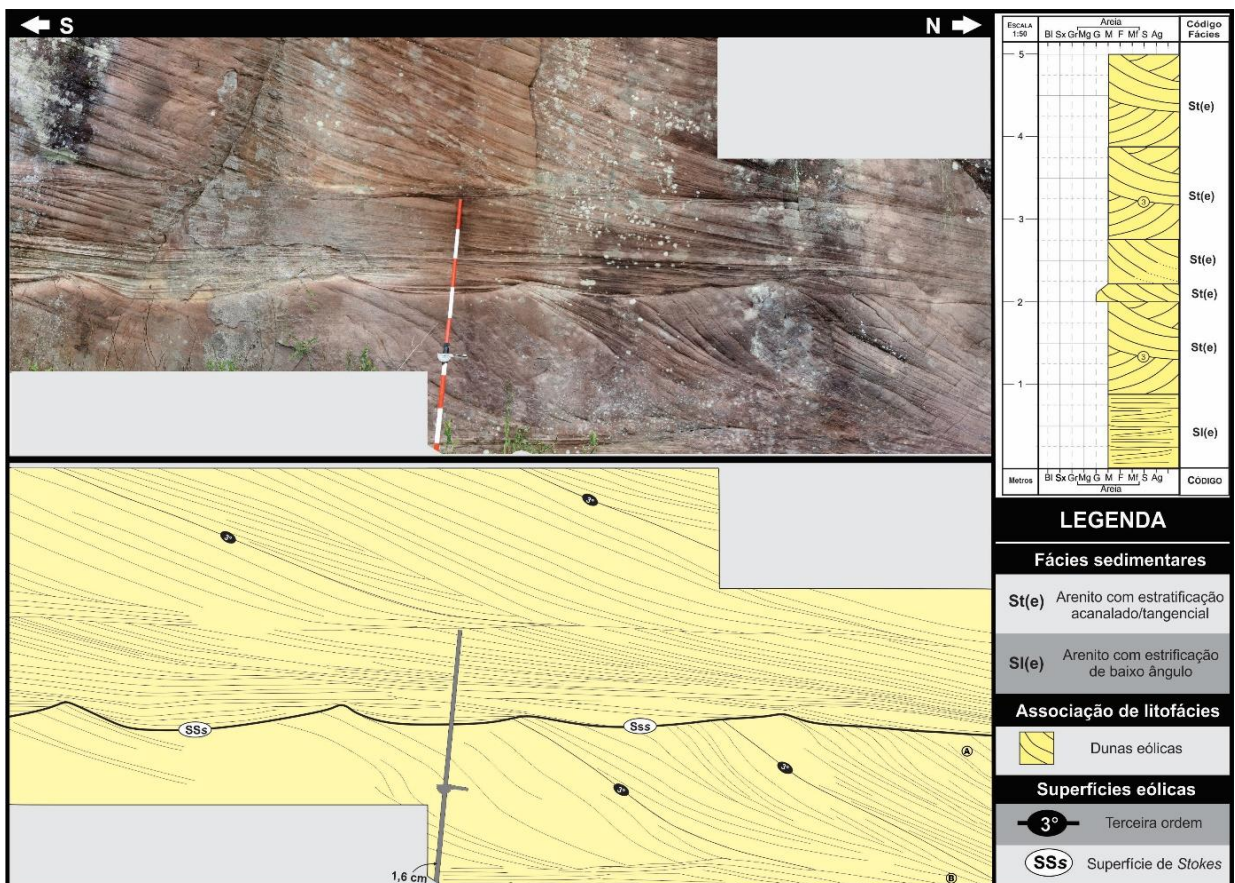
5.4.2 Depósitos de interdunas

Descrição: esta associação é formada por arenitos finos a médios, subarredondados a arredondados, bem selecionados. São corpos arenosos, lenticulares, com espessura de até 60 cm. Tais pacotes são caracterizados por arenitos com estratos cruzados de baixo ângulo (Sl(e)) compostas essencialmente por laminações de marcas onduladas eólicas (Sr (e)) que se intercalam a lentes de lamitos laminados com gretas de contração (Fl) e arenitos maciços (Sm;

Figura 40). Tal associação se interdiga lateralmente e verticalmente com os estratos de dunas eólicas. Foram medidos 5 sentidos de fluxo a partir dos foresets das marcas onduladas com direção média para 22° , variando entre 15° a 35° .

Interpretação: Os estratos cruzados de baixo ângulo constituídos essencialmente por laminações de marcas onduladas eólicas foram interpretados como produtos da migração de marcas onduladas transladantes representando depósitos de interdunas secas (HERRIES, 1993). Os arenitos maciços são interpretados como retrabalhamento fluvial de sedimentos depositados por processos eólicos ou como sendo o resultado de processos de fluidização pós-deposicional que obliteraram a estratificação original (MIALL, 1996). Os arenitos maciços que gradam para os depósitos de dunas eólicas são interpretados como depósitos de fluxo hiperconcentrados de inundações episódicas nas regiões de interdunas úmidas (HERRIES, 1993).

Figura 39 - Fotomosaico interpretado representando as associações de litofácies de depósitos de dunas eólicas



Fonte: Autora.

Os pelitos laminados são interpretados como deposição de sedimentos por assentamento gravitacional de partículas em suspensão (MIALL, 1996). As intercalações de lâminas de pelitos com arenitos maciços sugerem o represamento de água nas regiões de interdunas e

desenvolvimento de pequenos corpos lacustres (PAIM; SCHERER, 2007). A presença de gretas de contração indica que estes corpos lacustres possuem caráter efêmero, formados em depressões de interdunas que secaram após as inundações (MOUNTNEY; THOMPSON, 2002).

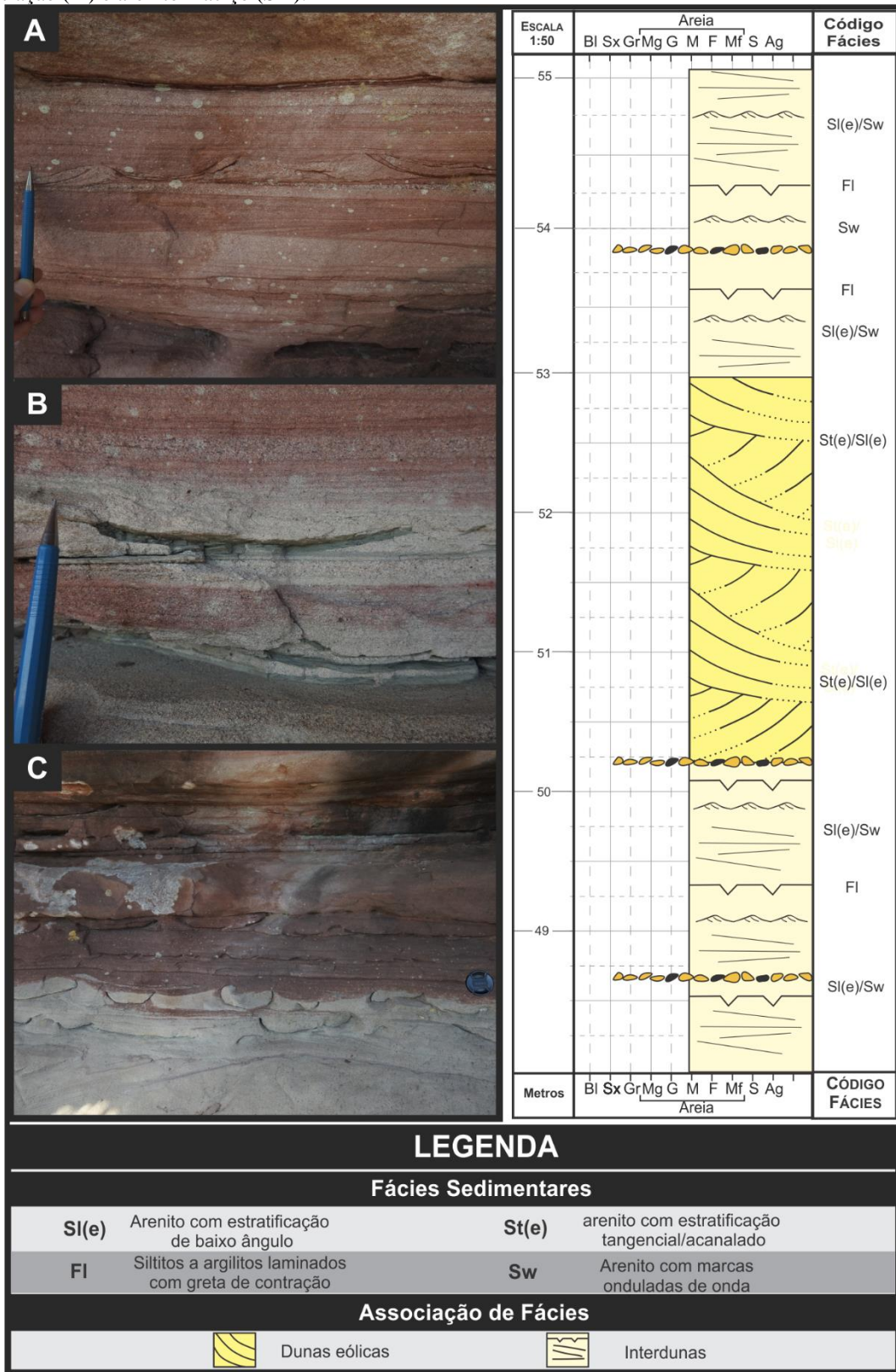
Os estratos cruzados com sentido para NE apresentam formas de leito migrando sobre um regime de ventos predominante de SSW-NNE

5.4.3 Depósitos flúvio-Lacustres

Descrição: esta associação de fácies é composta por arenitos maciços (Sm), arenitos com estratificação de baixo ângulo (Sl), arenitos com estratificação tangencial ou acanalados (St), arenitos com marcas onduladas truncadas de baixo ângulo (Sw) e arenitos com marcas onduladas assimétricas (Sr; Figura 41). Tal associação se interdigita lateralmente e verticalmente com os estratos de dunas eólicas. Foram medidos 8 sentidos de fluxo a partir dos estratos cruzados tangenciais e marcas onduladas com direção média para 345°, variando entre 330 a 360 °.

Os arenitos com estratificação cruzada de baixo ângulo possuem espessura de até 60 cm, podendo formar um empilhamento de *sets* com até 3 m de espessura caracterizados pela alternância de arenitos finos a grossos, com presenças de grânulos de composição quartzosa e intraclastos lamosos dispersos nos planos das estratificações. Estes se intercalam com sets de estratos cruzados tangenciais/acanalados, de espessura de até 1,5 m, formando corpos arenosos de geometria lenticular que apresentam internamente intraclastos lamosos e grânulos de quartzo na base dos *sets* e nos planos dos estratos. Tais corpos intercalam de forma gradual para ritmitos de arenitos maciços com arenitos com marcas onduladas simétricas e assimétricas.

Figura 40- Representação das litofácies de interdunas. A) Associação de litofácies SI(e) que se intercalam com lentes de lamitos com gretas de contração (FI) e drapes de lama. B) Litofácies SI(e) com laminações de marcas ondulas eólicas; C) Associação de litofácies SI(e) que se intercalam com lentes de lamitos laminados com gretas de contração (FI) e arenito maciço (Sm).



