UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

RAFAEL MARCHEZAM ADRIANO

ANATOMIAS DE CICLOS DE ALTA FREQUÊNCIA: EXEMPLOS DA FORMAÇÃO RIO BONITO EM SANTA CATARINA

Porto Alegre – Rio Grande do Sul
2018

RAFAEL MARCHEZAM ADRIANO

ANATOMIAS DE CICLOS DE ALTA FREQUÊNCIA: EXEMPLOS DA FORMAÇÃO RIO BONITO EM SANTA CATARINA

Monografia apresentada a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Claiton Marlon dos Santos Scherer
Supervisor: Ezequiel Galvão de Souza

Porto Alegre – Rio Grande do Sul
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Adriano, Rafael Marchezam

Anatomias de ciclos de alta frequência: exemplos da Formação Rio Bonito em Santa Catarina. / Rafael Marchezam Adriano. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2018.

[75 f.] ils.

Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2018.

Orientadora: Claiton Marlon dos Santos Scherer

1. Estratigrafia de sequências. 2. Alta resolução. 3. Bacia do Paraná. 4. Formação Rio Bonito. I. Título.

CDU 551.7

Catalogação na Publicação
Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS
Renata Cristina Grun CRB 10/1113

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS - Brasil
CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.
Fone: +55 51 3308-6569
E-mail: bibgeo@ufrgs.br

RAFAEL MARCHEZAM ADRIANO

ANATOMIAS DE CICLOS DE ALTA FREQUÊNCIA: EXEMPLOS DA FORMAÇÃO RIO BONITO EM SANTA CATARINA

Monografia apresentada a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Claiton Marlon dos Santos Scherer
Supervisor: Ezequiel Galvão de Souza

BANCA EXAMINADORA

_____
Dr. Anderson J. Maraschin

_____
Dr. Georgios Pantopoulos

_____
Dra. Renata Alvarenga Kuchle

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências e a Petrobras pelo apoio e ensino durante a minha trajetória acadêmica.

Agradecimentos especiais a meus pais, Jacqueline Marchezam Wech Adriano e Renato Wech Adriano, que sempre prestaram apoio incondicional a todas as minhas empreitadas e são as pessoas que sempre pude contar. Agradeço também ao Professor Claiton pela orientação e amizade. Ao Zaza e o grupo de pesquisa da estratigrafia pela supervisão e amizade. Aos “geobrothers” Camila, Erik, Fernando, Joana, Luan, Luis Felipe, Manu e Natália pela amizade que ficará para a vida.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram para este ciclo.

“The greatest enemy of knowledge is not ignorance;

it is the illusion of knowledge.”

Stephen Hawking

RESUMO

A Formação Rio Bonito é bastante estudada no que diz respeito a sistemas deposicionais e estratigrafia de sequências. Porém, esta Formação ainda carece de estudos de estratigrafia de sequências de alta resolução, especialmente em afloramentos. Este trabalho começa com uma análise de fácies, associação de fácies e sistema deposicional de afloramentos e um testemunho de sondagem de depósitos parálicos e marinho raso da Formação Rio Bonito, pertencente ao Eoperminano da Bacia do Paraná na região das cidades de Ituporanga, Alfredo Wagner e Vidal Ramos no Estado de Santa Catarina. Utilizando estas informações sedimentológicas dos afloramentos e as premissas da estratigrafia de sequências, este trabalho traz um exemplo de utilização da estratigrafia de sequências de alta resolução através da identificação, descrição e interpretação de padrões de empilhamento, superfícies estratigráficas e tratos de sistemas para então definir e entender as anatomias dos ciclos de alta frequência contidos dos depósitos estudados, que podem ser R, T e TR. A partir disto, as anatomias dos ciclos foram identificadas, interpretadas e separadas em 3 tipos de ciclos R, que possuem um padrão de empilhamento predominantemente progradacional, e ciclos TR, que possuem um padrão de empilhamento simétrico retrogradacional e progradacional. Todos os ciclos são limitados no topo e na base pela superfície de regressão máxima, onde a superfície de inundação máxima pode coincidir caso não haja trato transgressivo. Os ciclos R – tipo 1 são compostos inteiramente por um trato de sistemas de nível alto; ciclos R – tipo 2 são compostos por um trato de sistemas de nível alto seguido por um trato de sistemas de estágio de queda separados pela superfície regressiva de erosão marinha; ciclos R – tipo 3 são compostos por um trato de sistemas de nível alto seguido por um trato de sistemas de nível baixo separados pela discordância subaérea; os ciclo TR são compostos por um trato de sistemas transgressivo seguido por um trato de sistemas de nível alto separados pela superfícies de inundação máxima. Estes ciclos proporcionam diferentes entendimentos paleoambientais e de trajetória da linha de costa. Portanto, este trabalho não apenas contribui para o entendimento da metodologia da estratigrafia de sequências de alta resolução, como também para o entendimento das variações paleoambientais dentro da Formação Rio Bonito.

Palavras-chave: estratigrafia de sequências, alta resolução, Bacia do Paraná, Formação Rio Bonito.

ABSTRACT

The Rio Bonito Formation depositional systems and sequence stratigraphy are very well studied. However, this Formation still lacks studies about high resolution sequence stratigraphy, particularly in outcrops. This work starts with facies analyses, facies associations and depositional systems definitions from outcrops and core data from Rio Bonito Formation paralics and shallow marine deposits. By the use of this sedimentological information and the sequence stratigraphy ideas, this work brings an example of high resolution stratigraphy methodology trough the recognition, description and interpretation of stacking patterns, stratigraphic surfaces and system tracts that can be used to define and understand high frequency cycle anatomies which can be R, T and TR. The cycles anatomies were identified, interpreted and separated in 3 types of R cyles which have a progradational stacking patterns, and TR cycles which have a symmetric retrogradational and progradational stacking patterns. All these cycle types are limited at the base and top by a maximum regressive surface which can coincide with a maximum flooding surface in cases where a transgressive system tract is absent. R cycles - type 1 are fully composed by a high level system tract; R cycles – type 2 are composed by a high level system tract followed by a fallen stage system tract separated by a marine regressive erosion surface; R cycles – type 3 are composed by a high level systems tract followed by a low level systems tract separated by a subaerial discordance; The TR cycles are symmetrically composed by a transgressive systems tract followed by a high level systems tract separated by a maximum flooding surface. Those cycles provide new paleoenvironmental and coastal line trajectory understanding. As a consequence, this work contributes for the high resolution sequence stratigraphy methodology understanding as well as the understanding of paleoenvironmental changes in Rio Bonito Formation.

Key-words: sequence stratigraphy, high resolution, Paraná Basin, Rio Bonito Formation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área onde os afloramentos ocorrem. Geograficamente no centro leste do estado de Santa Catarina na região das cidades de Ituporanga, Vidal Ramos e Alfredo Wagner. Geologicamente na Formação Rio Bonito. Os cinco afloramentos estão representados RB_01, RB_02, RB_03, RB_4, RB_05 e o testemunho de sondagem RB_T. 17
Figura 2: Localização da Bacia do Paraná. 19
Figura 3 - Seção geológica esquemática da Bacia do Paraná. Em verde o Grupo Guatá (em verde), onde a Formação Rio Bonito está inserida....20
Figura 4 - Carta cronoestratigráfica da bacia do Paraná. As cinco supersequências estão definidas juntamente com as demais unidades. Em detalhe a Formação Rio Bonito. 21
Figura 5 - Exemplificação ideal de superfícies e tratos de sistemas. 28
Figura 6 - Tipos de anatomias de ciclos de alta frequência....30
Figura 7 - Relação entre padrão de empilhamento e amplitude da variação da linha de costa. 31
Figura 8 - Relação entre gradiente topográfico da plataforma e espessura do depósitos em contextos de transgressão. 32
Figura 9 - Padrão de empilhamento resultante de acordo com a trajetória da linha de costa em relação ao nível relativo do mar. (A), (B) e (C) representam trajetórias com direções entre 90° e 180°, logo são transgressões e tem um padrão de empilhamento resultante retrogradacional. (D) representa trajetórias com direções entre 0° e 90°, logo é uma regressão normal e tem um padrão de empilhamento resultante progradacional. (E) e (F) representam trajetórias com direções entre 0° e -30° (ou menos comum até -90°), logo representam regressões forçadas e tem um padrão de empilhamento resultante progradacional com formação de uma superfície erosiva de regressão marinha (SERM) quando a inclinação da trajetória for menor que -5°....34
Figura 10 - Grau de preservação de ciclos marinhos em relação a trajetória da linha de costa em baixa frequência. (A) Transgressões em baixa frequências favorecem grande erosão da parte proximal dos ciclos devido a erosão do ravinamento. (B) e (C) representam agradação e regressão normal na baixa frequência que favorece a boa preservação de ciclos de alta frequência. (D) Regressões normais na baixa frequência favorecem erosão da parte distal dos ciclos sendo que a parte proximal pode ser erodida por processos subaéreos. 36
Figura 11 - Comparação entre padrões de empilhamento motivados por flutuações na linha de costa com mudanças causadas por ciclos sedimentares. A imagem mostra que ambos podem ser muito parecidos, necessitando de critérios para distinção. 37
Figura 12 - Base para perfil estratigráfico que foi utilizado no campo. 41

Quadro 1 - Código de fácies proposto por Miall (1996). A primeira letra, em maiúsculo, corresponde a granulometria do sedimento, a segunda letra, em minúsculo, corresponde à estrutura sedimentar. 42
Quadro 2 - fácies encontradas nos depósitos parálicos e marinhos raso estudados. 45
Figura 13 - Associação de fácies de *shoreface* superior. (A) Arenitos finos a médios, bem selecionados, com estratificações cruzadas *swalley*. (B) Arenitos muito finos a médios, bem selecionados, com laminações onduladas truncadas de pequeno porte. (C) Arenitos finos a médios, bem selecionados com ripples de corrente. (D) Sucessão vertical de fácies. (E) Arenitos finos a médios, bem selecionados, com estratificações cruzadas de baixo ângulo. (F) Arenitos finos a médios, bem selecionados, maciços. 47
Figura 14: Detalhe da estrutura de carga comumente encontrada entre camadas pelíticas e arenosas. 48
Figura 15 - Associação de fácies de *shoreface* inferior. (A) Arenitos finos a médios, bem selecionados, com estratificações cruzadas *hummocky*. (B) Arenitos muito finos a médios, bem selecionados, com laminações onduladas truncadas de pequeno porte. (C) Heterolitos *flaser* com intercalações centimétricas de pelitos laminados e arenitos muito finos, bem selecionados, com laminações onduladas truncadas de pequeno porte. (D) Heterolitos *linsen* com intercalação centimétrica de pelitos laminados e arenitos muito finos, bem selecionados, com laminações onduladas truncadas de pequeno porte. (D) Sucessão vertical de fácies mostrando grano e estratocrescência ascendente. 49
Figura 16 - Associação de fácies de canal fluvial. (A) Arenitos médios a muito grossos, mal selecionados, com estratificações cruzadas tangenciais. (B) Arenitos médios a grossos, mal selecionados, com estratificações cruzada tangenciais com drapes de lama nos *sets* e *foresets*. (C) Sucessão vertical de fácies. 50
Quadro 3 - Resumo dos ciclos encontrados considerando sua abundância nos depósitos estudados e suas características como padrão de empilhamento, superfícies estratigráficas e tratos de sistemas. 51
Figura 17 - Painel com um exemplo representativo dos ciclos R – tipo 1. (A) Fotomosaico correspondente às alturas 21 a 26m do afloramento RB_05 (apêndice 1). (B) Seção colunar extraído do perfil RB_05 com superfícies e tratos de sistemas. (C) Gráfico representando a evolução da razão A/S do ciclo. 53
Figura 18 - Painel com um exemplo representativo dos ciclos R – tipo 1 mostrando dois ciclos seguidos. (A) Foto-mosaico correspondente as alturas 0 a 3,5m do afloramento RB_03 (apêndice 1). (B) Seção colunar extraída do perfil RB_03 com superfícies e tratos de sistemas. (C) Gráfico representando a evolução da razão A/S durante dois ciclos seguidos. 54
Figura 19 - Trajetória de uma linha de costa regressiva sendo representada pela sua inclinação em relação a horizontal. (A) Perfil de uma planície costeira e plataforma hipotética com a trajetória da linha de costa. (B) Trajetória da linha de costa em relação ao nível relativo do mar. 55