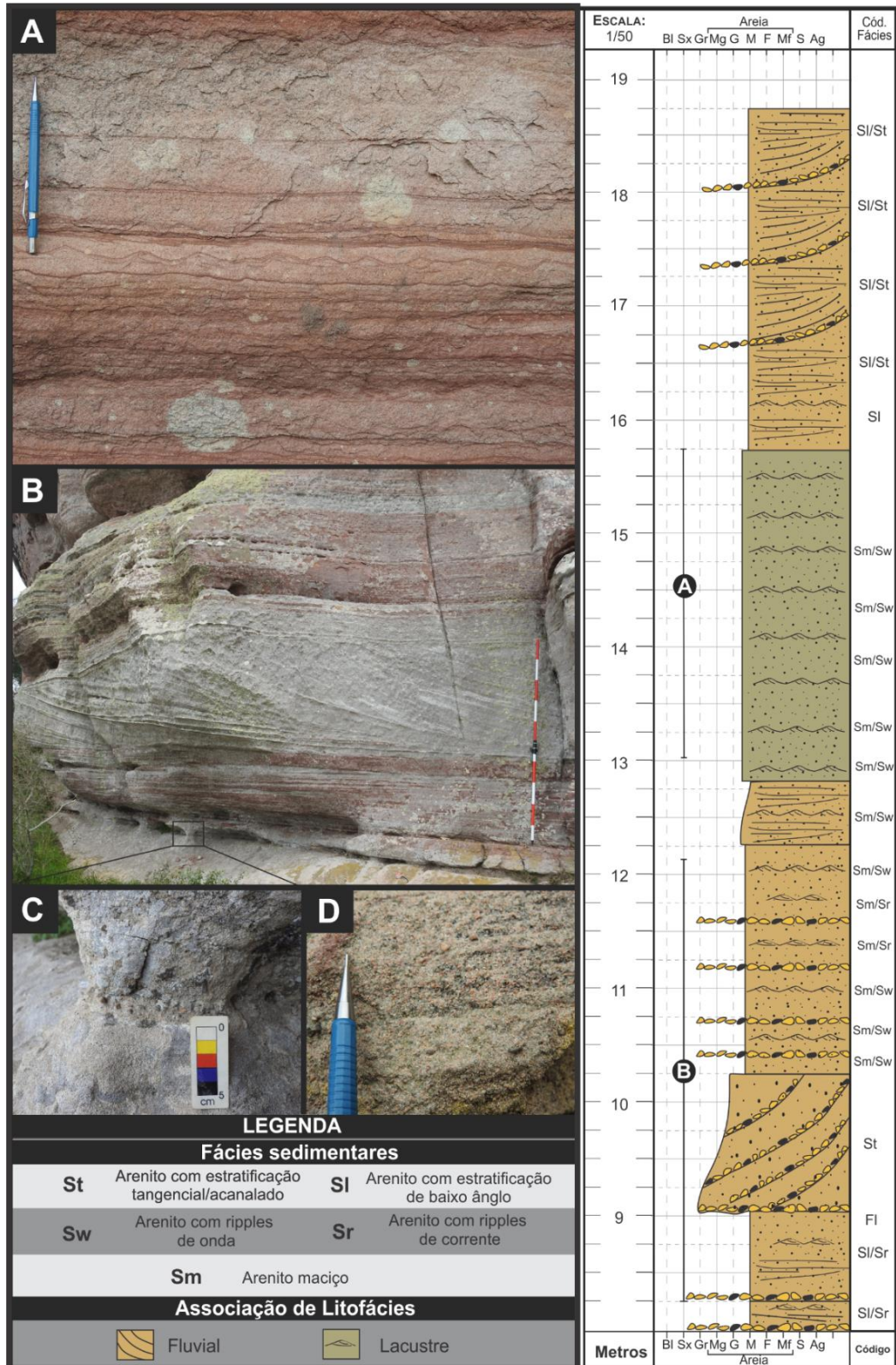
Fonte: Autora.

Interpretação: as características das litofácies desta associação sugerem deposição subaquosa. A presença de corpos arenosos tabulares de estratos cruzados tangenciais/acanalados e estratos cruzados de baixo ângulo sugerem a deposição por correntes fluviais efêmeras de alta energia (MIALL, 1996; NEMEC; POSTMA, 1993). Os arenitos maciços são depósitos de fluxos subaquosos hiperconcentrados de alta energia, resultado da rápida deposição durante eventos de inundação fluvial (MIALL, 1996). A presença de arenitos com laminação cruzada de marcas onduladas assimétricas indicam formas de leito geradas por correntes unidirecionais em condições de regime de fluxo inferior (MIALL, 1996). A frequente intercalação com arenitos maciços indicam fluxos cíclicos e de curta duração (TODD, 1996). A ocorrência de marcas onduladas simétricas indica a formação de corpos lacustres com a ação de ondas, formando depósitos sob em condições de fluxo oscilatório (MIALL, 1996). O desenvolvimento de lagos está ligado ao aumento do escoamento superficial de água gerando a subida do freático, associado assim aos estágios finais da inundação fluvial (PAIM; SCHERER, 2003). Os estratos cruzados e as marcas onduladas com direção para NW representam formas de leito migrando sob um regime de fluxo inferior com sentido de SES-NWN.

5.5 Levantamento digital de perfis colunares

Os Afloramentos Pedra Branca e Pedra da Pintada foram analisados via MVA's, servindo de base para a identificação das fotofácies, já que possuem alta resolução. No levantamento digital realizado no MVA-PP de alta resolução foi possível identificar quatro fotofácies diferentes (St(e), Sl(e), St, e Sl) que foram organizadas em três associações de fotofácies (Depósitos de dunas eólicas, depósitos de interdunas e depósitos fluviais; Figura 42) as quais foram devidamente descritas no item 5.7. No MVA-PB de alta resolução foram identificados quatro fotofácies (St(e), Sl(e), St e Sl) organizadas em quatro associação de fotofácies (Dunas eólicas, depósitos de interdunas, depósitos fluviais ; Figura 43), também descritas no item 5.7.

Figura 41 - Associação de litofácies flúvio-lacustre. A) Associação das litofácies Sm, Sw e Fl em ciclos de granocrescência e granodecrescência. Observa-se que um aumento da espessura da litofácia Sm próxima ao topo. B) Intercalação das litofácies Sl, Sr e St. C) Nível de seixos concentrados na base do pacote. D) Detalhe para a gradação normal encontrada nas litofácies Sl e St. Escala da foto tem

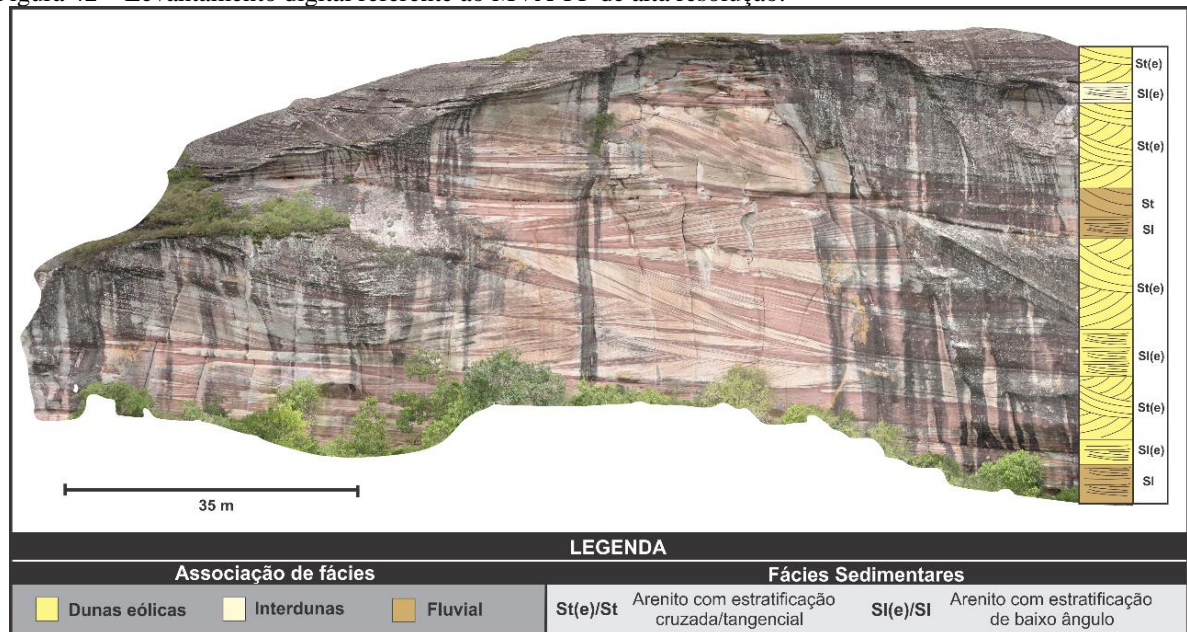


Fonte: Autora.

Os dados obtidos no levantamento digital foram semelhantes aos levantados no Perfil Pedra Pintada em campo, entretanto o nível de detalhamento das fotofácies é relativamente baixo em comparação com o levantamento de campo. A dificuldade se dá devido à resolução (GSD) dos modelos gerados, não sendo possível identificar estruturas de pequeno porte (*e.g.* *ripples*, camadas de estrutura maciça, gretas de contração, etc.), laminações e tamanho de grãos menores que seixo (> 5 mm), uma vez que o modelo de maior resolução é de 5.54 mm/*pixel*.

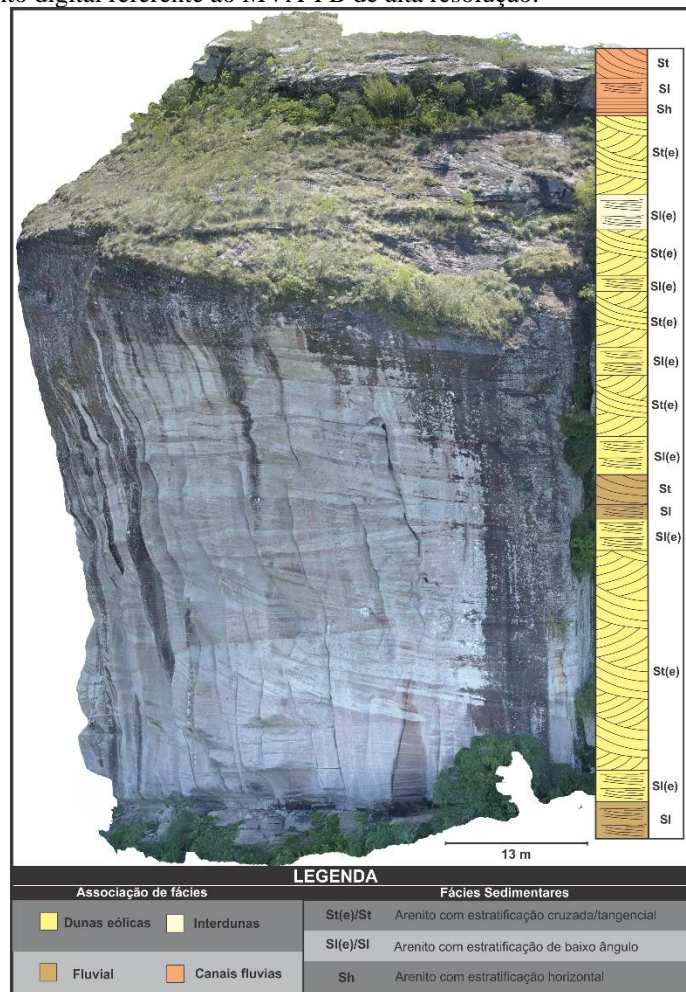
A identificação das fotofácies eólicas foi realizada com facilidade pois as estruturas são, em geral, de médio a grande porte e bem nítidas nos modelos. Já as fotofácies fluviais foram identificadas com uma certa dificuldade, pois não foi possível identificar feições diagnósticas, como presença de grânulos, intraclastos lamosos, *ripples*, etc. Para identificá-las foi necessário a utilização dos dados obtidos em trabalho de campo, bem como informações obtidas da literatura. Além disso, foi necessário dar ênfase em outros parâmetros além dos aspectos texturais da rocha, como pequenas “quebras” no relevo e tamanho das estruturas primárias.

Figura 42 – Levantamento digital referente ao MVA-PP de alta resolução.



Fonte: Autora.

Figura 43 - Levantamento digital referente ao MVA-PB de alta resolução.



Fonte: Autora.

5.6 Análise Fotofaciológica

A análise fotofaciológica permitiu o reconhecimento de seis fotofácies identificadas e delimitadas com base nas terminações de estratos, geometria externa e configuração interna (Quadro 6; Figura 44 e 45). Para auxiliar a identificação das fotofácies, também foram utilizados os dados de campos levantados no perfil colunar da Pedra Pintada. As superfícies eólicas de primeira e segunda ordem foram discriminadas no item 5.10.

Quadro 6 - Síntese de fotofácies definidas na área de estudo.

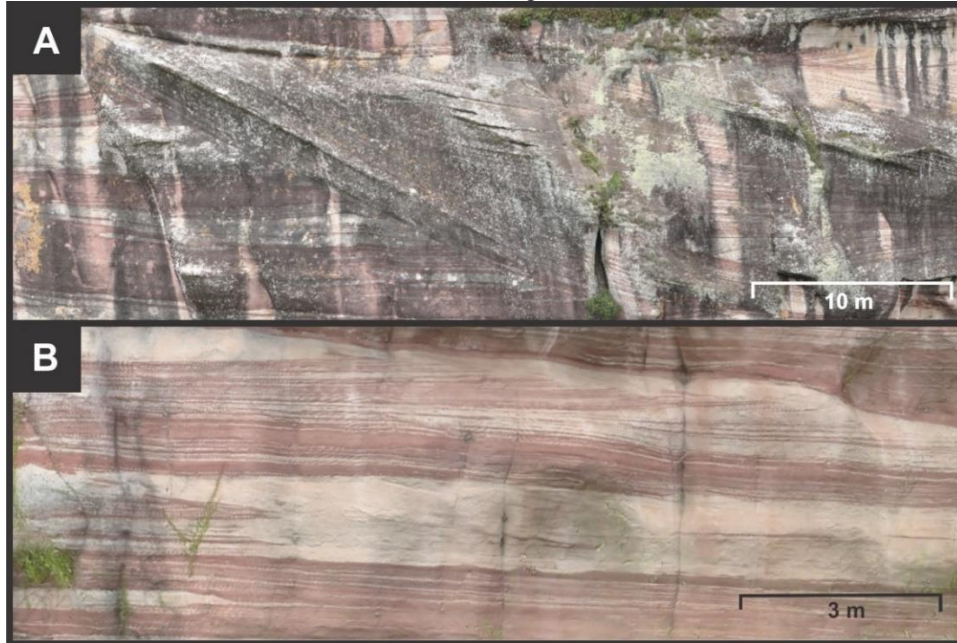
Fotofácies	Descrição	Interpretação
St(e)	Arenito com estratificação tangencial ou acanalado de grande a médio porte, de coloração <i>Yellowish Gray</i> (5Y 8/1); <i>Light Brown</i> (5YR 6/4); <i>Yellowish Gray</i> (5Y 7/2). Externamente apresenta geometria tabular de tamanho variando de 5 a 17	Migração e reativação de formas de

	<p>metros, delimitada por terminações inferiores em <i>dowlap</i> e por terminações superiores em <i>toplap</i>, que aumentam de espaçamento gradativamente para o topo. Internamente apresentam configuração marcada por sets de estratos cruzados acanalados ou tangenciais que por vezes se truncam.</p>	<p>leito de dunas eólicas com forma 3D. Ocorrem simultaneamente queda e fluxo de grãos.</p>
Sl(e)	<p>Arenito com estratificação de baixo ângulo, de coloração <i>Light Brown</i> (5YR 6/4); <i>Yellowish Gray</i> (5Y 8/1). Apresenta geometria externa em cunha de tamanho variando de 1 a 1,5 metros, delimitada por terminações inferiores em <i>dowlap</i> e por terminações superiores em <i>toplap</i>. Internamente apresentam configuração marcada por estratos cruzados de baixo ângulo (<15°) que se estendem por dezenas de metros.</p>	<p>Migração de marcas onduladas cavalgantes ou depósitos de interdunas.</p>
St	<p>Arenito com estratificação tangencial de médio à pequeno porte, de coloração <i>Yellowish Gray</i> (5Y 7/2); <i>Light Brown</i> (5YR 6/4); <i>Yellowish Gray</i> (5Y 8/1). Externamente apresenta geometria tabular a lenticular de tamanho variando de 5 a 8 metros, delimitada por terminações superiores em <i>toplap</i> e por terminações inferiores em <i>dowlap</i> que tangenciam o limite inferior. Internamente apresenta configuração marcada por sets de estratos cruzados tangenciais, com seixos ($\phi=6.8$ mm) dispresos na matriz arenosa.</p>	<p>Depósitos residuais de duna 3D.</p>
Sh	<p>Arenito com estratificação plano-paralela, de coloração <i>Light Brown</i> (5YR 6/4); <i>Yellowish Gray</i> (5Y 8/1). Apresenta geometria externa tabular de tamanho variando de 2 a 5 metros. Internamente apresenta configuração marcada por estratos horizontais que se estendem por dezenas de metros, apresentando estratos internos com padrão concordante.</p>	<p>Migração de lençóis de areia formados em um regime de fluxo superior.</p>
Sl	<p>Arenito com estratificação de baixo ângulo, de coloração <i>Light Brown</i> (5YR 6/4); <i>Yellowish Gray</i> (5Y 8/1). Apresenta geometria externa em cunha a tabular de tamanho variando de 2 a 4 metros, delimitada por terminações em <i>toplap</i> no topo da camada e inferiores em <i>dowlap</i>. Internamente apresenta configuração marcada por estratos cruzados de baixo ângulo (<15°), com seixos ($\phi=6.8$ mm) dispresos na matriz arenosa.</p>	<p>Formas de leito planos, gerados por correntes unidirecionais entre regime de fluxo transicional ou Migração de lençóis de areia formados em um regime de fluxo superior.</p>
Sm	<p>Arenito maciço, de coloração <i>Light Brown</i> (5YR 6/4) e/ou <i>Yellowish Gray</i> (5Y 8/1). Apresenta geometria externa tabular com aproximadamente 1 metro de espessura, delimitada através do contato com os fotohorizonte identificados nas fotofácies localizadas acima e abaixo. Internamente apresenta laminações</p>	<p>Deposição de fluxos hiperconcentrados.</p>

indistintas, podendo ser um falso maciço, devido a resolução dos modelos.

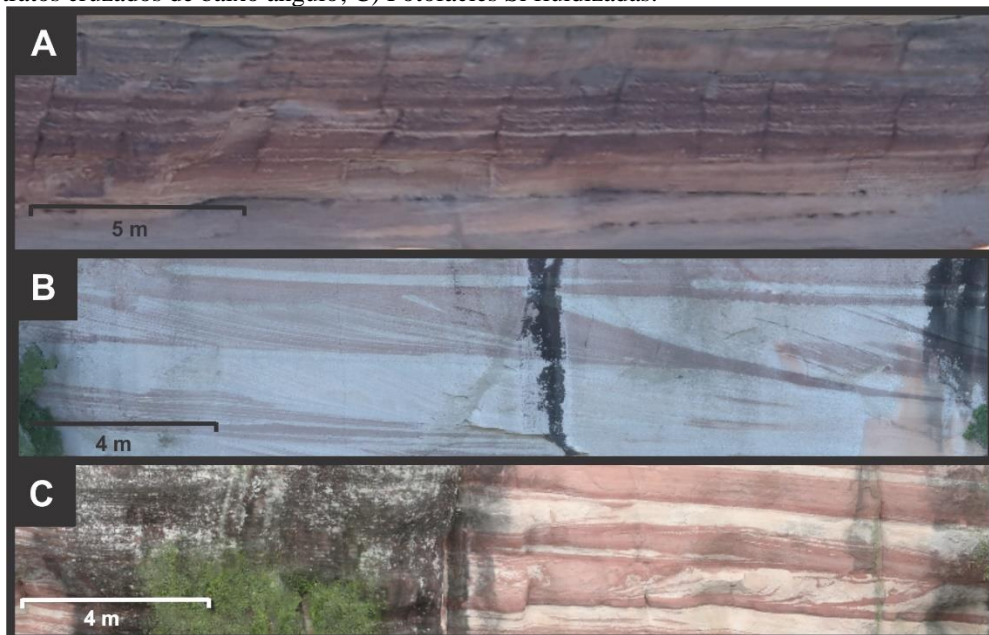
Fonte: Autora.

Figura 44 - Fotofácies do sistema eólico. A) Fotofácies St(e) com estratos cruzados acanalados eólicos de grande porte; B) Fotofácies Sl(e) com estratos cruzados de baixo ângulo.



Fonte: Autora.

Figura 45 - Fotofácies referente aos depósitos fluviais. A) Fotofácies Sl com estratos cruzados de baixo ângulo, Sh com estratificação plano-paralela e Sm; B) Fotofácies St com estratos cruzados tangenciais de médio porte e Sl com estratos cruzados de baixo ângulo; C) Fotofácies Sl fluidizadas.



Fonte: Autora.

5.7 Associação de fotofácies

Com base nas fotofácies identificadas nos modelos virtuais de afloramento foram identificadas três associações de fotofácies: dunas eólicas, interdunas, fluvial e canais fluviais. A definição e interpretação das mesmas foram realizadas com base na definição de fotofácies aliadas aos dados de campo levantados.

5.7.1 Depósitos de dunas eólicas

Descrição: esta associação de fotofácies é composta por arenitos de coloração variando de *Yellowish Gray* (5Y 8/1), *Light Brown* (5YR 6/4) e *Yellowish Gray* (5Y 7/2), compreendendo pacotes tabulares dispostos em *sets* de estratos cruzados tangenciais ou acanalados de grande a médio porte (St(e)) que se intercalam na base com estratificações cruzadas de baixo ângulo (Sl(e)), formando pacotes de até 17 m de espessura.

Os *sets* de estratos cruzados tangenciais/acanalados se interdigitam na base com estratos de baixo ângulo. Internamente, os *sets* cruzados tangenciais/acanalados apresentam superfícies côncavas que truncam os estratos em baixo ângulo sobrejacentes e mergulham no mesmo sentido destes.

Interpretação: Os estratos cruzados tangenciais ou acanalados de médio a grande porte, contituídos pela fotofácies St(e) são formadas pela migração e reativação de formas de leito de dunas eólicas com forma 3D, ocorrendo simultaneamente queda e fluxo de grãos. Portanto, são interpretadas como depósitos residuais de dunas eólicas (HUNTER, 1977 ; KOCUREK; DOTT, 1981). A fotofácies Sl(e) são interpretados como estratos basais de duna eólica, formadas pela migração de estratos transladante cavalgantes. As superfícies que truncam em baixo ângulo os estratos cruzados são consideradas superfícies de reativação (superfícies de 3ª ordem; KOCUREK, 1996). Estas superfícies são formadas pela erosão seguida de uma nova deposição devido a variações da direção do fluxo.

5.7.2 Depósitos de interdunas

Descrição: esta associação de fotofácies é composta por arenitos de coloração variando de *Light Brown* (5YR 6/4) a *Yellowish Gray* (5Y 8/1), compreendendo pacotes tabulares dispostos em *sets* de estratos cruzados de baixo ângulo (Sl(e)) que se estendem por dezenas de metros, compreendendo pacotes de 3 metros de espessura.

Interpretação: Os estratos cruzados de baixo ângulo produto da migração de marcas onduladas transladantes representando depósitos de interdunas eólicas (HERRIES, 1993; MOUNTNEY, 2006; DIAS; SCHERER, 2008).

5.7.3 Depósitos fluviais

Descrição: esta associação de fotofácies é composta por arenitos de coloração variando de *Yellowish Gray* (5Y 7/2); *Light Brown* (5YR 6/4) e *Yellowish Gray* (5Y 8/1). Compreende pacotes tabulares dispostos em *sets* de estratos cruzados tangenciais de médio a pequeno porte (St), intercalados a pacotes de estratos cruzados de baixo ângulo e maciços, possuindo uma espessura média de 5 metros de espessura.

Interpretação: a ocorrência destas fotofácies permite interpretar essas fácies como depósitos gerados por formas de leito subaquosas. Estratos cruzados tangenciais indicam dunas tridimensionais de crista sinuosa migrando sob regime de fluxo inferior (MIALL, 1978). Os estratos cruzados de baixo ângulo são depósitos gerados por correntes unidirecionais em condições transicional entre regime de fluxo inferior e superior (MIALL, 1996). Os arenitos maciços com grânulos correspondem a depósitos de fluxos hiperconcentrados (MIALL, 1996).

5.7.3.1 Canais fluviais

Descrição: esta associação é composta esta associação de fotofácies é composta por arenitos de coloração variando de *Yellowish Gray* (5Y 7/2); *Light Brown* (5YR 6/4) e *Yellowish Gray* (5Y 8/1). É composta por estratos cruzados de baixo ângulo (Sl) intercalados a estratos plano-paralelos (Sh, na proção basal da camada) sotopostas por estratos cruzados tangenciais. Esta associação é localizada na porção superior dos MVA's (exceto no MVA-PP), possui contato erosivo basal com os depósitos eólicos, marcando uma superfície planar erosiva levemente ondulada de abrangência regional.

Interpretação: as características desta associação sugerem depósitos subaquáticos. Os arenitos com estratificação plano-paralelos/baixo ângulo são interpretados como migração de lençóis de areia formados em um regime de fluxo superior (MIALL, 1996). A ocorrência de arenitos com estratos cruzados tangenciais permite interpretar depósitos gerados por formas de leito subaquosa, indicam dunas tridimensionais de crista sinuosa migrando sob regime de fluxo inferior (MIALL, 1978). A superfície erosiva ondulada que separa os depósitos eólicos dos

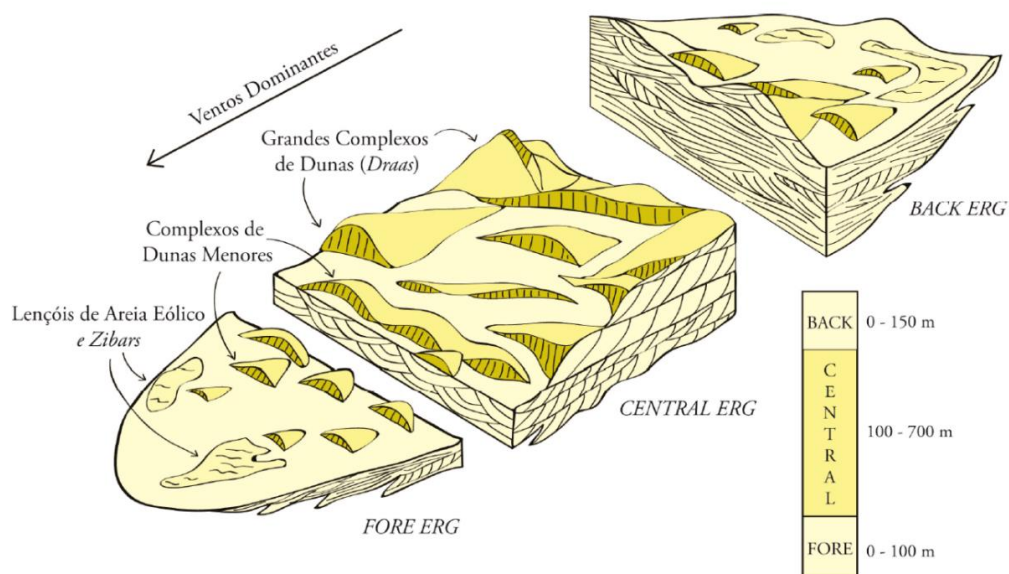
depósitos desta associação foi interpretada como uma supersuperfície, marcando o final da acumulação eólica na bacia (PAIM; SCHERER, 2007).