Figura 20 - Painel com um exemplo representativo de um ciclo R – tipo 1 (base) seguido por um ciclo R – tipo 2 (topo). (A) Fotomosaico correspondente as alturas 3 a 7,5m do afloramento RB_03. (B) Perfil estratigráfico extraído do perfil RB_03 juntamente com tratos de sistemas e superfícies estratigráficas. (C) Gráfico representando a evolução da razão A/S durante os dois ciclos R representados.....56
Figura 21: Detalhe do painel da Figura 20 ilustrando o Ciclo R – tipo 2. (A) Fotomosaico correspondente as alturas 3 a 5m do afloramento RB_03. (B) Detalhe da superfície erosiva de regressão marinha (SERM). (C) Perfil estratigráfico extraído do perfil RB_03 juntamente com tratos de sistemas e superfícies estratigráficas. (D) Gráfico representando a evolução da razão A/S. 57
Figura 22: Trajetória de uma linha de costa regressiva com rebaixamento sendo representada pela sua inclinação em relação a horizontal. (A) Perfil de uma planície costeira e plataforma hipotética com a trajetória da linha de costa. (B) Trajetória da linha de costa em relação ao nível relativo do mar. 59
Figura 23 - Painel com um exemplo representativo dos ciclos R – tipo 3. (A) Fotomosaico correspondente as alturas 30,5 a 33,5m do afloramento RB_05. (B) Gráfico representando a evolução da razão A/S durante o ciclo R representado. (C) Seção colunar extraída do perfil RB_05. 60
Figura 24 - Painel com um exemplo representativo dos ciclos TR encontrados. (A) Fotomosaico correspondente as alturas 0 a 2,7m do afloramento RB_02 (apêndice 1). (B) Gráfico representando a evolução da razão A/S durante os ciclos TR representados. (C) Perfil estratigráfico extraído do perfil RB_02. 61
Figura 25 - Trajetória de uma linha de costa transgressiva com rebaixamento sendo representada pela sua inclinação em relação a horizontal. (A) Perfil de uma planície costeira e plataforma hipotética com a trajetória da linha de costa. (B) Trajetória da linha de costa em relação ao nível relativo do mar. 63
Figura 26 – Resumo dos 4 tipos de ciclos encontrados. (A) Ciclos R - tipo 1 possuem padrão de empilhamento progradacional, são limitados pela SRM e são compostos de um TSNA. (B) Ciclos R – tipo 2 possuem um padrão de empilhamento progradacional, são limitados pela SRM e são compostos por um TSNA seguido por um TSEQ separados pela SERM. (C) Ciclos R – tipo 3 possuem um padrão de empilhamento progradacional, são limitados pela SRM e compostos por um TSNA seguido por um TSNB separados pela DS. (D) Ciclos TR possuem um padrão de empilhamento retrogradacional seguido por um padrão progradacional de espessuras semelhantes, são limitados pela SRM e são compostos de um TST seguido por um TSNA separados pela SIM. 65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 Problema e hipótese 14
1.2 Objetivos principais e específicos 14
1.3 Justificativa 15
1.4 Localização da Área de Estudo 16
2 CONTEXTO GEOLÓGICO 18
3 ESTADO DA ARTE E REFERENCIAL TEÓRICO 22
3.1 Estratigrafia de Sequências 22
3.1.1 Conceitos Básicos 24
3.2 Estratigrafia de Sequências de Alta Resolução 29
3.3 Estratigrafia de Sequências na Formação Rio Bonito 37
4 METODOLOGIA 39
4.1 Pré-campo 39
4.1.1 Revisão Bibliográfica 39
4.2 Campo 39
4.2.1 Análise Faciológica 40
4.2.2 Fotomosaicos 43
4.3 Pós-campo 43
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 44
5.1 Analise Faciológica e Associação de Fácies 44
5.1.1 Shoreface Superior 45
5.1.2 Shoreface Inferior Proximal/Distal 48
5.1.3 Canal Fluvial com Influência de Maré 50
5.2 Anatomia de Ciclos de Alta Frequência 51
5.2.1 Ciclos R – Tipo 1 52
5.2.2 Ciclos R – Tipo 2 56
5.2.3 Ciclos R - Tipo 3 59
5.2.4 Ciclos TR 61
6 CONCLUSÕES 64
REFERÊNCIAS 66
APÊNDICE 70

1 INTRODUÇÃO

A estratigrafia de sequências é uma recente mudança de paradigma no que diz respeito à geologia sedimentar. Os conceitos abrangidos têm resultado em uma mudança no pensamento geológico e nos métodos da análise de fácies e estratigráfica. Nas últimas duas décadas esta ferramenta de análise tem sido mais usada pelos cientistas e tem ajudado na interdisciplinaridade da geologia. A estratigrafia de sequências possui grande potencial para entendermos melhor a arquitetura estratigráfica de bacias sedimentares, além de facilitar a busca por recursos econômicos como na indústria de hidrocarbonetos. Segundo Catuneanu (2006), a ideia básica do método é decifrar as respostas no registro sedimentar associadas às mudanças da linha de costa, consequência da interação entre o espaço de acomodação e a taxa de sedimentação ao longo do tempo.

Considerando a ideia básica da estratigrafia de sequências, a sua aplicação vai desde escalas de larga abrangência temporal, como na sísmica, até escalas de menor abrangência, como testemunhos e afloramentos. Sloss *et al*. (1949) definiu que uma sequência é uma unidade estratigráfica limitada por discordâncias inter-regionais, envolvendo dezenas de milhões de anos. Recentemente, o termo sequência passou a ser utilizado para ciclos de mudança na acomodação e taxa de sedimentação definida pela recorrência da mesma superfície estratigráfica através do tempo, independente da escala temporal envolvida (CATUNEANU *et al*., 2009). Sendo assim, começou-se a chamar de estratigrafia de sequências de alta resolução, a análise estratigráfica que decifra o registro sedimentar de alta frequência. Entende-se por alta frequência, escalas menores que a sísmica, ou seja, menores que terceira ordem, de quarta e quinta ordem.

Nas últimas duas décadas, a sucessão Eopermiana da Bacia do Paraná tem sido estudada sob o ponto de vista da estratigrafia de sequências, principalmente ao intervalo referente aos depósitos parálicos e marinho raso da Formação Rio Bonito (HOLZ, 2003). Na maioria dos estudos recentes desta Formação a análise de sequências tem sido feita em uma escala de maior abrangência temporal, de terceira ordem em testemunhos. Este trabalho visa utilizar estes conceitos de estratigrafia de

sequências de alta resolução para analisar ciclos de alta frequência nos afloramentos na Formação Rio Bonito.

1.1 Problema e hipótese

Conforme Zecchin e Catuneanu (2013), a estratigrafia de sequências enfatiza a análise de padrões de empilhamento. Estes padrões são divididos por superfícies chaves. Cada padrão representa um comportamento espacial e temporal da linha de costa e as superfícies chaves indicam mudanças neste comportamento. Estas mudanças na linha de costa são controladas por variações na taxa de criação ou destruição do espaço de acomodação e/ou na taxa do influxo sedimentar, decorrentes de fatores alogênicos (eustático, tectônico, climático) ou autigênicos (mudanças internas ao sistema deposicional). Considerando que estes mecanismos atuam juntos dentro de um mesmo ambiente, é difícil definir quem está controlando a sedimentação. Ciclos estratigráficos de alta frequência em depósitos parálicos e marinhos raso tendem a apresentar ciclos com diferentes anatomias (ciclos T-R, ciclos R ou ciclos T), controlados pelo comportamento do nível de base (espaço de acomodação) ao longo do tempo, em conjunto com o influxo sedimentar (ZECCHIN, 2007).

Os estudos na Formação Rio Bonito concentram-se na definição de sequência de 3° ordem (VAIL *et al*., 1991). Estes trabalhos utilizam os mesmos conceitos da estratigrafia de sequências para definir superfícies chave e tratos de sistemas deposicionais, mas não descrevem e interpretam anatomias de ciclos em alta resolução. A partir disso, surgem algumas perguntas básicas que necessitam ser respondidas: (i) é possível o reconhecimento de superfícies chaves e ciclos de alta frequência em escala de afloramento? (ii) Qual seria a anatomia destes ciclos? (iii) O que a anatomia destes ciclos nos diz a respeito das condições de deposição?

1.2 Objetivos principais e específicos

O objetivo fundamental deste trabalho visa definir e interpretar os ciclos de alta frequência nos depósitos parálicos e marinho raso da Formação Rio, Eopermiano da Bacia do Paraná, nas localidades de Ituporanga, Alfredo Wagner e Vidal Ramos. Como objetivos específicos destacam-se: (i) definir superfícies estratigráficas, tratos de sistemas e ciclos de alta frequência e, (ii) definir as diferentes anatomias (ciclos T-R, R ou T) destes ciclos.

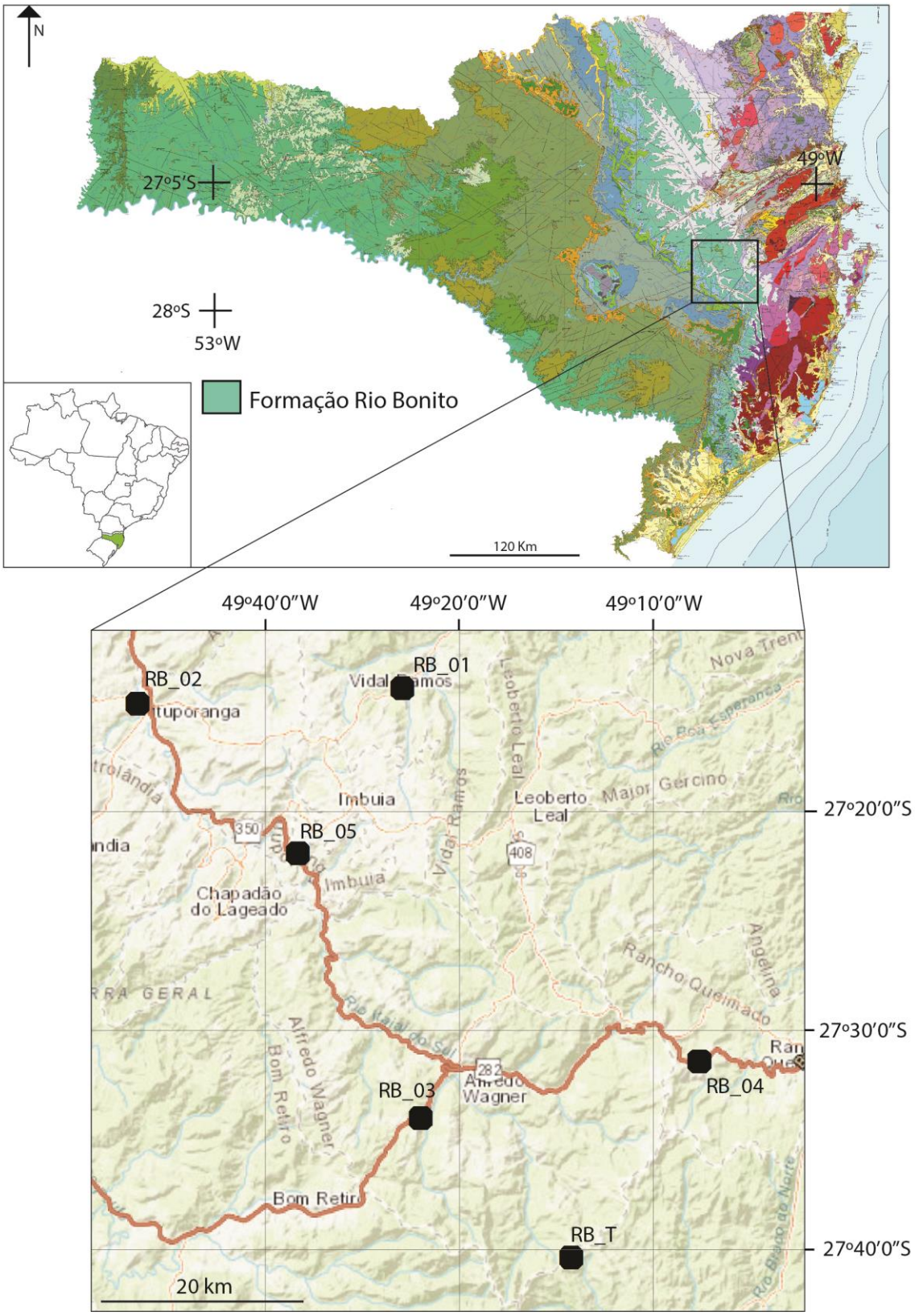
1.3 Justificativa

A ideia para a realização deste trabalho parte do fato de que a totalidade dos trabalhos aplicando a estratigrafia de sequências nos depósitos costeiros da Formação Rio Bonito tem se restringido a definição de sequências de 3$^{a.}$ ordem, utilizando-se de dados de testemunho, não existindo estudos de alta resolução em escala de afloramentos para essa unidade. Além disso, a Formação Rio Bonito possui potencial econômico já muito conhecido no que diz respeito a carvão. Este tipo de estudo pode ajudar no entendimento de depósitos e propriedades de reservatórios sabendo que a caracterização de corpos deste tipo para óleo, gás ou água leva em conta fatores como litologia, geometria e descontinuidades (KUCHLE; HOLZ, 2002). Desta forma, os resultados obtidos neste trabalho podem ainda servir como base para outras localidades e finalidades. A estratigrafia de sequências de alta resolução oferece uma resolução muito maior no que diz respeito a estas descontinuidades e heterogeneidades internas que por sua vez irão afetar a qualidade destes depósitos como reservatórios. Além disso, muitos trabalhos têm sido feitos na última década relacionados à estratigrafia de sequências de alta resolução em diferentes bacias do globo que tem colaborado para a evolução de conceitos e métodos. Sendo assim, é importante aplicarmos estes novos conceitos para as formações que estão a nosso alcance e possuem interesse econômico e acadêmico para tal.

1.4 Localização da Área de Estudo

A área de estudo, representada na figura 1, concentrou-se em 5 afloramentos e um testemunho de sondagem. Estes afloramentos localizam-se geologicamente nos membros Paraguaçu e Siderópolis da Formação. Geograficamente, o local de estudo situa-se no centro leste de Santa Catarina, nos municípios de Alfredo Wagner, Ituporanga e Vidal Ramos.