5.8 Sistema Depositional

O conjunto das associações de fácies permite interpretar a Fm. Pedra Pintada como um sistema desértico, caracterizado pelo domínio de depósitos eólicos sobre depósitos fluviais. Trabalhos como de Langford e Chan (1993) e Porter (1986) têm mostrado que os *ergs* são constituídos por arranjos espaciais de formas de leito eólicas distintas da margem para o centro do *erg*, devido a variações espaciais em aspectos sedimentológicos e morfológicos das formas de leito presentes nos *ergs*, permitindo individualizar estes em diferentes zonas de acúmulo de sedimentos eólicos e não eólicos.

Segundo Porter (1986), os *ergs* podem ser divididos em *fore*, *central* e *back-erg* (Figura 46) apresentando domínio de diferentes associações de fácies em cada região. No centro do *erg* ocorre o domínio de sedimentação eólica ininterrupta e prolongada, desenvolvendo dunas compostas ou complexas (*draas*), enquanto nas margens do *erg* (*fore* e *back-erg*) ocorrem interações fluviais e marinhas, em que esses processos geralmente erodem e retrabalham os depósitos eólicos (LANGFORD, 1989).

Figura 46 - Modelo conceitual de migração de um sistema eólico.



Fonte: Extraído e modificado de Porter (1986).

A região de *fore erg* constitui uma das margens do *erg*, formada predominantemente por depósitos de pequenas dunas, interdunas e lençóis de areia intercalados com depósitos, marinhos, fluviais ou vulcânicos. A região de *central erg* é caracterizada por pacotes de arenitos com estratificações cruzadas de grande porte, formadas pelo cavalgamento e migração de dunas eólicas. A região de *back erg* em geral são pouco preservadas em relação às outras regiões, devido ao retrabalhamento dos depósitos eólicos por ação de ambientes marginais e sua erosão. Se preservados, os depósitos desta região apresentam similaridades em relação à região do *fore erg*, formados por corpos de areia isolados em depósitos fluviais ou marinhos. A natureza dos contatos entre as unidades eólicas com os depósitos fluviais indica que os mesmos representam episódios de acumulação distintos, ao invés da migração lateral de ambientes que coexistem. Tal fato fica evidenciado pelas supersuperfícies nos contatos entre essas unidades, resultantes de processos alocíclicos.

Sendo assim, a partir do empilhamento vertical de fácies e associações de litofácies interpretadas, a Fm. Pedra Pintada representa depósitos localizados na região de *central erg*, caracterizada por acúmulos espessos em grande escala de arenitos eólicos com estratificação cruzada acanalada/tangencial, produto da migração de dunas compostas e com intervalos fluviais que marcam o final da deposição eólica destes ergs.

5.9 Arquitetura Estratigráfica

O conjunto das associações de fácies permite interpretar a Fm. Pedra Pintada como um sistema desértico, subdividido em três unidades eólicas (I, II e III), cada uma separada por supersuperfícies (KOCUREK, 1988; KOCUREK *et al.* 1991; Figura 47), de acordo com Paim e Scherer (2003). As unidades eólicas formam pacotes tabulares com espessura média total de 63 metros, formadas pelas associações de fácies de dunas eólicas e interdunas eólicas secas e úmidas. As unidades aqui caracterizadas se diferem do trabalho de Paim e Scherer (2003) nas espessuras destas e pela caracterização das superfícies de deriva de areia.

A Unidade I, localizada na base da seção estratigráfica, forma pacotes eólicos tabulares com espessura média de 7 metros. É composta apenas pela associação de fácies de dunas eólicas cavalgantes, caracterizando-a como um sistema eólico seco, limitada na base pelas rochas básicas da Suíte Intrusiva Rodeio Velho (discordância por não conformidade) e no topo por uma Supersuperfície (KOCUREK, 1988), marcando o final da acumulação eólica, sugerindo que tais superfícies representam uma supersuperfície de inundação (LANGFORD; CHAN,

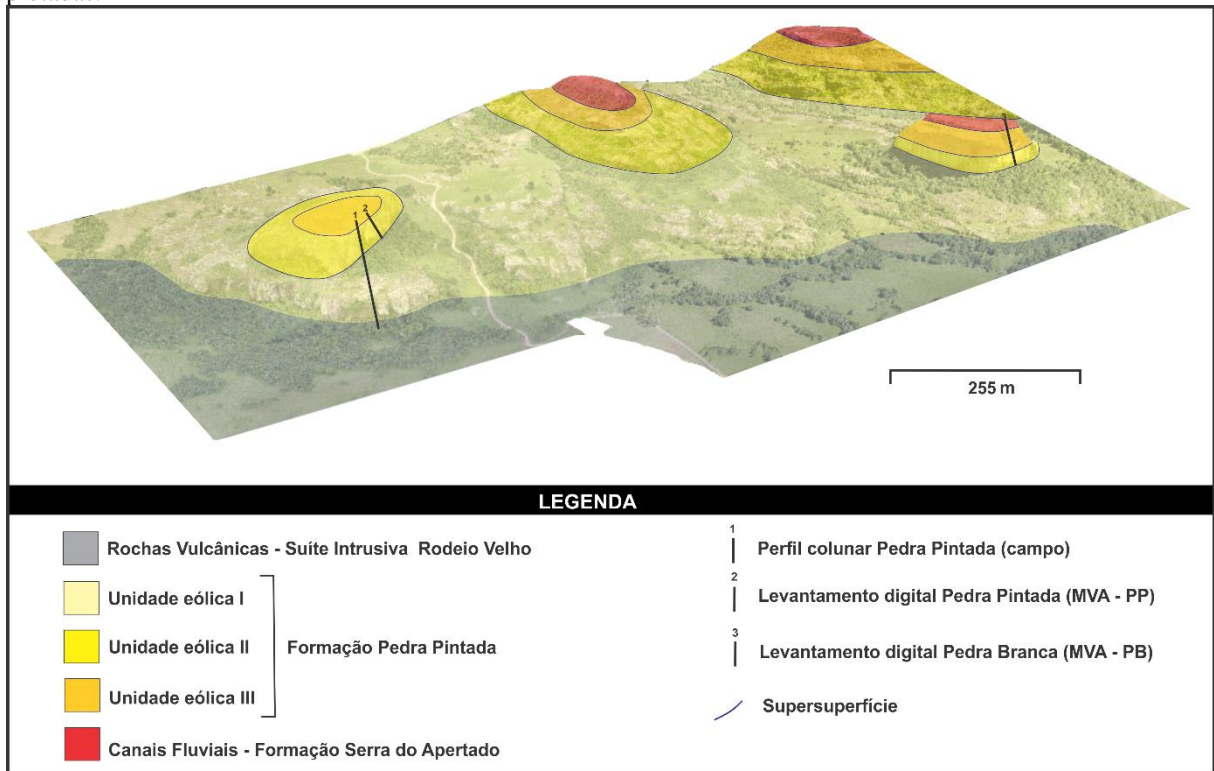
1988), uma vez que esta unidade eólica é recoberta por depósitos flúvio-lacustres os quais se encontram com contato abrupto com esta unidade.

Sobreposto a esta unidade encontra-se a primeira unidade flúvio-lacustre, a qual subdivide as unidade eólica I e II. Possui uma geometria plana a levemente ondulada com espessura aproximada de 11 metros.

A unidade eólica II forma pacotes tabulares com espessura média de 12 metros. É composta pela associações de fácies de dunas eólicas de dunas eólicas cavalgantes, caracterizando-a como um sistema eólico seco. O contato basal desta unidade com os depósitos flúvio-lacustres é interpretada como uma superfície de deriva de areia (CLEMMENSEN; TIRSGAARD, 1990), formada devido a passagem de depósitos flúvio-lacustres para depósitos eólicos. O contato superior desta unidade é interpretada como uma superfície de inundação (LANGFORD; CHAN, 1988), marcando o final da deposição eólica da Unidade II. Sobreposto a Unidade eólica II está a segunda Unidade flúvio-lacustre, a qual subdivide as Unidades eólicas II e III. Esta unidade possui uma geometria plana a levemente ondulada com espessura aproximada de 4 metros e com contato abrupto com os depósitos eólicos da Unidade II.

A Unidade eólica III, unidade eólica de topo, forma pacotes eólicos tabulares com espessura média de 45 metros, compreende as associações de fácies de dunas eólicas e interdunas úmidas, caracterizando-se assim um sistema eólico úmido. Esta unidade é limitada na base por uma superfície de deriva de areia, e no topo uma supersuperfície (KOCUREK; HAVHOLM, 1993). Os depósitos que recobrem esta última unidade correspondem a depósitos de canais fluviais, caracterizadas por pacotes tabulares a lenticulares com espessura média aproximada de 10 metros. O contato basal de tal unidade com os depósitos da Unidade eólica III é caracterizado por uma supersuperfície com geometria plana a levemente ondulada, marcando o final da deposição eólica na bacia (PAIM; SCHERER, 2003). Paim e Scherer (2007) interpretam esta supersuperfície com sendo de natureza mista, associada a deflação eólica e fluvial, devido sua natureza planar e evidências de estabilização/cimentação das areias eólicas próximo ao freático.

Figura 47 – MVA da área toda interpretado com a delimitação das principais unidades estratigráficas encontradas na área de estudo. Vista em perspectiva da área de estudo com as seções levantadas em campo e digitalmente plotadas.



Fonte: Autora.

5.10 Superfícies eólicas

O reconhecimento e interpretação das superfícies eólicas foi realizada no ortofotomosaico do MVA-PP de alta resolução. No ortofotomosaico foi observado estratos cruzados compostos, os quais apresentam superfícies limítrofes eólicas que truncam os estratos cruzados. Assim focou-se na diferenciação entre as duas ordens de superfícies eólicas: superfícies de 1º de ordem e superfícies de 2º ordem (Figura 48).

Notou-se a partir da comparação com os dados de Paim e Scherer (2003) que 32 superfícies tiveram outra interpretação a partir deste método. 14 superfícies interpretadas antes como de 1ª ordem apresentam mergulho na mesma direção dos estratos cruzados, caracterizando então superfícies de 2ª ordem. 18 superfícies interpretadas como de 2ª ordem apresentaram mergulho em direção contrária ao mergulho dos estratos, caracterizando então superfícies de 1ª ordem.

5.10.1 Superfícies de 1º ordem

São superfícies que apresentam-se regularmente espaçadas, de geometria planar, com mergulho suave no sentido oposto ao mergulho dos *foresets*. Os estratos cruzados que recobrem esta superfície são concordantes ou apresentam um contato basal de baixo ângulo em *downlap* em relação à mesma. Estas superfícies que limitam os estratos cruzados tangenciais/acanalados foram interpretadas como superfícies de 1° ordem (BROOKFIELD, 1977) ou de interdunas (KOCUREK, 1996), geradas pela migração de interdunas sobre dunas eólicas (BROOKFIELD, 1977).