Figura 1 - Localização da área onde os afloramentos ocorrem. Geograficamente no centro leste do estado de Santa Catarina na região das cidades de Ituporanga, Vidal Ramos e Alfredo Wagner. Geologicamente na Formação Rio Bonito. Os cinco afloramentos estão representados RB_01, RB_02, RB_03, RB_4, RB_05 e o testemunho de sondagem RB_T.



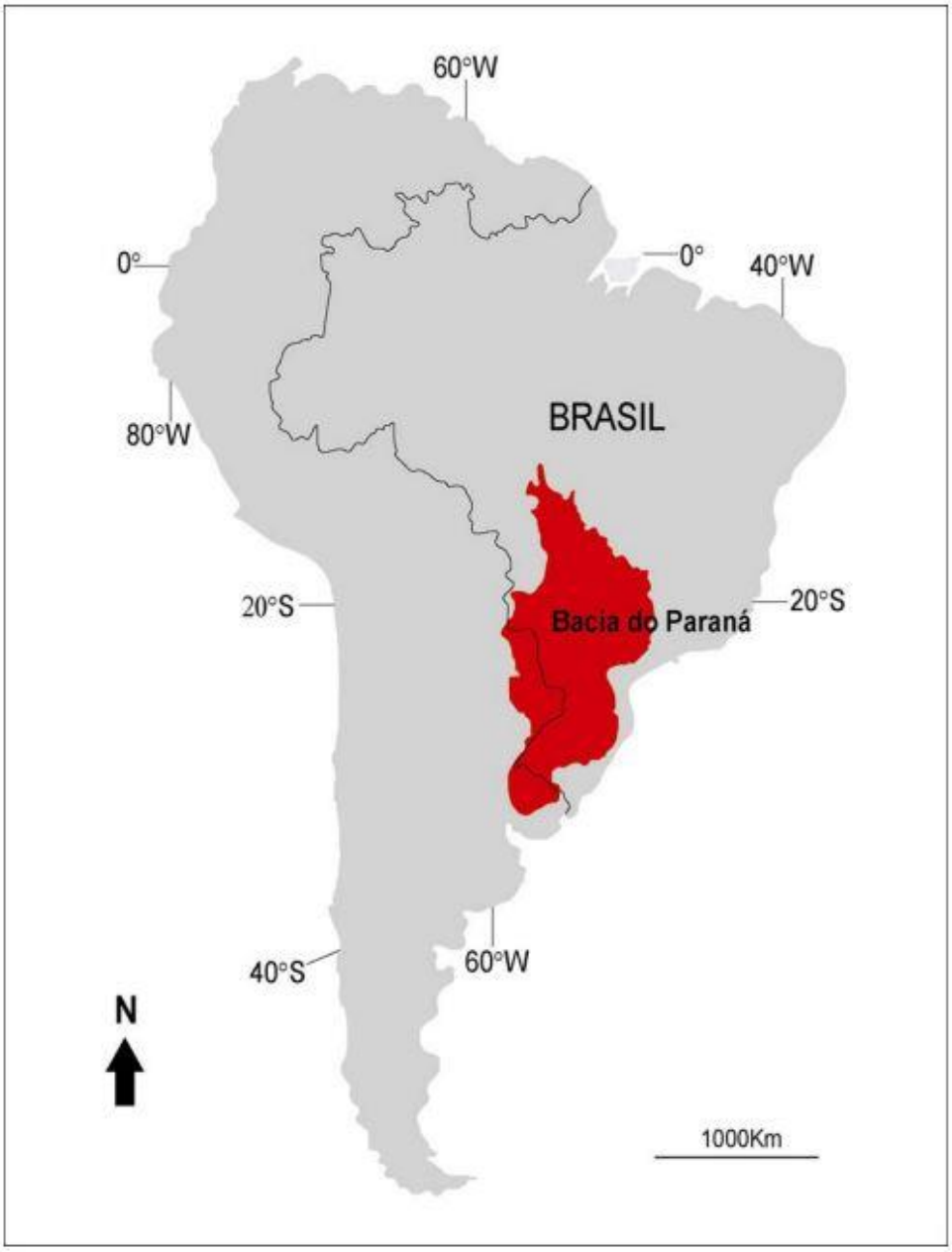
Fonte: modificado de Mapa geológico do Estado de Santa Catarina (WILDNER, 2014).

2 CONTEXTO GEOLÓGICO

A Formação Rio Bonito compreende juntamente com a Formação Palermo, o Grupo Guatá, inserido na Supersequência de segunda ordem Gondwana I da Bacia do Paraná. Conforme Milani *et al*. (2007), a Bacia do Paraná (Figura 2) é uma ampla região sedimentar do continente sul-americano que inclui porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, totalizando uma área que se aproxima dos 1,5 milhão de quilômetros quadrados. O registro estratigráfico da Bacia do Paraná compreende um pacote sedimentar-magmático com uma espessura total máxima em torno dos 7 mil metros (figura 3) onde o depocentro estrutural da sinéclise coincide geograficamente com a região da calha do rio homônimo.

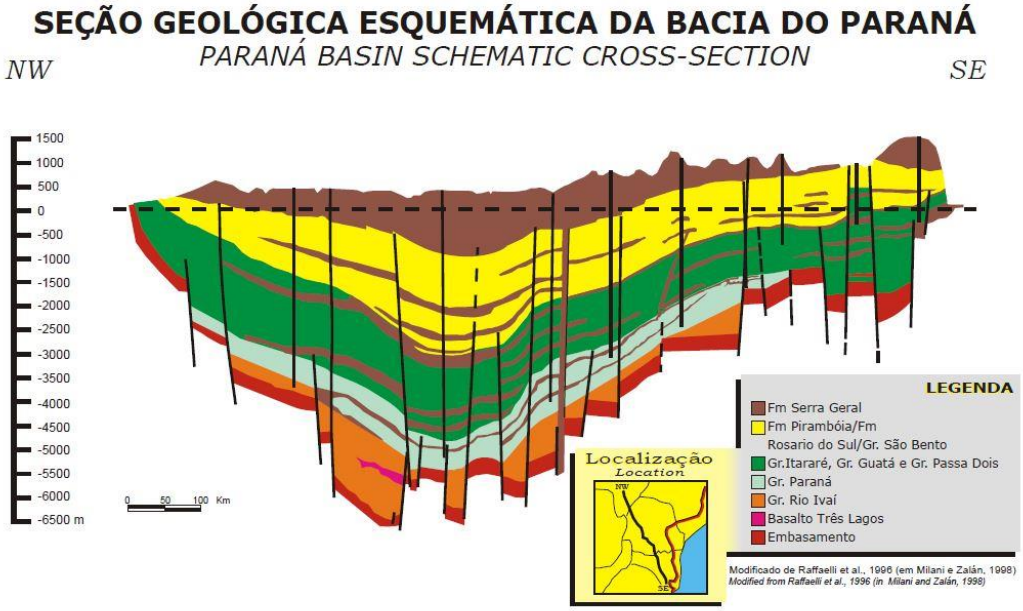
Como podemos observar na carta cronoestratigráfica (figura 4), Milani *et al*. (1997) reconheceu no registro estratigráfico seis unidades de ampla escala ou supersequências, na forma de pacotes rochosos materializando cada um deles por intervalos temporais de algumas dezenas de milhões de anos de duração, limitados por superfícies de discordância regionais, sendo estas: Rio Ivaí (Ordovinciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico – Eocretáceo).

Figura 2: Localização da Bacia do Paraná.



Fonte: Retirado de Scherer (2002).

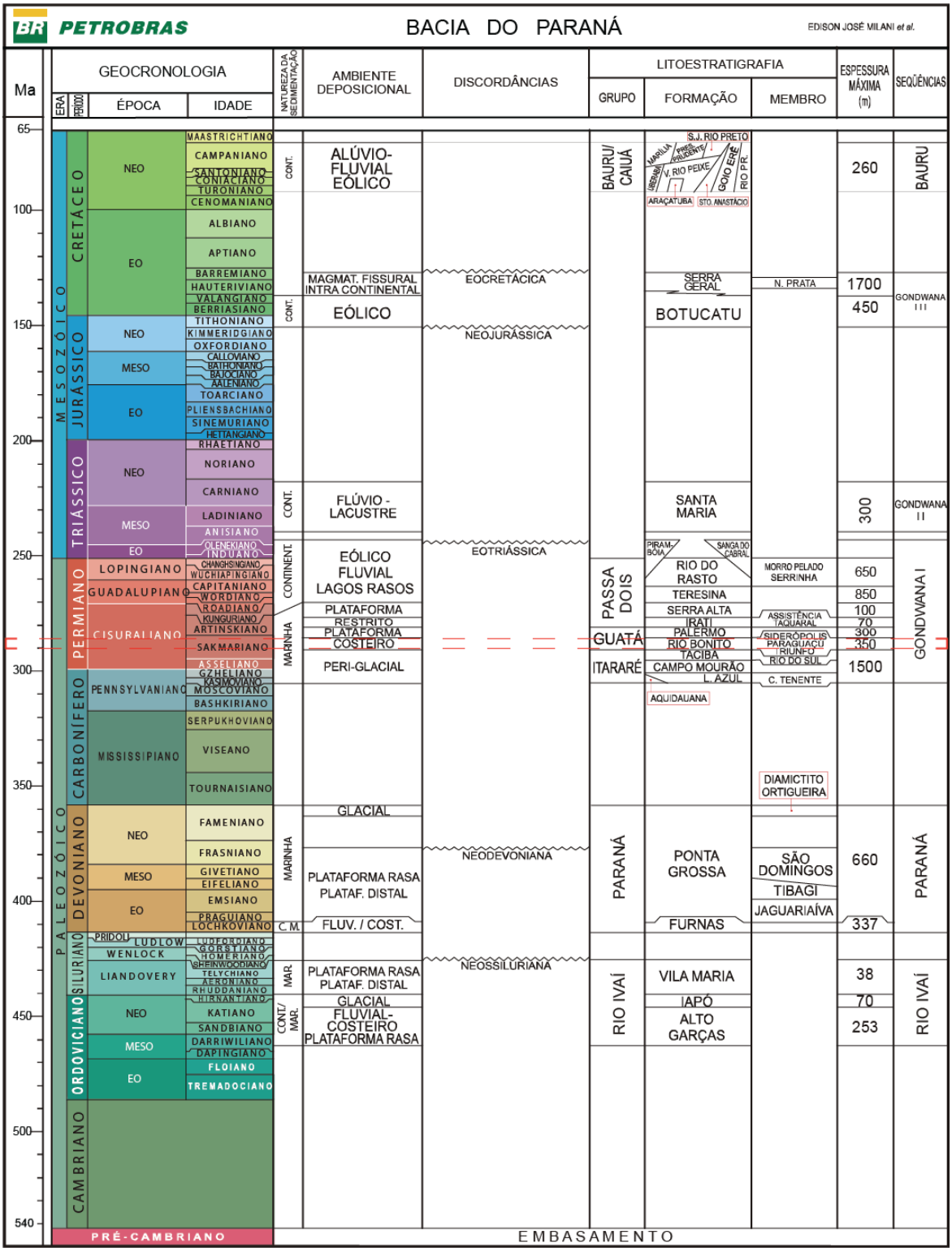
Figura 3 - Seção geológica esquemática da Bacia do Paraná. Em verde o Grupo Guatá (em verde), onde a Formação Rio Bonito está inserida.



Fonte: Modificado de Milani (1997).

A Supersequência Gondwana I, do qual a Formação Rio Bonito faz parte, é composta por três grupos: Itararé, Guatá e Passa Dois. O Grupo Itararé, que compõem a porção basal da Supersequência é representado por depósitos ligados a fase de degelo de glaciares mississipianos. A deglaciação do inicio do Permiano trouxe como consequência a subida do nível relativo do nível do mar. A partir de distintas denominações locais, o pacote pós-glacial define uma cunha transgressiva em *onlap* norte para sul que inicia com os depósitos do Grupo Guatá através da Formação Rio Bonito (MILANI *et al*., 1997). Acima da Formação Rio Bonito, ainda pertencendo ao Grupo Guatá, ocorre a Formação Palermo, que é constituída por siltitos arenosos com bioturbação intensa, raros arenitos finos lenticulares com estratificação tipo hummocky e folhelhos cinza escuro que compõem um horizonte de correlação regional relacionado a superfície de inundação máxima da Supersequência Gondwana I. O Grupo Passa Dois vem acima do Grupo Guatá iniciando-se com a Formação Irati. Nesta formação ocorreu uma restrição à circulação de água entre a sinéclise e o Oceano Panthalassa que culminou por desenvolver um contexto ambiental hipersalino na bacia interior. Desta forma, acumularam-se carbonatos e evaporitos na porção norte, e folhelhos betuminosos na porção sul da bacia.

Figura 4 - **C**arta cronoestratigráfica da bacia do Paraná. As cinco supersequências estão definidas juntamente com as demais unidades. Em detalhe a Formação Rio Bonito.



Fonte: Modificado de Milani (1997).

Tratando-se de Formação Rio Bonito, Schneider *et al*. (1974) define que uma notável ciclicidade sedimentar pode ser observada nos depósitos da Formação, traduzindo oscilações do nível de base na bacia. Em função desta característica, em que se alternam pacotes ora dominantemente arenosos e ora pelíticos, a unidade foi dividida em três membros: Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis. O membro Triunfo é representado por arenitos, folhelhos e algum carvão, em contexto de deltas pós-glaciais. O membro Paraguaçu marca uma transgressão marinha com domínio de pacotes pelíticos. Já o membro Siderópolis é interpretado como sucessão areno-pelítica depositada em contexto litorâneo.

3 ESTADO DA ARTE E REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico que serviu de base para este trabalho pode ser dividido em duas partes. A primeira parte é o contexto geológico e apresentação da área de estudo. A segunda parte será a referência no que diz respeito à estratigrafia de sequências e os estudos já realizados na Formação utilizando o método.

3.1 Estratigrafia de Sequências

A estratigrafia de sequências representa recente na forma de pensar a evolução do registro geológico e é considerado por muitos cientistas uma das últimas revoluções conceituais na geologia sedimentar (MIALL, 1997). Seu uso em qualquer contexto deposicional facilita reconstruções paleogeográficas e a previsão de fácies e litologias. A premissa básica são mudanças no padrão de empilhamento sedimentares ligadas a variação da taxa de sedimentação e espaço de acomodação ao longo do tempo (CATUNEANU; ZECCHIN, 2013).

Nos últimos 30 anos de pesquisa em estratigrafia de sequências, podemos concluir que cada modelo já proposto pode ter uma melhor aplicação em situações específicas nas quais foram criados. Isso levou a uma tendência de cada autor escolher o tipo de sequência que melhor se adaptava a seu modelo deposicional

proposto. Um importante conceito a ser definido para utilizar o método da estratigrafia de sequências é o significado do termo sequências. O termo sequência foi primeiramente proposto por Sloss *et al*. (1949) para designar um pacote de rochas limitado por discordâncias inter-regionais. Mitchum (1977) propõem o termo sequência deposicional que representa “uma sucessão de estratos geneticamente relacionados limitados por inconformidades ou suas conformidades relativas”. Com a continuação do desenvolvimento de estratigrafia de sequências nos anos 80 e 90, uma diversidade de sequências começaram a serem propostas. Desta forma, cada modelo já proposto baseia-se especialmente em diferentes superfícies chave que limitam a sequência. Três tipos de sequência surgiram como mais utilizadas: sequência deposicional, sequência estratigráfica genética e sequência T-R.

Segundo Catuneanu *et al*. (2009), sequência deposicional é limitada por discordâncias subaéreas e suas superfícies correlatas. Discordâncias subaéreas são comumente marcadoras de hiatos significativos no registro estratigráfico. No entanto, este tipo de discordância possui limitações no seu uso como limite de sequências. Por ser uma superfície marcadora de hiatos temporais, o tempo envolvido na sua formação é incerto. Além disso, esta superfície pode ser totalmente ou parcialmente erodida pela subsequente transgressão. Outro problema é a dependência da queda do nível do mar para a definição deste limite. Em especial este último problema, implica que ciclicidades desenvolvidas durante subida do nível do mar não podem ser descritas em termos de sequência deposicional.

Sequência genética (GALLOWAY, 1989) usa a superfície de inundação máxima como limite de sequências. De acordo com Catuneanu *et al*. (2009), este método tem as vantagens de que superfícies de inundação máxima são normalmente as mais fáceis de distinguir e que a definição deste tipo de sequência é independente de discordâncias subaéreas, ou seja, sem a necessidade de queda do nível do mar. Isto significa que o modelo pode ser aplicado para todos os tipos de ciclos. No entanto, nos casos de rebaixamento do nível relativo do mar, a sequência genética contém uma discordância subaérea dentro dela, levando ao agrupamento de estratos não geneticamente relacionados (a cima e abaixo da discordância).

Sequência Transgressiva-Regressiva (TR) foi definida orginalmente como uma unidade sedimentar depositada durante o intervalo entre o inicio de um evento

transgressivo e o fim do próximo (JOHNSON; MURPHY, 1984). O conceito foi evoluindo para abranger mais ambientes e foi definido que este tipo de sequência usa dois limites que incluem a discordância subaérea e a sua porção marinha que é a superfície de regressão máxima (CATUNEANU *et al*., 2009). Entre as limitações deste modelo estão: superfícies de regressão máxima podem não refletir um tempo real em sistemas marinho profundos; a formação das superfícies de regressão máxima também depende de sedimentação, podendo então serem diácronas; os segmentos marinhos e fluviais do limite de sequências formam-se em tempos diferentes; todos os depósitos regressivos acabam sendo incluídos no mesmo trato de sistemas, mesmo que parte deste depósito tenha sido formado por regressão forçada e outra parte por regressão normal (CATUNEANU *et al*., 2009).

Catuneanu *et al*. (2009) tenta unificar conceitos para facilitar a comunicação entre estas diferentes escolas, visando criar uma metodologia de trabalho que seja independe do modelo e, desta forma, unificar terminologias no que diz respeito a superfícies chaves e padrões de empilhamento. A terminologia adotada em consenso com vários modelos deve ser aplicável em qualquer escala, desde bacia, até de alta resolução em dados de afloramento. Catuneanu *et al*. (2009) definiu sequência como “um ciclo de mudança em acomodação ou taxa de sedimentação definido pela recorrência da mesma superfície estratigráfica através do tempo geológico”. Esta definição abrange todos os tipos de sequências, independente do dado disponível e do processo controlador na sua formação.

3.1.1 Conceitos Básicos

Alguns conceitos são essenciais para a aplicação do método da estratigrafia de sequência, são eles:

a) Espaço de acomodação x Suprimento Sedimentar (A/S):

Segundo Jervey (1988), acomodação é o espaço disponível para o sedimento preencher. Este espaço pode variar de acordo com vários controles em várias escalas temporais. Em bacias marinhas é o equivalente ao espaço entre o nível do mar e o fundo oceânico. Como mencionado anteriormente, sequências são o

registro do balanço entre mudança na acomodação e taxa de sedimentação, que são variáveis independentes uma da outra. Sendo assim, acomodação total aumenta quando a bacia sofre subsidência ou o nível relativo do mar. Neste trabalho, a razão espaço de acomodação e sedimentação será seguidamente utilizada como “A/S”.

b) Padrões de empilhamento:

Os padrões de empilhamento são o resultado da relação entre espaço de acomodação e taxa de sedimentação (A/S) e vão indicar a trajetória da linha de costa (CATUNEANU; ZECCHIN, 2013). Segundo Catuneanu (2006) os padrões de empilhamento e a devida interpretação são:

Padrão progradacional por regressão forçada*:* formar-se a partir de uma regressão forçada, ou seja, onde a linha de costa é forçada a regredir como consequência de uma queda do nível relativo do mar, independente da taxa de sedimentação. Nestes casos, a razão entre acomodação e suprimento sedimentar (A/S) é menor que 0, pois o rebaixamento do nível relativo do mar causa uma grande perda de acomodação.

Padrão progradacional por regressão normal: forma-se durante a subida ou estabilização do nível relativo do mar, onde a taxa de suprimento sedimentar é maior que a taxa de criação de acomodação, levando a uma regressão da linha de costa. Nestes casos, a razão A/S é mais que zero, mas menor que 1.

Padrão retrogradacional: forma-se por transgressão onde a taxa de subida do nível relativo do mar é maior que a taxa de influxo sedimentar. Desta forma, a razão A/S é maior que 1, onde a sedimentação não consegue preencher o espaço de acomodação criado pela subida do nível relativo do mar.

c) Tratos de sistemas:

Segundo Catuneanu e Zecchin (2013), os tratos de sistema consistem em sistemas deposicionais correlacionáveis que são geneticamente ligados por trajetórias específicas de linha de costa. Este tipo de unidade pode ser vista em diferentes escalas e é definida com base no padrão de empilhamento.

Trato de sistemas de estágio de queda (TSEQ)*:* inclui todos os depósitos regressivos que se acumulam ao longo do intervalo de queda do nível relativo do mar. É produto da regressão forçada.

Trato de sistemas de nível baixo (TSNB): incluem depósitos progradacionais que se acumulam durante os estágios iniciais de subida do nível relativo do mar, durante a regressão normal, sobrepondo do trato de sistemas de estágio de queda.

Trato de sistemas transgressivo (TST): abrange os depósitos retrogradacionais que acumulam durante o inicio da transgressão até a transgressão máxima da linha de costa.

Trato de sistemas de nível alto (TSNA): inclui depósitos progradacionais que se formam durante os estágios finais de subida do nível do mar.

Trato de sistemas regressivo (TSR): Agrupa em um mesmo trato de sistemas todos os tratos regressivos, incluindo os sedimentos dos tratos de sistema de nível alto, de estágio de queda e de nível baixo.

d) Superfícies-chave:

As superfícies irão definir os limites entre as sequências e juntar os tratos de sistemas.

Discordância Subaérea (DS) (SLOSS *et al*., 1949) é uma discordância que se forma sob condições subaéreas como resultado de erosão fluvial, pedogênese, degradação eólica ou dissolução. Discordâncias subaéreas são formadas durante regressão forçada (POSANMETIER *et al*., 1988) e durante períodos de acomodação fluvial negativa (BLUM, 1994).

Conformidade correlata (CC) (POSAMENTIER *et al*., 1988), seria a continuação marinha da DS. Segundo Tucker (1992), ela marca a mudança no padrão de empilhamento da regressão forçada para regressão normal de nível baixo. Desta forma, ela registra o paleo-fundo oceânico no fim da regressão forçada (CATUNEANU; ZECCHIN, 2013).

Superfície de inundação máxima (SIM) (POSAMENTIER *et al*., 1988) é uma superfície estratigráfica que marca uma mudança no padrão de empilhamento de

retrogradacional (transgressão) para progradacional associada a regressão normal de nível alto. Representa o paleo-fundo oceânico no fim da transgressão. Algumas vezes a mudança de um *trend* deposicional retrogradacional para progradacional é marcado por fácies de marinho profundo em vez de uma superfície bem delimitada, o que pode levar a uma incerteza no local exato de traçar a superfície (CATUNEANU; ZECCHIN, 2013).

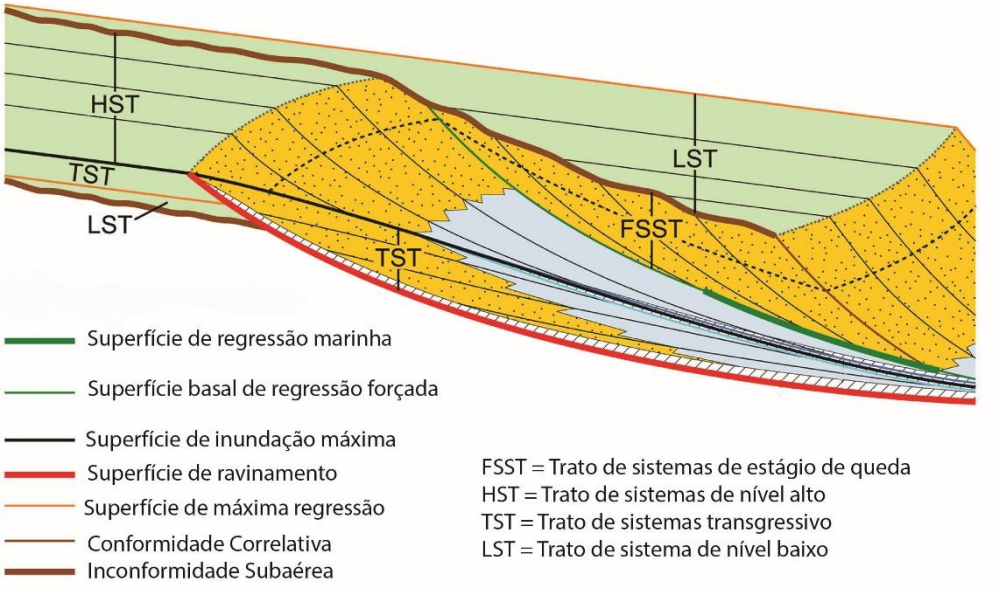
Superfície de regressão máxima (SRM) (HELLAND-HANSEN; MARTINSEN, 1996) é uma superfície estratigráfica que marca a mudança do padrão de empilhamento progradacional de uma regressão normal de nível baixo para um padrão transgressivo. Representa o paleo-fundo oceânico no fim da regressão normal de nível baixo e suas correlações em ambiente não marinho (CATUNEANU; ZECCHIN, 2013).

Superfície de ravinamento (SR) (NUMMEDAL; SWIFT, 1987) é uma superfície erosional que é formada pela ação das ondas ou correntes de maré durante transgressão em ambientes costeiros a marinho raso. Os dois tipos dessa superfície são diácronos. Em direção a bacia esta superfície se junta com a SRM, em direção ao continente termina juntando-se com a SIM.

Superfície regressiva de erosão marinha (SERM) (PLINT, 1988) é uma superfície erosional que forma normalmente pela ação das ondas durante o rebaixamento do nível do mar (regressão forçada). Esta superfície é diácrona, sendo que em direção à bacia torna-se mais jovem de acordo com a regressão.

A figura 5 mostra de maneira esquemática a relação entre as diferentes superfícies e os tratos de sistemas inclusos em cada uma delas.

Figura 5 - Exemplificação ideal de superfícies e tratos de sistemas.