5.10.2 Superfície de 2° ordem

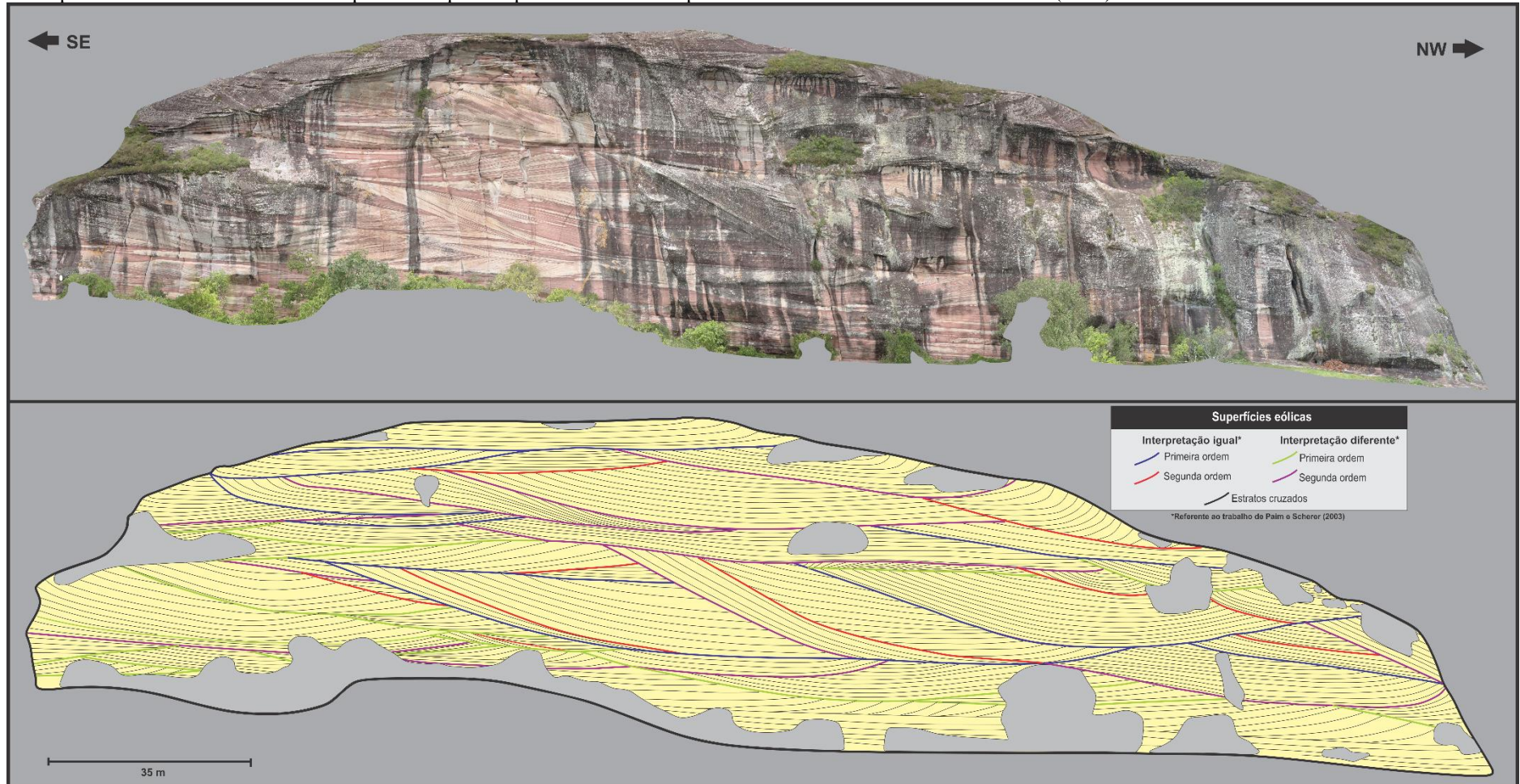
Estas superfícies possuem um ângulo de direção de mergulho no mesmo sentido ou oblíquo em relação aos estratos cruzados adjacentes. Os estratos cruzados que recobrem estas superfícies possuem um contato basal em *downlap* de alto a médio ângulo em relação aos estratos cruzados subjacentes. Estas superfícies foram classificadas como superfícies de 2° ordem (BROOKFIELD, 1977) ou de superposição (KOCUREK, 1996), formadas pela migração de dunas menores superpostas às faces frontais de dunas maiores e *draas* (BROOKFIELD, 1977).

5.11 Hierarquia de heterogeneidades

Heterogeneidades correspondem a variações espaciais, texturais e mineralógicas nas rochas de um reservatório e influenciam no comportamento do fluxo de fluídos em rochas reservatórios, tendo impacto direto na recuperação de hidrocarbonetos (TAGGART; HAMPSON; JACKON, 2010). Tais variações são produtos de uma gama de processos sedimentares que atuam em diferentes escalas, baseada em dois princípios básicos: (i) a escala natural dos processos sedimentares e (ii) a distribuição espacial das propriedades petrofísicas, o que determinará se estas variações ocorrem ou não em uma escala interpoços em um campo produtor (GARCIA *et al.*, 2003).

Existem diferentes propostas de hierarquia de heterogeneidade de reservatórios, dependendo das características específicas de cada estudo de caso. Garcia *et al.* (2003) definiram cinco escalas conceituais associadas às heterogeneidades de depósitos sedimentares: microscópicas, mesoscópica, macroscópicas, megascópica e gigascópicas. Escala microscópicas corresponde a quantificação e identificação da porosidade e permeabilidade.

Figura 48 - Ortofotomosaico do MVA-PP de alta resolução. Seção lateral orientada transversalmente ao sentido do mergulho dos foresets, evidenciando a geometria dos sets e das superfícies limitrodes eólicas. As superfícies aqui interpretadas foram comparadas com o trabalho de Paim e Scherer (2003).



Fonte: Autora.

Esta caracterização atinge apenas intervalos específicos de camadas, reconhecendo continuidades e descontinuidades verticais e laterais das litofácies, e definição de modelos diagenéticos, cujos atributos de permoporosidades são definidos através de análise petrológicas e petrofísicas. Escala macroscópica a mesoscópica: relaciona-se a escala do campo de petróleo ou regiões entre poços. As heterogeneidades são definidas a partir de da arquitetura estratigráfica, elementos arquiteturais, faciologia, variações regionais da distribuição das fácies e dos *trends* de permeabilidade Para melhor caracterizar essas heterogeneidades desta escala são necessários estudos paleogeográficos, paleoambientais e análise de proveniência. Escala gigascópica a megascópica: corresponde a escala de bacia, envolvendo tectônica da bacia e estratigrafia de sequências, controladas pelo arcabouço estratigráfico e estrutural da bacia (GARCIA *et al.*, 2003).

Pensando nas heterogeneidades de corpos sedimentares, Weber e Geuns (1990) propuseram três tipos básicos de reservatórios baseados em suas geometrias: reservatórios em bolo de camadas (*layer cake reservoirs*), reservatórios em quebra-cabeças (*jigsaw-puzzle reservoirs*) e reservatórios em labirintos (*labyrinth reservoirs*). Reservatórios em bolo de camadas consistem em extensos pacotes de arenitos tabulares caracterizados por heterogeneidades internas pouco significativas, sem grandes descontuidades e poucas alterações na permeabilidades horizontal e com mudanças graduais na permeabilidade vertical (WEBER, GEUNS 1990). Reservatórios em quebra-cabeças são compostos por uma série de corpos arenosos dispostos em camadas apertadas, podendo ocorrer corpos impermeáveis entre as camadas, apresentando variações internas nas heterogeneidades e podendo ocorrer grandes variações de permo-porosidades (WEBER, GEUNS 1990). Reservatórios tipo labirintos compreendem arranjos complexos e descontínuos de lentes de areias, que apresentam grandes variações em suas propriedades petrofísicas (WEBER, GEUNS 1990).

Arenitos eólicos correspondem a importantes reservatórios de hidrocarbonetos em diferentes bacias sedimentares (TAGGART; HAMPSON; JACKON, 2010). Antigamente, reservatórios eólicos eram considerados simples, compostos por corpos homogêneos e isotrópicos (NURMI, 1985). Entretanto, estudos recentes apontam que as sucessões eólicas podem apresentar mudanças laterais e verticais rápidas com geometrias, dimensões e distribuições espaciais variáveis (TAGGART; HAMPSON; JACKON, 2010).

Sucessões eólicas desenvolvidas em margens de *ergs* apresentam frequentemente depósitos não eólicos associados (fluvial e marinho), caracterizando-se como um reservatório com uma distribuição mais heterogênea de porosidade e permeabilidade, resultante de uma arquitetura de fácies mais complexa (PORTER, 1986). Já os depósitos eólicos de centro de *ergs*

são constituídos essencialmente por arenitos bem selecionados, com grãos bem arredondados, dispostos em sets sobrepostos de estratos cruzados de dunas eólicas, formando reservatórios homogêneos, com uma geometria de bolo de camadas (*layer cake reservoirs*), sem heterogeneidades internas significativas (WEBER, GUENS, 1990).

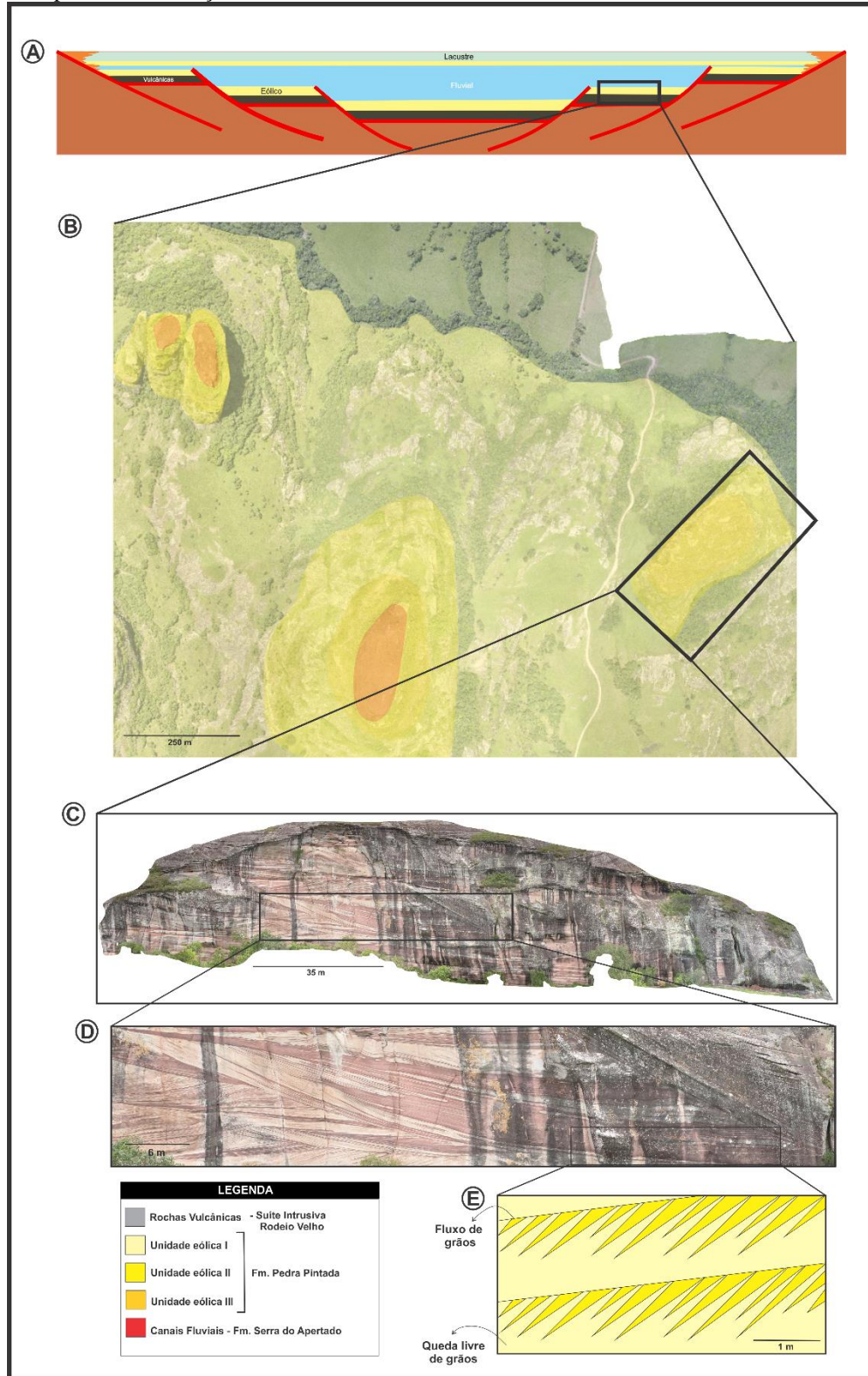
Na sucessão eólica da Fm. Pedra Pintada pode-se identificar quatro hierarquias de distintas de heterogeneidades (gigascópica, megascópicas, macroscópicas e mesoscópicas; Figura 49), analisados a partir dos dados de campo e através dos MVA's, visando contribuir com um modelo conceitual para reservatório análogo. Tais heterogeneidades serão destacadas a seguir, entretando cabe salientar que para ambas análises foram desconsideradas heterogeneidades microscópicas, ou seja, não foram analisados heterogeneidades diagenéticas (permo-porosidade).

5.11.1 Escala gigascópica

A primeira escala de ordem de heterogeneidades corresponde a escala gigascópica, refere-se ao contato basal entre as sucessões eólicas da Fm. Pedra Pintada com as rochas vulcânicas básicas da Suíte intrusiva Rodeio Velho e à justaposição vertical do depósitos eólicos da Fm. Pedra Pintada com os depósitos aluviais da Fm. Serra do Apertado (Figura 49 A). O contato basal entre as unidades da Fm. Pedra Pintada e Suíte Intrusiva Rodeio Velho é abrupto, sem evidência de interação de sedimentos eólicos com as rochas vulcânicas (*e.g.* peperitos). Essas rochas, em grande escala, podem servir como uma possível barreiras. O contato superior entre a Fm. Pedra Pintada e a Fm. Serra do Apertado é abupto, marcada por uma superfície planar erosiva, sem evidência de interdigitação entre estas unidades. Esta sobreposição ocorre em escala regional e aflorante em quase toda área da região da Serra do Apertado. As rochas da Fm. Serra do Apertado, em termos deposicionais, não serviriam como barreiras visto que são compostas predominantemente por conglomerados de matriz arenosa.