Fonte: Modificado de Zecchin e Catuneanu (2013).

e) Controles da Estratigrafia de Sequências:

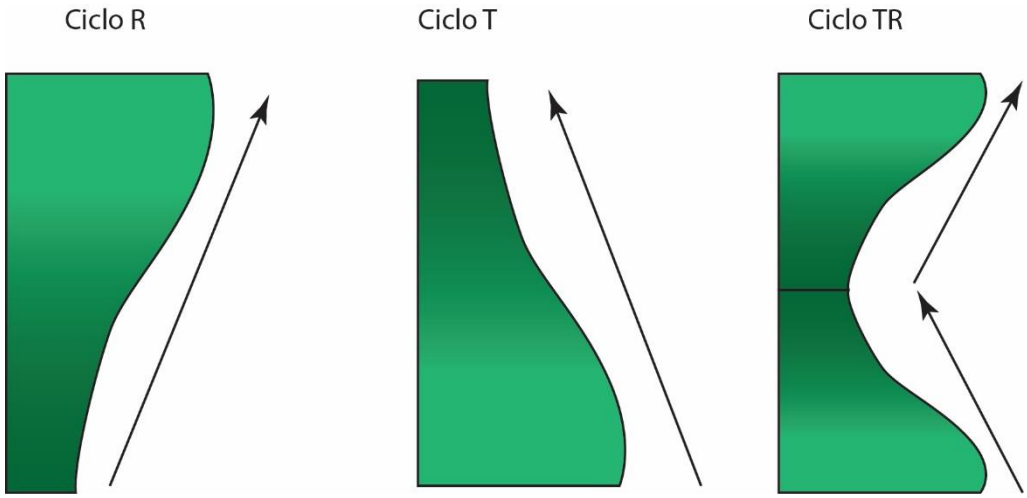
A relação entre as taxas de geração ou destruição da acomodação e as taxas influxo sedimentar é o que determina os padrões de empilhamento que serão divididos em tratos, separados por superfícies, e posteriormente agrupados em sequências. Segundo Catuneanu e Zecchin (2013) os principais controles dos padrões de empilhamento, por consequência dos tratos de sistemas, são processos alogênicos, externos a bacia, e autogênicos, internos ao sistema deposicional. Nem todos os processos autogênicos tem um papel importante na formação de superfícies, mas apenas aqueles que podem influenciar na linha de costa. Qualquer mudança na linha de costa, independente da origem, responde a uma mudança nas variáveis de acomodação e sedimentação, que por sua vez influência no padrão de empilhamento. A diferenciação entre processos alogênicos e autogênicos, que podem controlar a trajetória da linha de costa, é difícil na maioria das vezes. Por esta razão, a definição e nomenclatura de unidades e superfícies precisam ser baseadas em observações do padrão de empilhamento em vez de no mecanismo controlador (CATUNEANU; ZECCHIN, 2013). Desta forma, podemos estender o conceito de sequência para quaisquer ciclos que são interligados por superfícies que se repetem, independente da origem. Portanto, este conceito de sequência promove uma separação entre a observação objetiva em campo da posterior interpretação do mecanismo controlador.

3.2 Estratigrafia de Sequências de Alta Resolução

A estratigrafia de sequências de alta resolução refere-se a análise estratigráfica que decifra o registro sedimentar de alta frequência, utilizando-se de dados de afloramentos, testemunhos e perfis (ZECCHIN; CATUNEANU, 2013). O termo parasequência (VAN WAGONER *et al*., 1987) era amplamente utilizado para determinar ciclos de alta frequência. No entanto, seu conceito abrangia apenas ciclos de padrão de empilhamento progradacional. Desta forma, pela confusão que o termo pode causar, Zecchin e Catuneanu (2013) propõem o seu abandono. O termo genérico ciclos de alta frequência é mais indicado, pois este é independente de fatores temporais, genéticos e não relacionado com um padrão de empilhamento particular.

Ciclos de alta frequência normalmente tem uma escala métrica a decamétrica, ou seja, tipicamente escala de afloramentos e respondem a relação entre sedimentação e acomodação, formando padrões de empilhamento que podem ser divididos em tratos de sistemas e conter superfícies estratigráficas assim como ciclos de menor frequência. Em depósitos parálicos e marinhos raso, como os que foram estudados, três tipos de anatomias de ciclos de alta frequência são definidos por Zecchin (2007) e mostrados na figura 6, ciclos R, ciclos T e ciclos TR. Ciclos R são caracterizados por um padrão progradacional dominante, onde o padrão reotrogradacional é relativamente pouco espesso ou ausente. Contrariamente aos ciclos R, os ciclos T possuem um padrão retrogradacional mais espesso que o progradacional. Os ciclos TR possuem um padrão de empilhamento simétrico com retrogradações e progradações de espessura semelhante.

Figura 6 - Tipos de anatomias de ciclos de alta frequência.



Fonte: Modificado de Zecchin (2007).

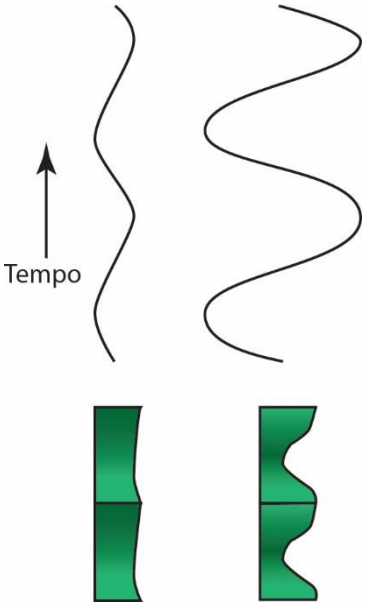
Como descrito anteriormente, os ciclos de alta frequência seguem os mesmo princípios dos ciclos de baixa frequência, dessa forma a razão entre acomodação e sedimentação definem o padrão de empilhamento que, por sua vez, são classificados em anatomias. Mas outros controles exercem forte influência na confecção destas anatomias. Saber como estes controles agem na formação das anatomias nos permite fazer o caminho inverso e descobrir informações genéticas através dos padrões de empilhamento vistos em campo. Segundo Zecchin (2007), além da razão A/S, também são essenciais para explorar as anatomias dos ciclos de alta frequência, amplitude e forma da curva de variação do nível do mar, posição no sistema costeiro, gradiente topográfico da bacia, relevo da bacia, trajetória da linha de costa e clima.

Segundo Swift *et al*. (1991), a razão de acomodação e sedimentação muito maior que 1 (A/S>>1) são caracterizados pela formação de estratos transgressivos, onde depósitos regressivos são erodidos pela subsequente transgressão. A formação de depósitos regressivos aumenta conforme a razão A/S começa a diminuir. Além disso, o padrão de empilhamento de depósitos de alta frequência deve seguir o padrão de empilhamento da baixa frequência no qual estão inseridos. Isto sugere que ciclos de alta frequência com espessos intervalos transgressivos estão relacionados a uma situação de alta taxa de acomodação em uma escala de baixa frequência, enquanto ciclos com espessos intervalos regressivos devem estar relacionados a uma situação de alta taxa de sedimentação. Segundo Helland-

Hansen e Gjelberg (1994), altas taxas de subida do nível do mar e baixas taxas de sedimentação resultam em depósitos transgressivos pouco espessos. No entanto, se a taxa de sedimentação é suficientemente alta, estratos com espessos depósitos transgressivos podem ser depositados. Portanto, a deposição de espessos depósitos transgressivos é favorecida em situações de alta taxa de sedimentação e criação de acomodação (A/S>=1), enquanto depósitos transgressivos pouco espessos são característicos de situações de altas taxas de acomodação e pouca sedimentação (A/S>>1).

A amplitude e forma da curva de variação do nível do mar são importantes pelo controle faciológico e da sucessão de fácies representada no ciclo. Conforme figura 7, ciclos mostrando pouca mudança faciológica representam mudanças pequenas no nível do mar que, por sua vez, levaram a pequenas mudanças paleoambientais. Inversamente, grandes variações do nível relativo do mar levam a grandes mudanças paleoambientais que se refletem em notáveis mudanças faciológicas dentro dos ciclos (ZECCHIN, 2007).

Figura 7 - Relação entre padrão de empilhamento e amplitude da variação da linha de costa.



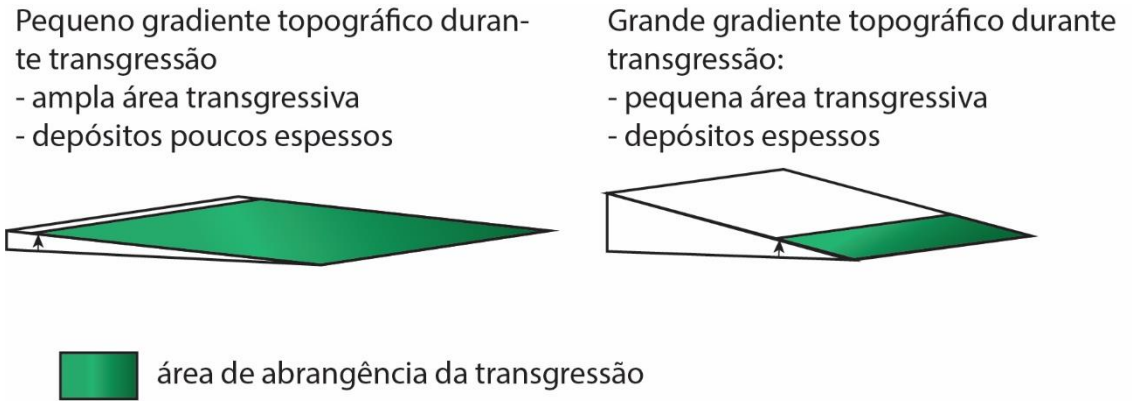
Fonte: Modificado de Zecchin (2007).

A posição dentro do sistema costeiro é um controle fundamental da sucessão de fácies. Ciclos depositados perto da margem da bacia possuem normalmente altas taxas de sedimentação durante transgressões em comparação com o *offshore*.

Desta forma, transgressões nas partes mais distais da linha de costa tendem a ter falta de sedimentos, marcado por sucessões pouco espessas (ZECCHIN, 2007).

O gradiente topográfico influencia na espessura dos depósitos e na formação de superfícies erosivas durante transgressões e regressões forçadas. Transgressões em contexto de alto gradiente topográfico levam a curtos movimentos da linha de costa em direção ao continente e, como consequência, as ondas têm mais tempo para erodir e retrabalhar o sedimento, facilitando a formação de superfícies erosivas e espessos depósitos transgressivos. (HELLAND-HANSEN; MARTINSEN, 1996). Nessas condições, múltiplas superfícies de ravinamento podem ser formadas e o sedimento tende a ser mais grosso (ZECCHIN, 2007). Diferentemente, transgressões em menores gradientes topográficos são caracterizadas por uma rápida migração da linha de costa em direção ao continente e em uma área mais ampla, causando uma grande distribuição de depósitos transgressivos pouco espessos (CATTANEO; STEEL, 2003). Em casos de queda do nível relativo do mar, gradientes topográficos menores são associados a grande retração da linha de costa e maior facilidade para a formação de depósitos de regressão forçada (ZECCHIN, 2007). A figura 8 trás um resumo da influencia do gradiente topográfico nos depósitos.

Figura 8 - Relação entre gradiente topográfico da plataforma e espessura do depósitos em contextos de transgressão.



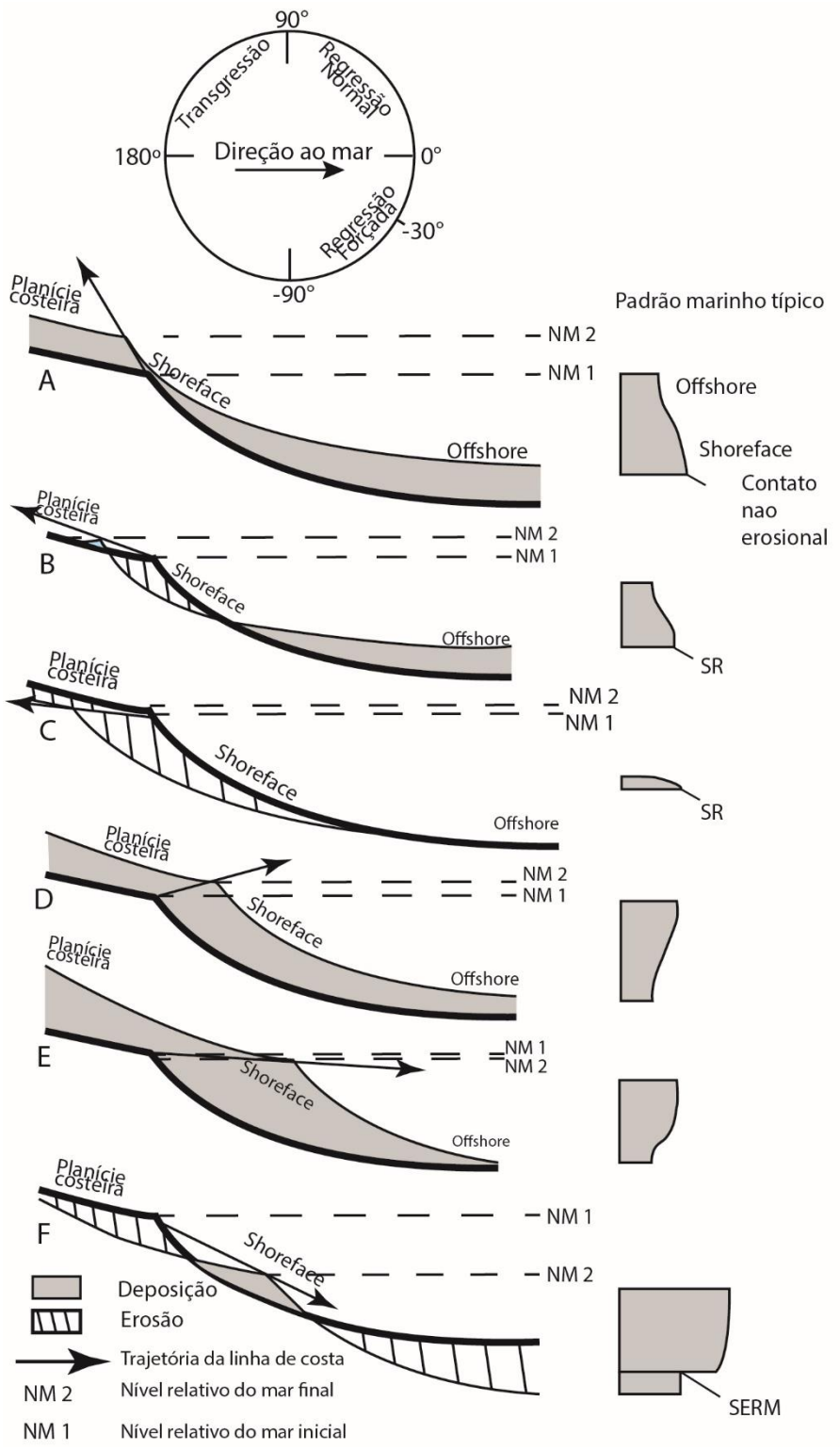
Fonte: Modificado de Zecchin (2007).

A irregularidade da superfície costeira tem influência na preservação de ciclos. Incisões fluviais, tectônica local e deposição de sedimentos criam uma topografia irregular e afetam a preservação dos depósitos sedimentares (RASMUSSSEN; DYBKJAER, 2005). Além disso, a litologia onde os mecanismos de

erosão e transporte atuam influencia na irregularidade do relevo. Conforme estes mecanismos atuam lateralmente em rochas de diferentes litologias, pode ocorrer uma variação de relevo no substrato (MCMURRAY; GAWTHORPE, 2000). Altos topográficos, como deltas, são normalmente fonte de sedimentos durante a subida do nível relativo do mar e, dessa forma, tendem a formar pacotes transgressivos pouco espessos (HELLAND-HANSEN; MARTINSEN, 1996). Diferentemente, baixos topográficos, como vales incisos, tendem a reter sedimentos e formar espessos depósitos transgressivos.

A fisiografia da bacia, formada pelo gradiente topográfico e irregularidade da costa, juntamente com as variações relativas do nível do mar, controlam a trajetória da linha de costa. A trajetória da linha de costa é definida como “o caminho de migração da linha de costa ao longo de seu mergulho” (HELLAND-HANSEN; GJELBERG, 1994). A arquitetura dos ciclos e o grau de preservação são dependentes da trajetória da linha de costa durante transgressões e regressões. Conforme figura 9, trajetórias de sentido 0° são em direção ao mar, 90º direcionado para cima, 180º em direção ao continente e -90º direcionado para baixo. Seguindo este lógica, trajetórias de linha de costa transgressiva estão entre 90º e 180º. Trajetórias de linha de costa de regressão normal estão entre 0º e 90º, enquanto trajetórias de linha de costa de regressão forçada estão entre 0º e -30º. Trajetórias entre -30º e -90º não são comuns (HELLAND-HANSEN; MARTINSEN, 1996). De maneira geral, durante transgressões as trajetórias estão perto de 180º e em regressões perto de 0º. A formação e preservação de sucessões sedimentares é alta em transgressões caso a trajetória da linha de costa seja direcionada para cima (90°) ou para o continente (180º), conforme figura 9A, pelo mesmo motivo que faz com que um alto gradiente topográfico facilite a preservação deste tipo de depósito. Em situações de regressão normal a preservação é maior se a trajetória da linha de costa durante regressões está inclinada para cima (90°) e em direção ao mar (0º), conforme figura 9D. Já contextos de regressão forçada formam-se quando a trajetória da linha de costa inclina-se para baixo em direção ao nível do mar (figura 9E), quando esta inclinação chega perto dos -30º, a SERM é formada (figura 9F). A presença de uma SR na base de depósitos transgressivos sugere que a trajetória da linha de costa era muito próxima de 180° (figura 9B e 9C).

Figura 9 - Padrão de empilhamento resultante de acordo com a trajetória da linha de costa em relação ao nível relativo do mar. (A), (B) e (C) representam trajetórias com direções entre 90° e 180°, logo são transgressões e tem um padrão de empilhamento resultante retrogradacional. (D) representa trajetórias com direções entre 0° e 90°, logo é uma regressão normal e tem um padrão de empilhamento resultante progradacional. (E) e (F) representam trajetórias com direções entre 0° e -30° (ou menos comum até -90°), logo representam regressões forçadas e tem um padrão de empilhamento resultante progradacional com formação de uma superfície erosiva de regressão marinha (SERM) quando a inclinação da trajetória for menor que -5°.

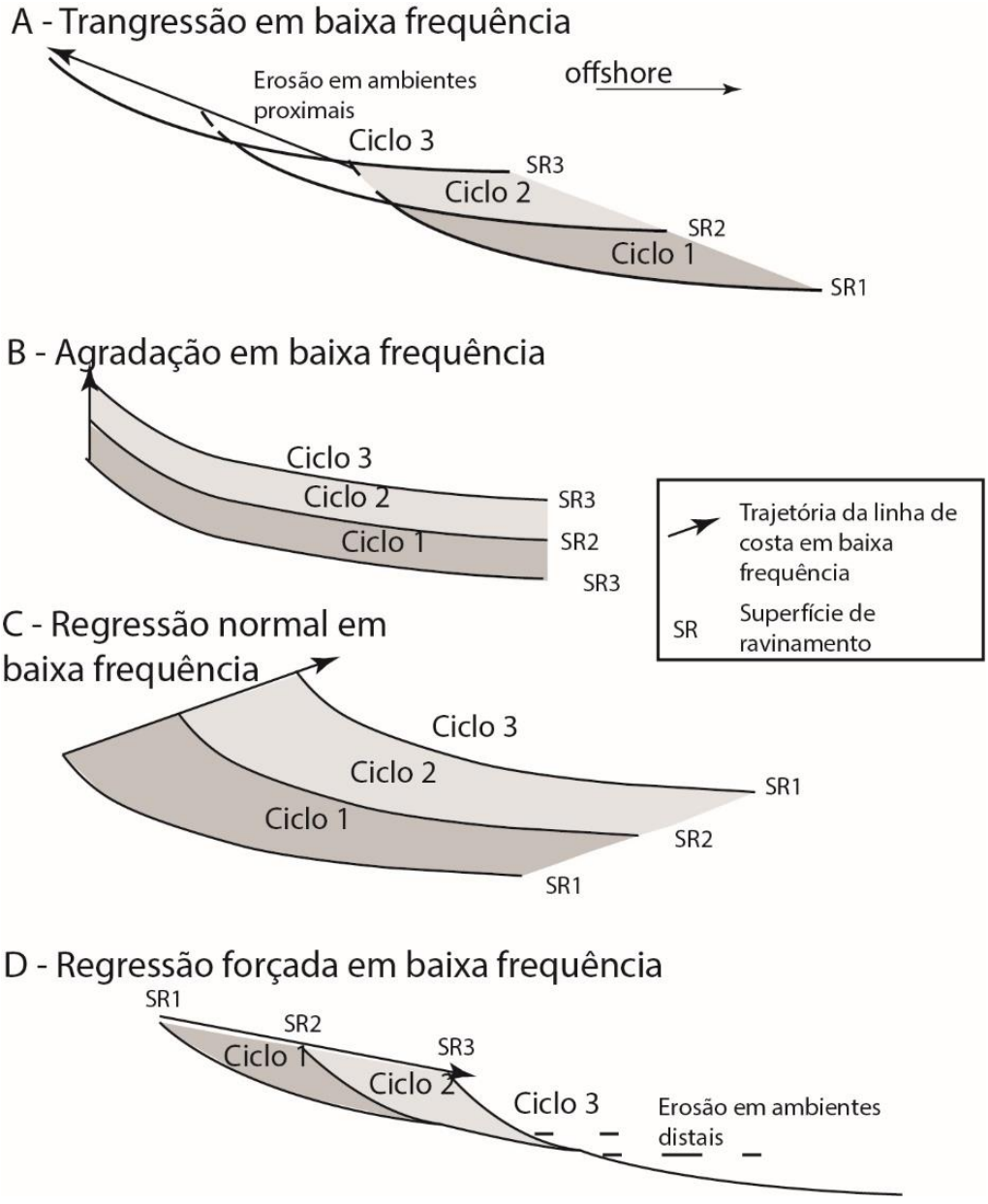


Fonte: Modificado de Zecchin (2007).

Considerando um tempo maior, a trajetória da linha de costa entre ciclos de alta frequência é essencial para o grau de preservação e arquitetura resultante (ZECCHIN, 2007). Em casos de subsidência e soerguimento serem uniformes, altas taxas de preservação de depósitos normalmente ocorrem em padrões agradacionais e de regressão normal (figura 10B e 10C). No entanto, depósitos de ciclos individuais são normalmente removidos durante transgressões (figura 10A). Neste último caso, ciclos podem ser erodidos por processos subaéreos ou por ondas, dependendo da localização no sistema costeiro. No entanto, a potencial preservação de ciclos aumenta com uma longa agradação e é também controlada pelo gradiente topográfico e regime de ondas (ZECCHIN, 2007).

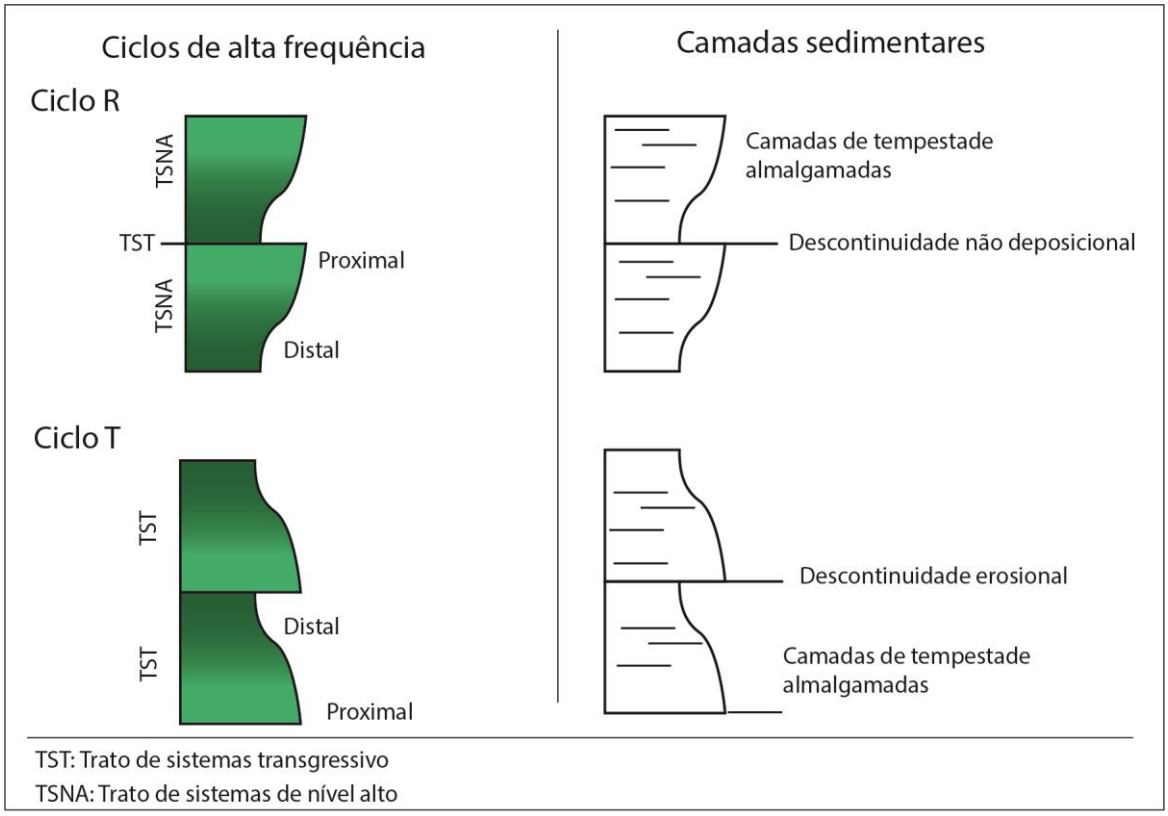
O clima tem papel importante na arquitetura de fácies de sistemas costeiros. Segundo Zecchin (2007) e Zecchin, Catuneanu e Caffau (2017), muitas vezes a variação de energia gerada por ondas em momentos de tempestade pode gerar sucessões de fácies muito similares àquelas decorrentes de variações da linha de costa (Figura 11). Dessa forma, critérios foram definidos para tentar diferenciar os efeitos de trajetórias reais da linha de costa dos efeitos de mudanças de energia. Os critérios levam em conta dados sedimentológicos, estratigráficos, micropalentológicos e diagnéticos. Dentro destes critérios podemos destacar: ocorrência de mudanças no ambiente deposicional entre superfícies limítrofes; ocorrência de mudança de profundidade entre superfícies limítrofes; aparência física das superfícies limítrofes; extensão lateral das superfícies limítrofes; presença de depósitos condensados; espessura do ciclo; reconhecimento de clinoformas em uma sucessão regressiva de plataforma. Além disso, a formação da superfície de ravinamento no *shoreface* pode mostrar mudanças nas condições de energia. Cimentação intensa também pode ser encontrada imediatamente embaixo ou em cima de superfícies transgressivas. No entanto, a integração de mais de um dos critérios mencionados é necessário para uma distinção confiável.