Para a identificação das heterogeneidades de hierarquia gigascópica foi utilizados tando os dados de campo como os modelos virtuais. Entretanto, apenas nos MVA's pode-se indentificar os depósitos aluviais sobrepostos aos depósitos eólicos da Fm. Pedra Pintada.

Figura 49 - Modelo representando as diferentes escalas de heterogeneidades presentes na sucessão estudada, caracterizando um modelo análogo de reservatório flúvio-eólico do tipo *layer cake*. A) Heterogeneidades gigascópicas em escala de bacia; B) Heterogeneidades megascópicas caracterizadas pelas variações entre as associações de fácies encontradas na área de estudo; C e D) Heterogeneidades macroscópicas compreendendo as superfícies que delimitam os estratos cruzados eólicos. E) Heterogeneidades mesoscópicas caracterizadas pelas fácies que compõem as associações de fácies.



Fonte: Autora.

5.11.2 Escala megascópica

A segunda escala de heterogeneidades compreende a escala megascópica, determinada pelas variações entre as associações de fácies (dunas eólicas, depósitos de interdunas e flúvio-lacustre) que compõem a Fm. Pedra Pintada, conforme as diferentes propriedades petrofísicas existentes entre essas associações (Figura 49 B). Estas unidades que a compõem possuem geometria tabular, o que facilita qualquer abordagem relativa a extração e exploração. Algumas destas associações são limitadas por superfícies importantes que podem ter grande influência nas heterogeneidades, uma vez que essas sobrepõem fácies com diferentes permeabilidades em escala regional, podendo gerar grande impacto em relação ao fluxo-fluido, principalmente se as litologias de baixo ou de cima da superfície limítrofe atuar como barreiras.

As principais heterogeneidades presentes compreendem as associações de fácies fluvio-lacustres, as quais marcam o fim da acumulação eólica. Esta associação de fácies marca o afogamento da associação de fácies de dunas eólicas, gerando uma superfície basal de escala regional, podendo assim consistir em uma potencial barreira para o fluxo-fluido em escala regional. Entretanto, a composição dominante destas associações de fácies é arenosa, texturalmente similar a associação de fácies de dunas eólicas e interdunas. Assim, não apresentariam grandes barreiras, exceto em situações interpoços. As superfícies de interduna que separam os depósitos de dunas eólicas, apresentam pelitos com laminações corrugadas e pelitos laminados, o que dificulta o fluxo-fluido vertical. Contudo, os depósitos de interdunas apresentam uma pequena continuidade lateral podendo representar potenciais barreiras apenas em escala interpoço. Vale salientar que mesmo na ausência de contraste litológico, as superfícies limítrofes possuem capacidade de confinar o fluxo de fluido penecontemporâneo podendo atuar como barreiras à expulsão de fluidos (CHANDLER *et al.*, 1989).

A identificação das heterogeneidades megascópicas foi realizada em dados de campo e nos MVA's. Entretanto, devido a resolução dos modelos, não foi possível chegar ao nível de detalhamento que os dados de campo forneceram. Nos MVA's foram identificadas as superfícies basais às associações de fácies flúvio-eólicas (supersuperfícies eólicas) correlacionável em todos os MVA's e evidenciando seu alcance regional na área de estudo. No que tange às associações de fácies de interdunas, não foi possível identificar os níveis pelíticos como foi identificado nos dados de campo, porém a limitada continuidade lateral desta associação só foi possível identificar nos MVA's. Apesar dos MVA's não permitirem identificar os tamanhos de grãos menores que cinco milímetros foi possível observar que os corpos destas associações de fácies são predominantemente arenosas devido a textura das fotos.

Assim, apesar do baixo nível de detalhamento dos MVA's (em relação aos dados de campo), foi possível identificar e caracterizar as heterogeneidades megascópicas, uma vez que estes corpos não apresentam grandes variações texturais em relação as associações.

5.11.3 Escala macroscópica

A terceira escala de heterogeneidades corresponde a escala macroscópica vinculadas as superfícies que delimitam os estratos cruzados referente a associação de fácies de dunas eólicas e os estratos horizontais referente a associação de fácies de interdunas (Figura 49 C e D). Cada superfície possui uma inclinação diferente, essas inclinações podem influenciar no fluxo-fluido devido ao comportamento do fluido contido em estratos com inclinações distintas. O comportamento destes fluidos serão diferentes para camadas com estratos com inclinação diferente devido ao efeito da gravidade sobre os mesmos. Portanto, torna-se fundamental a incorporação do sentido de mergulho dos estratos cruzados eólicos aos modelos estáticos de reservatórios, para que seja feita uma correta simulação dos fluxos de fluidos dentro de reservatórios eólicos (CHANDLER *et al.*, 1989). Esta variação pode influenciar apenas em estágios mais avançados de recuperação (PAIM; SCHERER, 2003).

Esta hierarquia de heterogeneidades foi identificada tanto nos MVA's quanto nos dados de campo, sem muitas dificuldades. Em dados de campo, não foi possível ver a continuidade lateral destas superfícies e nem realizar a medida de todas para classificá-las, diferentemente dos modelos onde foi possível medi-las, quantificá-las e classificá-las bem como observar suas geometrias e continuidades laterais em toda área de estudo.

5.11.4 Escala mesoscópica

A quarta escala de heterogeneidade compreende a mesoscópica associadas as fácies que compõem as associações de fácies (Figura 49 E). Estas fácies possuem variações litológicas e petrofísicas, embora em pequena escala, que podem influenciar na distribuição da permeabilidade. A presença de pelitos com laminações corrugadas e pelitos laminados dentro dos depósitos de interdunas pode causar uma redução significativa da permeabilidade vertical. A ocorrência de níveis de intraclastos e drapes de lama associados aos arenitos maciços por vezes com laminações de baixo ângulo dos depósitos flúvio-lacustres também reduz a permeabilidade vertical de reservatórios. Em contrapartida, a presença de *lags* de seixos

concentrados nas bases de corpos arenosos podem aumentar significativamente a permeabilidade dos reservatórios.

Internamente aos estratos cruzados de dunas eólicas, os tipos de estratificações e seus aspectos texturais tem um grande impacto na permeabilidade, incluindo suas capacidades para conduzir fluidos (CHANDLER *et al.*, 1989). Os estratos cruzados de dunas eólicas são constituídos basicamente por laminações de queda livre de grãos, fluxo de grãos e marcas onduladas eólicas (HUNTER, 1977). Os depósitos de fluxos de grãos internamente possuem empacotamento mais frouxo, exibindo assim valores de permeabilidade mais altas (em todas as direções) em comparação com depósitos de marcas onduladas eólicas. Os depósitos de marcas onduladas eólicas são compostas por lâminas de baixa permeabilidade conferindo um caminho preferencial ao fluxo-fluido, diferentemente dos depósitos de fluxo de grãos, que não possuem zonas de baixa permeabilidade fazendo com que não haja canalização do fluxo nestes depósitos. Como depósitos de fluxo de grãos são concentrados nos topos dos estratos cruzados e os depósitos de marcas onduladas eólicas são concentradas na base, ocorre assim uma variação vertical da permeabilidade (da base para o topo) influenciando diretamente no fluxo-fluido dentro dos reservatórios.

A Fm. Pedra Pintada apresenta um estilo de estratificação em que os fluxos de grãos se alternam com pacotes de marcas onduladas eólicas. Depósitos com este tipo de organização possuem valores de permeabilidades baseados na razão entre depósitos de fluxo de grãos e marcas onduladas eólicas dentro dos estratos cruzados. Em reservatórios compostos por tipos de estratificações com uma ordem de magnitude diferente na permeabilidade justapostos, ocorre desigualdade na permeabilidade horizontal (maior) e perpendicular (menor) a estratificação (CHANDLER *et al.*, 1989).

Esta hierarquia de heterogeneidades foi identificada apenas através dos dados de campo. Para o seu reconhecimento e caracterização, é necessário ter um alto nível de detalhamento das fácies que compõem as associações. Para a identificação das fácies em campo foi necessário observar a granulometria, composição e estruturas sedimentares da rocha bem como observar como se dá a intercalação das fácies. Este nível de detalhamento foi possível chegar com os modelos virtuais. A metodologia para a identificação de fotofácies em MVA's é baseada apenas nas terminações de estratos, geometria externa e configuração interna.

5.12 Modelo Análogo de Reservatório

O método utilizado para a construção dos modelo de reservatório análogo permitiu a construção de volumes geocelulares representando depósitos flúvio-eólicos recobertos por depósitos aluviais. As geocelulas foram geradas a partir da interpretação dos MVA's Pedra Pintada (PP) e Pedra Branca (PB) ambos de média resolução. As geocelulas foram criadas com base nas associações de fácies com foco central nos depósitos da Fm. Pedra Pintada.

No MVA PP foram reconhecidos três unidades eólicas (Unidade I, II e III) e duas unidade flúvio-lacustres pertencentes a Fm. Pedra Pintada. No MVA PB foi reconhecido duas unidades eólicas (Unidade II e III) e duas unidade flúvio-lacustres pertencentes a Fm. Pedra Pintada e a unidade correspondente aos depósitos aluviais pertencentes a Fm. Serra do Apertado.

Os volumes geocelulares gerados representam zonas de possível alta e baixa permeabilidade, conforme as heterogeneidades internas identificadas. A qualidade dos reservatórios é determinada principalmente pela conectividade, espessura, lateralidade, porosidade e permeabilidade dos corpos rochosos, apresentou relação direta com as heterogeneidades.

Os intervalos correspondentes aos depósitos flúvio-lacustres apresentam geometria tabular com espessura média de 5 metros, com média a alta conectividade e lentes pontuais de materiais impermeáveis (níveis de pelitos). A presença dos níveis pelíticos podem causar pequenos desvios no sentido do fluxo, entretanto estes níveis pelíticos possuem espessuras milimétricas com pouca continuidade lateral não caracterizando-os como selantes, uma vez que estes corpos são compostos basicamente de corpos arenosos.

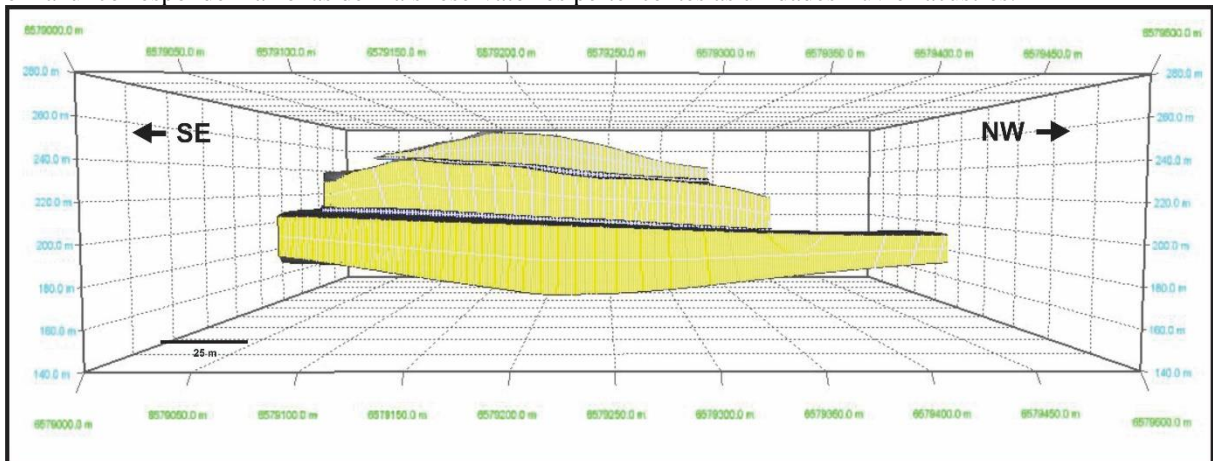
Os intervalos que compreendem os depósitos eólicos apresentam geometria tabular, com alta continuidade lateral e espessura média de 30 metros, composto predominantemente de corpos arenosos, considerados então como bons reservatórios. Embora internamente aos depósitos eólicos as heterogeneidades de mesoescala possam ter impacto sobre os fluxos de fluidos, estes apenas influenciariam em estágios muito avançados de recuperação. Nos depósitos de interdunas ocorrem níveis milimétricos de pelíticos podendo causar uma redução significativa da permeabilidade vertical, entretanto também só influenciariam nos estágios finais de recuperação.

No geral os depósitos que compõem a área de estudo apresentam heterogeneidades internas pouco significativas (em escala gigascópicas, megascópicas, e macroscópicas) em termos de impacto de fluxo-fluidos, não apresentando grandes barreiras para o fluxo. Em termos

de mesoescala, as heterogeneidades contidas nas fácies causam mudanças mínimas na permeabilidade, visto que texturalmente não apresentam grandes discrepâncias e, se tratando basicamente de corpos arenosos, não possuem grande influência no fluxo-fluido.

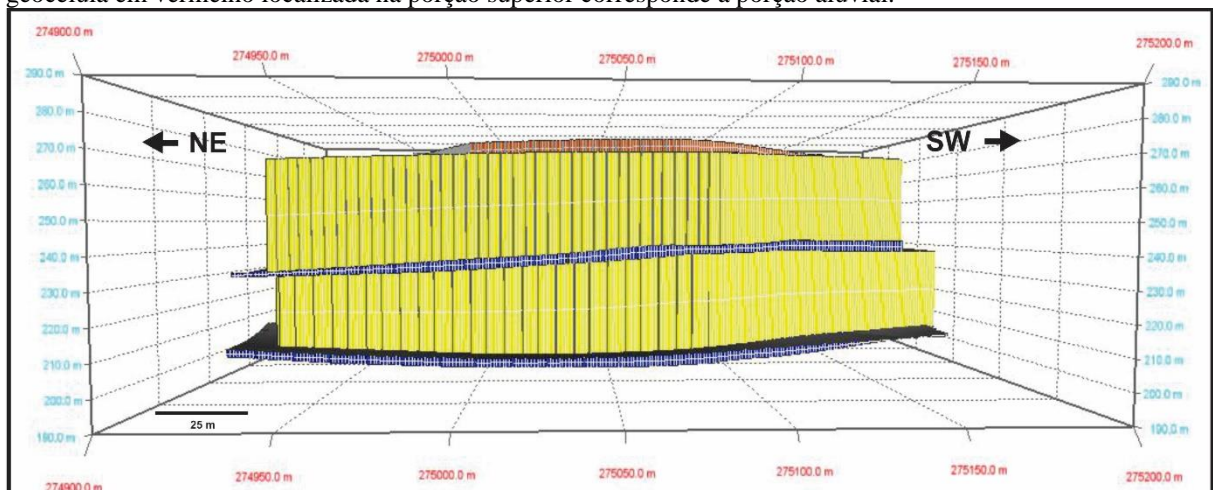
Como análogo de reservatório flúvio-eólico, a Fm. Pedra Pintada se encaixa no tipo *layer cake* (WEBER; GEUNS, 1990). Estes tipos de reservatórios consistem em extensos pacotes de arenitos tabulares caracterizados por heterogeneidades internas pouco significativas, sem grandes descontuidades e poucas alterações na permeabilidades horizontal e com mudanças graduais na permeabilidade vertical.

Figura 50 - Modelo geocelular gerado a partir do MVA-PP de média resolução. Os volumes geocelulares em amarelo correspondem a zonas de bons reservatórios pertencentes as unidades eólicas. Os volumes geocelulares em azul correspondem a zonas de mal reservatórios pertencentes as unidades flúvio-lacustres.



Fonte: Autora.

Figura 51 - Modelo geocelular gerado a partir do MVA-PB de média resolução. Os volumes geocelulares em amarelo correspondem a zonas de bons reservatórios correspondentes as unidades eólicas. Os volumes geocelulares em azul correspondem a zonas de mal reservatórios correspondentes as unidades flúvio-lacustres. A geocélula em vermelho localizada na porção superior corresponde a porção aluvial.



Fonte: Autora.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 inadequada, uma vez que os depósitos analisados são caracterizados predominantemente por corpos arenosos, não sendo possível identificar tamanho de grão. Entretanto, a combinação dos dados levantados em campo com os modelos se mostrou muito eficiente, onde os dados de campo supriram todas as necessidades deixadas pelos modelos.

A identificação das heterogeneidades através dos MVA's se mostrou satisfatória, podendo reconhecer heterogeneidades desde a escala gigascópicas até a escala macroscópica. Entretanto, devido a resoluções dos MVA's, não foi possível a identificação das heterogeneidades mesoscópicas, sendo essas reconhecidas através dos dados de campo. Foram identificados no total três zonas consideradas bons reservatórios, ambas correspondentes as unidades eólicas, nos quais foram gerados modelos geocelulares com a geometria destes corpos e discutidas conforme as heterogeneidades reconhecidas.

Como análogo de reservatório, a Formação Pedra Pintada é caracterizada pela falta de barreiras, a ausência de selantes seria o seu maior problema, embora possui zonas consideradas ótimos reservatórios. As heterogeneidades identificadas, no geral, são pouco significativas em termos de impacto no fluxo-fluidos e são de fácil previsibilidade e modelagem.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de mais levantamentos de perfis colunares na área para integrá-los aos modelos virtuais de afloramento, fazer aquisição de dados de gamaespectrometria e realizar a quantificação e identificação de dados de permeabilidade da área de estudo a fim de realizar a caracterização das heterogeneidades microscópicas. Uma contribuição seria realizar aquisições de GPR na área entre os morros, a fim de imagear a extensão destes corpos. Outra sugestão seria realizar novas aquisições de fotografia aéreas visando gerar modelos com resoluções mais altas.

REFERÊNCIAS

AGISOFT METASHAPE PROFESSIONAL, 2019.

AHLBRANDT, T. S.; FRYBERGER, S. D. Sedimentary features and significance of interdunes deposits. In: ETHRIDGE, F.G.; FLORES, R.M. (Eds.), Recent and ancient nonmarine Depositional Environments. **Society of Economic Paleontologists and Mineralogists.**, v.31, p. 293-314, 1981.

ALLEN, J. R. L. Reaction, relaxation, and lag in natural sedimentary systems: principles, examples and lessons. **Earth Science Reviews**, v.10, p. 263-342, 1974.

ALMEIDA, R. P. **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, 2005.

ALMEIDA, R. P.; JANIKIAN, L.; FRAGOSO-CESAR, A. R. S.; MARCONATO, A. Evolution of a rift basin dominated by subaerial deposits: The Guaritas Rift, Early Cambrian, Southern Brazil. **Sedimentary Geology**. v. 217, p. 30-51, 2009.

ALMEIDA, R. P.; SANTOS, M. G. M.; FRAGOSO-CESAR, A. R. S.; JANIKIAN, L.; FAMBRINI, G. Recurring extensional and strike-slip tectonics after the Neoproterozoic collisional events in the southern Mantiqueira province. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 84 (2), p. 347–376, 2012.

BROOKFIELD, M. E. The origin of bounding surfaces in ancient aeolian sandstones. **Sedimentology**, v. 24, p. 303-332, 1977.

BORBA, A. W.; MIZUSAKI, A.M.P.; Santa Bárbara formation (Caçapava do Sul, southern Brazil): depositional sequences and evolution of an Early Paleozoic post-collisional basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 16, p. 365-380, 2003.

BORBA, A. W.; MIZUSAKI, A. M. P.; SANTOS, J. O. S.; MCNAUGHTON, N. J.; ONOE, A. T.; HARTMANN, L. A. U-Pb zircon and ⁴⁰Ar-³⁹Ar K-feldspar dating of synsedimentary volcanism of the Neoproterozoic Maricá Formation: constraining the age of foreland basin inception and inversion in the Camaquã Basin of southern Brazil. **Basin Research**, p. 359-375, 2008.

CARRIVICK, J. L.; SMITH, M. W.; QUINCEY, D. J. Structure from Motion in the Geosciences. **New Analytical Methods in Earth and Environmental Science**. Wiley Blackwell, Sussex, p. 197, 2016.

CATUNEANU, O. Principles of Sequence Stratigraphy. **Elsevier**, Amsterdam, p. 375, 2006.

CAWOOD, A.; BOND, C. E.; HOWELL, J. A.; BUTLER, R. W. H.; TOTAKE, Y. LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models. **Journal of Structural Geology**, v. 98, p. 67-82, 2017.

CHANDLER, M. A.; KOCUREK, G.; GOGGIN, D. J.; LAKE, L. W. Effects of Stratigraphic Heterogeneity on Permeability in Eolian Sandstone Sequence, Page Sandstone, Northern Arizona. **The American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 73, n. 5, p. 658-668, 1989.

CHEMALE JR., F. Evolução geológica do Escudo Sul-Rio-Grandense. In: HOLZ M.; DE ROS L.F. (Eds), **Geologia do Rio Grande do Sul**. Centro de Investigação do Gondwana, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 13-52, 2000.

CHEMALE JR., F.; SILVA, L. C.; HARTMANN, L. A. Stratigraphy and Tectonism of Precambrian to Early Paleozoic Units. **XVIII Acta Geologica Leopoldensia**, v.42, p. 5-117, 1995.

CLEMMENSEN, L. C.; TIRSGAARD, H. Sand-drift surfaces: a neglected type of bounding surface. **Geology**, v. 18, p. 1142-1145, 1990.

DIAS, K. D. N.; SCHERER, C. M. S. Cross-bedding set thickness and stratigraphic architecture of aeolian systems: An example from the Upper Permian Pirambóia Formation (Paraná Basin), southern Brazil. **Journal of South American Earth Science**, v.25, p. 405-415, 2008.

FAMBRINI, G. **O Grupo Santa Bárbara (Neoproterozoico III) da Bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FAMBRINI, G.L., ALMEIDA, R. P., FRAGOSO-CÉSAR, A. R. S. Estratigrafia e evolução paleogeográfica do Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na Sub-Bacia Camaquã ocidental, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, Anais, p. 550-564, 2006.

FERRARI, F. VERONEZ, M. R., TOGNOLLI, F. M. W., INOCÊNCIO, F. C., PAIM, P. S. G., SILVA, R. M. Visualização e interpretação de modelos digitais de afloramentos utilizando Laser Scanner terrestre. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 79-91, 2012.

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.

FRYBERGER, S. G.; SCHENK, C. Wind sedimentation tunnel experiments on the origins of eolian strata. **Sedimentology**, v.8, p. 805-821, 1981.

GARCIA, A. J. V.; PAIM, P. S. G.; LOPES, R. C.; FACCINI, U. F.; LAVINA, E. L. C. Caracterização de reservatórios: uma análise integrada. In: PAIM, P. S. G.; FACCINI, U. F.; NETTO, R. G. (Eds.), **Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares - Estudo de Casos**, São Leopoldo, p. 15-37, 2003.

GIANNINI, P. C. F.; ASSINE, M. L.; SAWAKUCHI, A. O. Ambientes eólicos. In: PEDREIRA, A. J.; ARAGÃO, M. A. N. F.; MAGALHÃES, A. J. (Org.), **Ambientes de Sedimentação Siliciclástica do Brasil**, Beca-Ball, São Paulo, p. 72-101, 2006.

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.

HAMPSON, G. J.; HOWELL, J. A. Sedimentologic and geomorphic characterization of ancient wave-dominated deltaic shorelines; Upper Cretaceous Blanckhawk Formation, Book Cliffs, Utah, USA. In: GIOSAN, L.; BHATTACHARYA, J. P. (Org.) **Rivers Deltas – Concepts, Models and Examples**. **Society for Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication**, v. 83, p.133-154, 2005.

HARTMANN, L. A; CHEMALE JR., F.; PHILIPP, R. P. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: IANNUZZI, R.; FRANTZ, J. C. (Eds.), **50 anos de Geologia**: Instituto de Geociências. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, p. 97-124, 2007.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.) **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).

HERRIES, R. D. Contrasting styles of fluvial–eolian interaction at a downwind erg margin: Jurassic Kayenta–Navajo Transition, Northeastern Arizona, USA. In: NORTH, C.P.; PROSSER, D.J. (Eds.), Characterization of Fluvial and Eolian Reservoir. **Geology Society London, Special Publication**, v. 73, p. 199–218, 1993.

HODGETTS, D. Laser scanning and digital outcrop geology in the petroleum industry: a review. **Marine and Petroleum Geology**, v. 46, p. 335-354. 2013.

HODGIN, J. E.; HARREL, D. R. The selection, application, and misapplication of reservoir analogs for the estimation of petroleum reserves. In: Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition, 2006, San Antonio. **Paper**. San Antonio: Society of Petroleum Engineers. p. 1-15, 2006.

HUNTER, R. E. Basic types of stratification in small eolian dunes. **Sedimentology**. v. 24, p.361–387, 1977.

_____. Stratification styles in eolian sandstones: some Pennsylvanian to Jurassic examples from western interior U.S.A. In: Ethridge, F.G., Flores, R.M. (Eds.), Recent and Ancient Nonmarine Depositional Environments: Models for Exploration. **SEPM Special Publication**, v. 31, p. 315–329, 1981.

KOCUREK, G. Significance of interdune deposits and bounding surfaces in aeolian dune sands. **Sedimentology**, v. 28, p. 753-80, 1981.

_____. First-order and super bounding surfaces in eolian sequences – bounding surfaces revisited. **Sedimentary Geology**, v. 56, p. 193-206, 1988.

_____. Interpretation of ancient eolian sand dunes. *Annu. Rev. Earth Planet. Sei.*, v.19, p.43-75, 1990.

_____. Desert aeolian systems. In: READING, H. G. (Org), **Sedimentary Environments: Process, Facies and Stratigraphy**. 3^a ed., p. 125-153, 1996.