Figura 10 - Grau de preservação de ciclos marinhos em relação a trajetória da linha de costa em baixa frequência. (A) Transgressões em baixa frequências favorecem grande erosão da parte proximal dos ciclos devido a erosão do ravinamento. (B) e (C) representam agradação e regressão normal na baixa frequência que favorece a boa preservação de ciclos de alta frequência. (D) Regressões normais na baixa frequência favorecem erosão da parte distal dos ciclos sendo que a parte proximal pode ser erodida por processos subaéreos.



Fonte: Modificado de Zecchin (2007).

Figura 11 - Comparação entre padrões de empilhamento motivados por flutuações na linha de costa com mudanças causadas por ciclos sedimentares. A imagem mostra que ambos podem ser muito parecidos, necessitando de critérios para distinção.



Fonte: Modificado de Catuenanu *et al*. (2009).

3.3 Estratigrafia de Sequências na Formação Rio Bonito

A Formação Rio Bonito começou a ser estudada amplamente a partir do final dos anos 90 sob a perspectiva da estratigrafia de sequências. Holz (1998) fez uma análise deposicional da Formação utilizando conceitos de estratigrafia de sequências. Esta análise foi feita com dados de testemunho e afloramento em uma escala de terceira ordem nos depósitos ocorrentes na porção sul do Estado do Rio Grande do Sul. Este trabalho ainda não usa os nomes das superfícies como apresentado aqui, mas separa os tratos de sistemas por superfícies de acordo com os conceitos da estratigrafia de sequências. Holz (2003) detalhou a estratigrafia de sequências aplicando o método em um sistema estuarino na Formação Rio Bonito. Estes trabalhos, do ponto de vista de estratigrafia de sequências, subdivem a Formação Rio Bonito em duas sequências deposicionais limitadas por discordâncias

regionais. Kuchle e Holz (2002) aplicaram a estratigrafia de sequências no Grupo Guatá com a finalidade de fazer a caracterização de reservatórios em multiescala. Este estudo foi feito na área de São Gabriel/RS e encontrou, assim como estudos anteriores, duas sequências de terceira ordem, mas também detalhou outras 13 sequências de ordem maior utilizando dados de testemunho. Portanto, a Formação Rio Bonito já tem sido local de estudos no que diz respeito à estratigrafia de sequências, no entanto, a formação ainda carece de estudos que descrevam os ciclos de mais alta frequência em escalas de quarta e quinta ordem. Pode-se destacar como um dos poucos trabalhos semelhantes o de Castro *et al.* (2005) que descreve ciclos TR no membro Triunfo inferior em depósitos fluvial-estuarinos e marinhos.

4 METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em três etapas: pré-campo, campo e pós campo.

4.1 Pré-campo

A fase de pré-campo consistiu de pesquisa na literatura nacional e internacional para abastecer o projeto com bases teóricas e práticas utilizadas no mundo todo. Além disso, o pré-campo consistiu na escolha dos dias, materiais e procedimento de coleta de dados que foi adotado.

4.1.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica foi realizada em todas as etapas do projeto. O enfoque principal desta etapa foi nos conceitos e técnicas utilizados pela estratigrafia de sequências no Brasil e no mundo. Compreendeu também um levantamento de trabalhos já realizados na Formação Rio Bonito.

4.2 Campo

A etapa de campo consistiu na coleta do dado. Foi realizada uma saída de campo com cinco dias de duração do dia 21/05 a 25/05. Nestes dias foram cobertos afloramentos nos arredores das cidades de Alfredo Wagner, Ituporanga e Vidal Ramos no Estado de Santa Catarina. Estes afloramentos foram descritos através do levantamento de perfis colunares na escala de 1:50 utilizando a técnica de análise de faciológica. Estes perfis colunares foram levantados utilizando-se folhas previamente montadas que organizam as informações necessárias, como na figura 7. Para aliar-se a descrição dos afloramentos, também foi descrito um testemunho de sondagem (7RL-04-SC.02) do Projeto Carvão Rio Laranjeiras utilizando-se dos

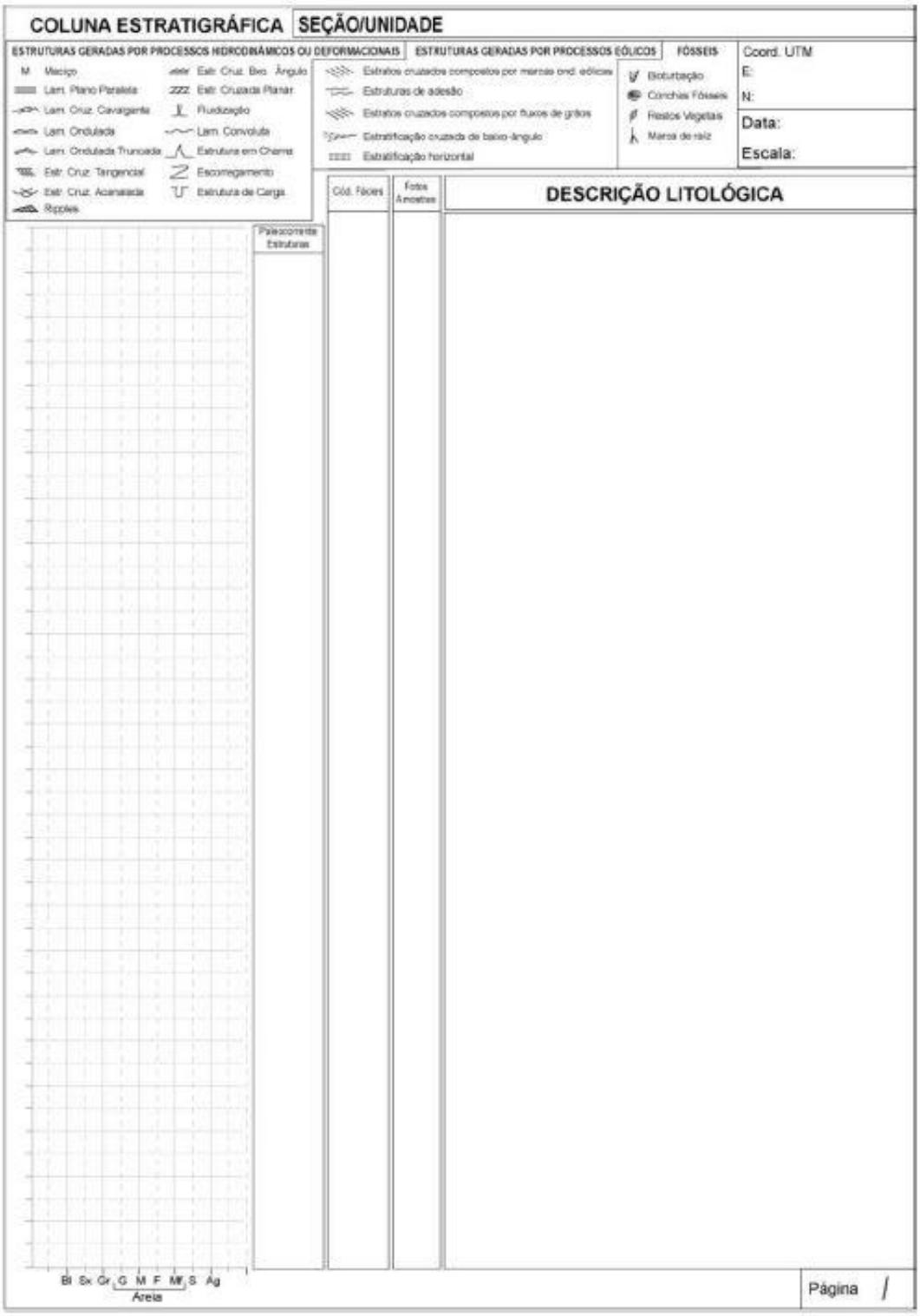
mesmos métodos de campo. Foram obtidas fotos em todos os afloramentos para a ilustração das fácies e montagem de fotomosaicos.

4.2.1 Análise Faciológica

Consiste em técnicas de levantamentos de perfil colunares, descrição de fácies, associações de fácies e, utilizando estes dados, interpretação de sistema deposicional. Os perfis são a expressão gráfica e simplificada das relações vistas em afloramento. Como podemos observar na figura 12, o eixo vertical representa a altura do afloramento, enquanto o eixo horizontal a granulometria, que varia de tamanho argila (< 0,004mm) a bloco (> 256mm). Isso permite diagramar com precisão a distribuição das litofácies, amostragem, fotos, fósseis e medidas de paleocorrente.

A definição das fácies é vital durante o levantamento de uma seção colunar, pois esta é a unidade que serve de base para as posteriores integrações. Segundo Tucker (2003), a descrição de fácies leva em consideração a litologia característica, texturas, estruturas sedimentares, presença ou ausência de fosseis, cor, geometria e paleocorrente. Sendo assim, será usado e adaptado o código de fácies proposto por Miall (1996) para sistemas fluviais (quadro 1).

Figura 12 - Base para perfil estratigráfico que foi utilizado no campo.



Quadro 1 - Código de fácies proposto por Miall (1996). A primeira letra, em maiúsculo, corresponde a granulometria do sedimento, a segunda letra, em minúsculo, corresponde à estrutura sedimentar.

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)
Gcm	Cascalho maciço clasto-suportado	-	Fluxo de detritos pseudoplástico (fluxo turbulento)
Gh	Cascalho clasto-suportado, acamadamento incipiente	Acamadamento horizontal, imbricamento	Formas de leito longitudinais, depósitos residuais (*lags*)
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 lingüóides
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 (*scour fills*), dunas atenuadas, antidunas
Ss	Areia fina a muito grossa (podendo ser cascalhosa)	Amplas e suaves depressões	Preenchimentos de suaves depressões (*scour fills*)
Sm	Areia fina a grossa	Maciça ou laminação indistinta	Depósitos de fluxos hiperconcentrados, fluidizações ou intensa bioturbação
Fl	Areia, site, 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 (*swamps*)
P	Paleossolo carbonático (calcita, siderita)	Feições pedogênicas: nódulos, filamentos	Solo com precipitação química

Fonte: Miall (1996).

Posteriormente, as fácies são agrupadas em associação de fácies que consistem em fácies geneticamente relacionadas que tem um significado paleoambiental, pois refletem a energia do ambiente que por sua vez associadas

refletem um contexto mais amplo. Esta informação é usada para a interpretação do sistema deposicional utilizando modelos de ambientes já conhecidos.

4.2.2 Fotomosaicos

Fotomosaico é a união de mais de uma fotografia de um alvo, neste caso afloramento, que não seria possível de fotografar em detalhe suficiente em apenas uma fotografia sem distorções. A junção de duas ou mais fotografias, assim como a tomada das fotos no campo, deve ser feita de maneira cuidadosa para que não apareçam distorções na hora da interpretação. Cuidados como distanciamento constante em relação ao alvo durante a tomada das fotos e utilização de softwares de correção e montagem que não decresçam a qualidade das fotos são essenciais. Também é importante o recobrimento de 30% da foto anterior para que as bordas, que possuem a maior distorção, sejam removidas. A confecção dos fotomosaicos se faz essencial para este tipo de trabalho, pois permite uma análise qualitativa das fácies de maneira lateral e sem distorções.

4.3 Pós-campo

No pós-campo foi realizada a digitalização e integração e interpretação dos dados obtidos nas etapas anteriores. Esta etapa começa com a digitalização dos perfis colunares com a utilização do software Adobe Ilustrator. Este software também foi utilizado para a confecção de quadros demonstrativos das fácies e associações de fácies. As fotos são tratadas com o software Adobe Photoshop que também é utilizado para a confecção dos fotomosaicos. A integração destas informações é feita com a confecção de painéis através dos mesmos softwares. Estes painéis tem o objetivo de sintetizar as informações relevantes de perfis e fotomosaicos juntamente com interpretações necessárias.

Com base nas informações digitalizadas e integradas, foram realizadas interpretações de acordo com os conceitos e técnicas da estratigrafia de sequências.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Analise Faciológica e Associação de Fácies

A partir do levantamento de seções colunares foi possível a identificação de 9 litofácies distintas, cujas descrições e interpretações são apresentadas no Quadro 2. Estas fácies foram agrupadas de acordo com sua ocorrência vertical e divididas em 3 associações de fácies: *shoreface* superior, *shoreface* inferior e canal fluvial com influência de maré.