_____. The aeolian rock record (Yes, Virginia, it exists, but it really is rather special to create one). In: GOUDIE, A.; LIVINGSTONE, I. (Org), **Aeolian Environments, Sediments and Landforms**, John Wiley, London, p. 239-259, 1999.

KOCUREK, G., DOTT, R. H. J. Distinctions and uses of stratification types in the interpretation of eolian sands. *J. Sedimentary Petrology*. v.51, n. 2, p. 579–595, 1981.

KOCUREK, G.; HAVHOLM, K. G. Eolian sequence stratigraphy - a conceptual framework. In: WEIMER, P.; POSAMENTIER, H. (Org.), Siliciclastic sequence stratigraphy: recent developments and applications. **Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special publication**, v. 52, p.393-409, 1993.

KOCUREK, G.; HAVHOLM, K. G. Eolian sequence stratigraphy - a conceptual framework. In: WEIMER, P.; POSAMENTIER, H. (Org), Siliciclastic Sequence Stratigraphy. **American Association of Petroleum Geologists Memoir**, v. 58, p. 393-409, 1994.

KOCUREK, G.; KNIGHT, J.; HAVHOLM, K. G. Outcrop and semi-regional three-dimensional architecture and reconstruction of a portion of the eolian Page Sandstone (Jurassic). In: MIALL, A. D.; TYLER, N. (Eds.), The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and implications for hydrocarbon discovery and recovery. **SEMP**, Concepts in Sedimentology and Paleontology, v.3, p. 25-43, 1991.

KOCUREK, G.; LANCASTER, N. Aeolian system sediment state: theory and Mojave Desert Kelso dune field example. **Sedimentology**, v. 46, p. 505-515, 1999.

KOCUREK, G.; NIELSON, J. Conditions favourable for the formation of warm-climate aeolian sand sheet. **Sedimentology**, v. 33, p. 795-816, 1986.

LANGFORD, R. P.; CHAN, M. A. Flood surfaces and deflation surfaces within the Cutler Formation and Cedar Mesa Sandstone (Permian), Southern Utah. **Geological Society of America Bulletin.**, v. 100, p. 1541–1549, 1988.

LANGFORD, R. P.; CHAN, M. A. Downwind changes within an ancient dune sea. Permian Cedar Mesa Sandstone, southeast Utah. In: PYE, K.; LANCASTER, N. (Eds), Aeolian Sediments, Ancient and Modern. **The International Association of Sedimentologists Special Publication**, p. 109-126, 1993.

LANCASTER, N. The development of large eolian bedforms. **Sedimentary Geology**, v.56, p. 69-89, 1988.

LANCASTER, N; TELLER, J.T. Interdune deposits the Namib Sand Sea. **Sedimentary Geology.**, v. 51, p. 91-108, 1988.

MATTÉ, V.; SOMMER, C.; LIMA, E. F.; PHILIPP, R. P.; BASEI, M. A. S. Post-collisional Ediacaran volcanism in oriental Ramada Plateau, southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences.** v. 71, p. 201-222, 2016.

MCKEE, E. D. Introduction to a study of global sand sea. In: MCKEE, E.D. (Eds.), A study of global sand seas U.S. **Geological Survey Professional Paper**, v. 1052, p.1-21, 1979.

MIALL, A. D. Lithofacies types and vertical profile models in braidedriver deposits: a summary. In: MIALL, A. D. (Eds.) *Fluvial Sedimentology*. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, v. 5, p. 597- 604, 1978.

MIALL, A. D. The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, Basin Analysis and Petroleum Geology. **Springer-Verlag**, Germany, 1996.

MITCHUM, R. M., VAIL, P. R., SANGREE, J. B. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: PAYTON, C.E. (Eds.), *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration*. **American Association of Petroleum Geologists Memoir**, v. 26, p. 205-212, 1977.

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

MOUNTNEY, N. P. Periodic accumulation and destruction of aeolian erg sequences in the Permian Cedar Mesa Sandstone, White Canyon, southern Utah, USA. **Sedimentology**, v.53, p.789–823, 2006.

MOUNTNEY, N.; HOWELL, J. Aeolian Architecture, bedform climbing and preservation space in the Cretaceous Etjo Formation, NW Namibia. **Sedimentology**, v.47, p. 825-849, 2000.

MOUNTNEY, N. P., THOMPSON, D. B. Stratigraphic evolution and preservation of eolian dune and damp/wet interdune strata: an example from Triassic Helsby Sandstone Formation, Cheshire Basin, UK. **Sedimentology**, v. 49, p. 805–834, 2002.

MUNSELL, **Geological Rock-Color Chart**, 2009.

NEMEC, W.; POSTMA, G. Quaternary alluvial fans in the southwestern Crete: Sedimentation processes and geomorphic evolution. In: MARZO, M.; PUIGDEFÁBREGAS, C. (Eds.), *Alluvial Sedimentation*. **International Association of Sedimentologists Special Publication**, v. 17, p. 235-276, 1993.

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, 2011.

NURMI, R. D. Eolian Sandstone Reservoirs: Bedding facies and production geology modeling. **Society of Petroleum Engineers**, SPE Paper 14172, 1985.

OLIVEIRA, C. H. E.; CHEMALE JR., F.; JELINEK, A. J.; BICCA, M. M.; PHILIPP, R. P. U-Pb and Lu-Hf isotopes applied to the evolution of the late to post-orogenic transtensional basins of the Dom Feliciano belt Brazil. **Precambrian Research**, v. 246, p. 240-25, 2014.

PAIM, P. S. G.; CHEMALE JR., F.; CUNHA, R. 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, 2000.

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

PAIM, P. S. G., LOPES, R. C., CHEMALE JR, F. Aloestratigrafia, sistemas deposicionais e evolução paleogeográfica da Bacia do Camaquã - Vendiano Superior/Ordoviciano Inferior do RS. In: 6º SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA/1º ENCONTRO DE GEOLOGIA DO CONE SUL, p. 39–50, 1995.

PAIM, P. S. G., SCHERER, C. M. S. Arquitetura estratigráfica de sucessões flúvio-eólicas: o exemplo do Alogrupo Guaritas na região da Pedra Pintada, Rio Grande do Sul, Brasil. In: PAIM, P. S. G.; FACCINI, U. F.; NETTO, R. G. (Eds) **Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares - Estudo de Casos**, São Leopoldo, p. 38-58, 2003.

PAIM, P. S. G., SCHERER, C. M. S. High-resolution stratigraphy and depositional model of wind- and water-laid deposits in the ordovician Guaritas rift (Southernmost Brazil). **Sedimentary Geology**, v. 202, p. 776-795, 2007.

PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M. M.; CHEMALE JR., F. Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, p. 83-104, 2016.

PORTER, M. L. Sedimentary record of erg migration. **Geology**, v. 14, p. 497-500, 1986.

PRINGLE, J. K.; HOWELL, J. A.; HODGETTS, D.; WESTERMAN, A. R.; HODGSON, D. M. Virtual outcrop models of petroleum reservoir analogues: a review of the current state-of-the-art. **First Break**, v. 24, n. 3, p. 33-42, 2006.

RICCOMINI, C.; SANTÁNNA, L. G.; TASSINARI, C. C. G. Pré-sal: geologia e exploração. **Revista USP**, São Paulo, n.95, p.33-42, 2012.

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.

RODRÍGUEZ-LÓPEZ, J. P., MELÉNDEZ, N., DE BOER, P. L., SORIA, A. R. Controls on marine-erg margin cycle variability: aeolian-marine interaction in the mid-Cretaceous Iberian Desert System, Spain. **Sedimentology**, v. 59, p. 466-501, 2012.

RODRÍGUEZ-LÓPEZ, J. P.; CLEMMENSEN, L. B.; LANCASTER, N.; MOUNTNEY, N. P; VEIGA, G. D. Archean to Recent aeolian sand systems and their sedimentary record: Current understanding and future prospects. **Sedimentology**, v. 61, p. 1487-1534, 2014.

SCHERER, C. M. S. Sedimentologia e Estratigrafia de Sistemas Fluviais e Eólicos. **Apostila do curso de Pós-Graduação em Geociências da UFRGS**, p. 56-124, 2004.

SGAVETTI, M. Photostratigraphy of ancient turbidite systems. In: WEIMER, P.; LINK, M.H. Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems (Eds.). **Springer**, p. 107-126, 1991.

SIDLE, R. E; LEE, W. J. An Update on the Use of Reservoir Analogous for the Estimation of the Oil and Gas Reserves. In: Society of Petroleum Engineers Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, Dallas. Paper. **Society of Petroleum Engineers**, p. 1-9, 2010.

SOUZA, E. G **Arquitetura de fácies e evolução estratigráfica dos depósitos eólicos da Formação Mangabeira, Supergrupo Espinhaço – BA**. Trabalho de conclusão de curso, Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

STOKES, S. L. Multiple parallel-truncation bedding planes - a feature of wind-deposited sandstone formations. **Journal Sedimentary Petrology**, v. 38, p. 510–515, 1968.

TARGGART, S.; HAMPSON, G. J.; JACKSON, M. D. High-resolution stratigraphic architecture and lithological heterogeneity within marginal aeolian reservoir analogues. **Sedimentology**, v. 57, p. 1246-1279, 2010.

TAVANI, S.; CORRADETTI, A.; BILLI, A. 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, 2016.

TAVANI, S.; GRANADO, P.; CORRADETTI, A.; GIRUNDO, M.; IANNACE, A.; ARBUÉS, P.; MUÑOZ, J. A.; MAZZOLI, S. Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). **Computer & Geosciences**, v. 63, p. 44-53, 2014.

TODD, S.P. Process deduction from fluvial sedimentary structures. In: CARLING, P.A., DAWSON, M.R. (Eds.). **Advances in Fluvial Dynamics and Stratigraphy**. Chichester: Wiley, p. 299–350, 1996.

TUCKER, M.E. **Rochas sedimentares:guia geológico de campo**; tradução: Rualdo Menegat. – 4° Eds. – Porto Alegre: Bookman, 2014.

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

WALKER, R. G. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: WALKER, R. G.; JAMES, N. P. (Eds.) **Facies Models: Response to sea level change**. Geological Association of Canadá, Canadá, 1992.

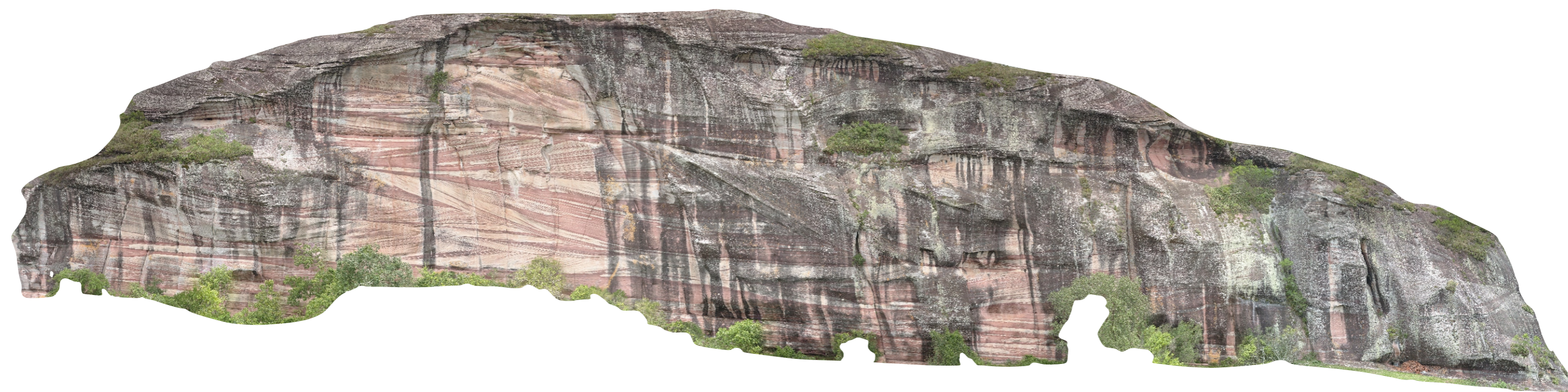
WEBBER, K. J.; VAN GEUNS, L. C. Framework for Constructing Clastic Reservoir Simulation Models. **Journal of Petroleum Technology**, v. 42, p. 12-48, 1990

WILSON, I. G. Desert sandflow basins and model for the development of ergs. *Geographic Journal*, v. 137, p. 180-189, 1971.

_____. Aeolian Bedforms - Their Development and Origins. **Sedimentology**, v. 19, p. 173-210, 1972.

_____. Ergs. **Sedimentary Geology**, v.10, p.77-106, 1973.

APENDICE I - MVA Pedra Pintada de alta resolução



35 m

APENDICE II - MVA Pedra Branca de alta resolução



APÉNDICE III - Perfil colunar Pedra Pintada