Quadro 2 - fácies encontradas nos depósitos parálicos e marinho raso estudados.

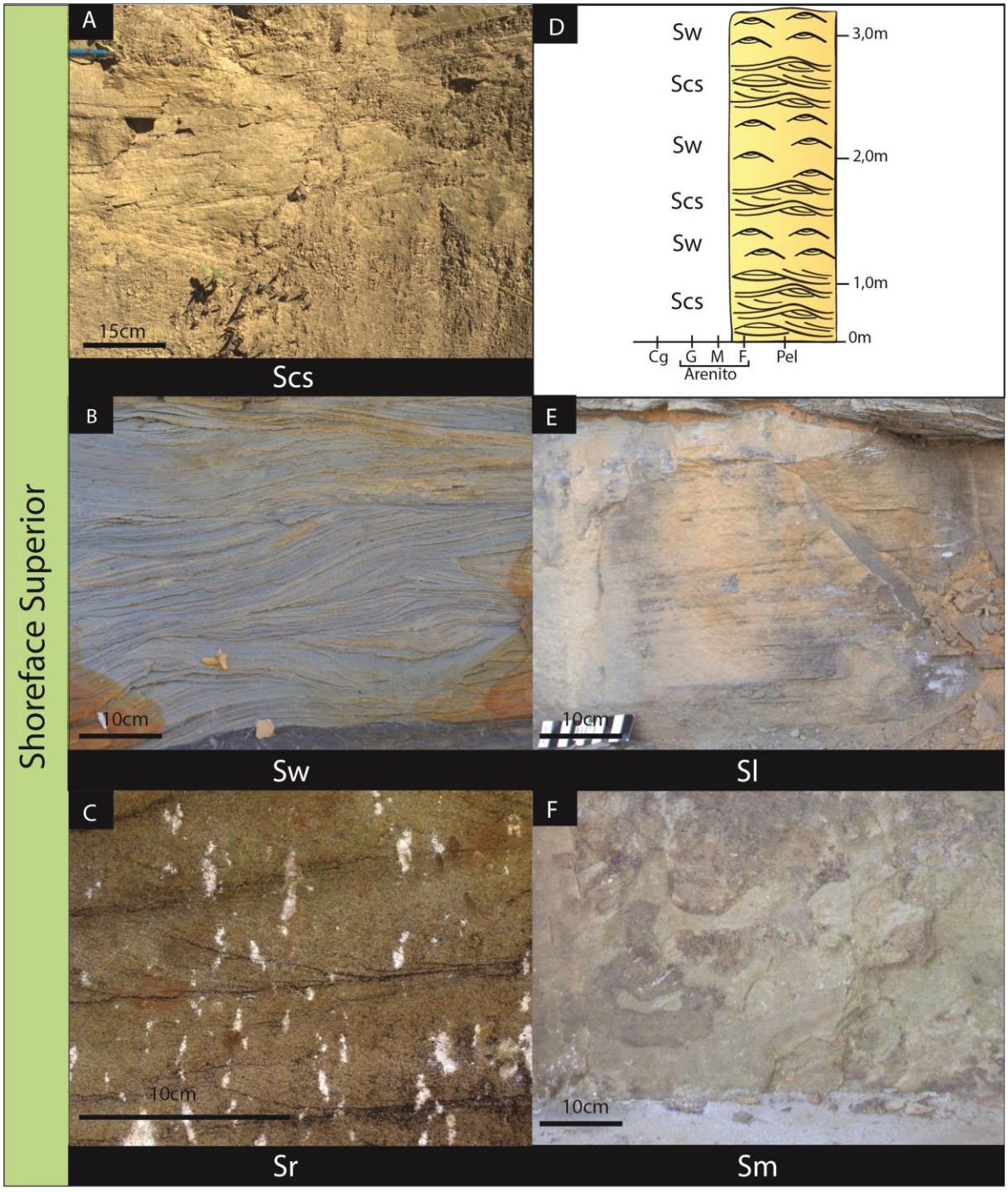
FÁCIES	DESCRIÇÃO	INTERPRETAÇÃO
Ht	Heterolitos Linsen, Wavy ou Flaser com intercalação centimétrica de Pelitos laminados e Arenitos muito finos, bem selecionados, com laminações onduladas truncadas de pequeno porte ou maciços. Podendo ocorrer laminações cruzadas de marcas onduladas subordinadamente. Frenquentemente com dobras convolutas. Podem ter bioturbação.	Depósito por decantação em ambiente subaquoso. Ripples de onda formadas por fluxos oscilatórios e subordinadamente, as ripples assimétricas formadas por fluxo trativo unidirecional sob regime de fluxo inferior em ambiente subaquoso.
Sw	Arenitos muito finos a médios, bem selecionados, com laminações onduladas truncadas de pequeno porte. Podem ter biortubação.	Marcas onduladas truncadas de pequeno porte formadas por fluxos oscilatórios em ambiente subaquoso.
Sr	Arenitos finos a médios, bem selecionados, com laminações cruzadas de marcas onduladas	Marcas onduladas subaquosoas em regime de fluxo inferior unidrecional
Sx	Arenitos muito finos a finos, bem selecionados, com estratificações cruzadas hummocky.	Fluxos oscilatórios de alta energia em ambiente subaquoso em eventos de tempestade.
Scs	Arenitos finos a médios, bem selecionados, com estratificações cruzadas swalley. Comprimento de onda maior que 1m.	Fluxos oscilatórios de alta energia em ambiente subaquoso na zona de atuação das ondas normais e em eventos de tempestade.
St	Arenitos médios a muito grossos, mal selecionados, com estratificações cruzadas tangenciais. Grânulos e intraclastos dispersos e com concentração nas bases dos sets.	Migração de dunas 3D com cristas sinuosas sob regime de fluxo inferior unidirecional em ambiente subaquoso
Stl	Arenitos médios a muito grossos, mal selecionados, com estratificações cruzadas tangenciais. Grânulos e intraclastos dispersos e com concentração nas bases dos sets. Lama marcando o sets e foresets	Migração de dunas 3D com cristas sinuosas sob regime de fluxo inferior unidirecional em ambiente subaquoso com períodos de decantação associados a ciclos de maré
Sl	Arenitos finos a médios bem selecionados, com laminações cruzadas de baixo ângulo. O topo e base dos sets pode ser ondulado.	Migração de formas de leito atenuadas sob regime de fluxo unidirecional transicional entre inferior e superior em ambiente subaquoso.
Sm	Arenitos finos a medios, maciços e fluidizados. Por vezes está bioturbado.	Fluxos hiperconcentrados, fluidizações, bioturbação e/ou perda de estrutura por intemperismo

5.1.1 Shoreface Superior

Descrição: Esta associação de fácies compreende camadas de arenitos muito finos a médios, bem selecionados, com laminações onduladas truncadas de pequeno porte (Sw). Também aparecem arenitos finos a médios com estratificações cruzadas *swalley* (Scs). Subordinadamente são encontrados arenitos finos a médios, bem selecionados, com laminações cruzadas de marcas onduladas (Sr), estratificações cruzadas de baixo ângulo (Sl) ou maciços (Sm). Estas distintas

litofácies se organizam em sucessões verticais de fácies sem uma variação granulométrica definida, com espessuras variando de 0,5 a 4,5 m. O contato da base com o *shoreface* inferior pode ser gradacional ou abrupto. Já o contato do topo normalmente é abrupto com depósitos de *shoreface* inferior sobrejacentes. A figura 13 mostra as fotos das fácies contidas nesta associação e uma seção colunar idealizada.

Figura 13 - Associação de fácies de *shoreface* superior. (A) Arenitos finos a médios, bem selecionados, com estratificações cruzadas *swalley*. (B) Arenitos muito finos a médios, bem selecionados, com laminações onduladas truncadas de pequeno porte. (C) Arenitos finos a médios, bem selecionados com ripples de corrente. (D) Sucessão vertical de fácies. (E) Arenitos finos a médios, bem selecionados, com estratificações cruzadas de baixo ângulo. (F) Arenitos finos a médios, bem selecionados, maciços.



Interpretação: As fácies Sw e Scs são interpretadas como fluxos dominantemente oscilatórios com aumento gradual de energia da primeira para a última (WALKER, 1992). As fácies Sr e Sl são interpretadas como fluxos trativos

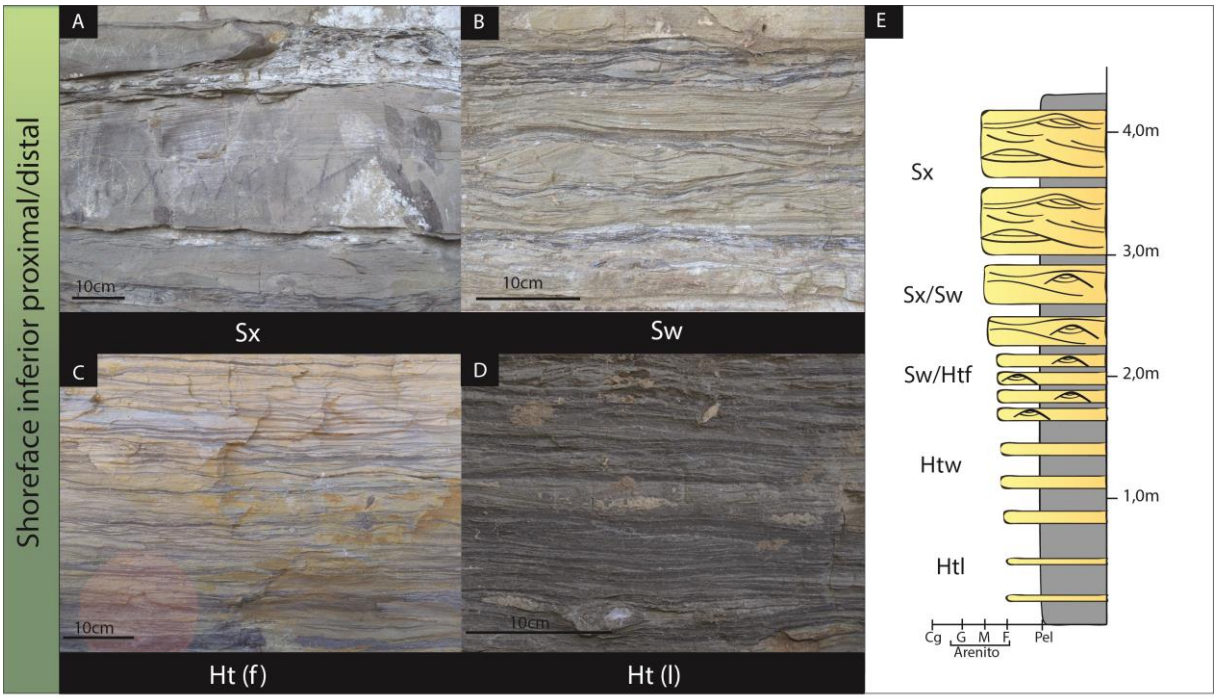
unidirecional induzidos pelas ondas, com energia variável (DUKE *et al*., 1991). A ausência de pelito e a dominância de fácies com estruturas sedimentares de fluxos oscilatórios indicam uma deposição no *shoreface* superior, na zona de atuação das ondas normais (WALKER, 1992).

5.1.2 Shoreface Inferior Proximal/Distal

Descrição: Esta associação de fácies compreende dominantemente heterolitos (Ht) com espessura variando de 0,1 a 2m. Estes heterolitos são compostos de arenitos muito finos a finos, bem selecionados, com laminações onduladas truncadas de pequeno porte intercalando em camadas centimétricas com pelitos laminados cinza escuros. Os heterolitos contém uma variação na proporção de pelito e areia formando acamamentos *linsen, wavy e flaser* (Ht l,w,f). Por vezes também ocorrem arenitos muito finos a finos, bem selecionados, com laminações onduladas truncadas de pequeno porte (Sw) e estratificações cruzadas *hummocky* (Sx). Esta associação de fácies compõem sucessões com espessuras variando de 0,5 a 3 metros com grano e estratocrescência ascendente ou descendente onde heterolitos com acamamento *linsen* (Htl) correspondem a maior quantidade de pelito e aqueles com acamamento *flaser* (Htf) juntamente com a fácies Sx correspondem a maior quantidade de areia. Não raramente o contato entre as camadas pelíticas e arenosas possui estruturas de carga (figura 14). O contato do topo e base ocorre com depósitos de *shoreface* superior, podendo ser gradual ou abrupto. A figura 15 mostra as fotos das fácies compreendidas nesta associação e uma seção colunar idealizada.

Figura 14: Detalhe da estrutura de carga comumente encontrada entre camadas pelíticas e arenosas.

Figura 15 - Associação de fácies de *shoreface* inferior. (A) Arenitos finos a médios, bem selecionados, com estratificações cruzadas *hummocky*. (B) Arenitos muito finos a médios, bem selecionados, com laminações onduladas truncadas de pequeno porte. (C) Heterolitos *flaser* com intercalações centimétricas de pelitos laminados e arenitos muito finos, bem selecionados, com laminações onduladas truncadas de pequeno porte. (D) Heterolitos *linsen* com intercalação centimétrica de pelitos laminados e arenitos muito finos, bem selecionados, com laminações onduladas truncadas de pequeno porte. (E) Sucessão vertical de fácies mostrando grano e estratocrescência ascendente.



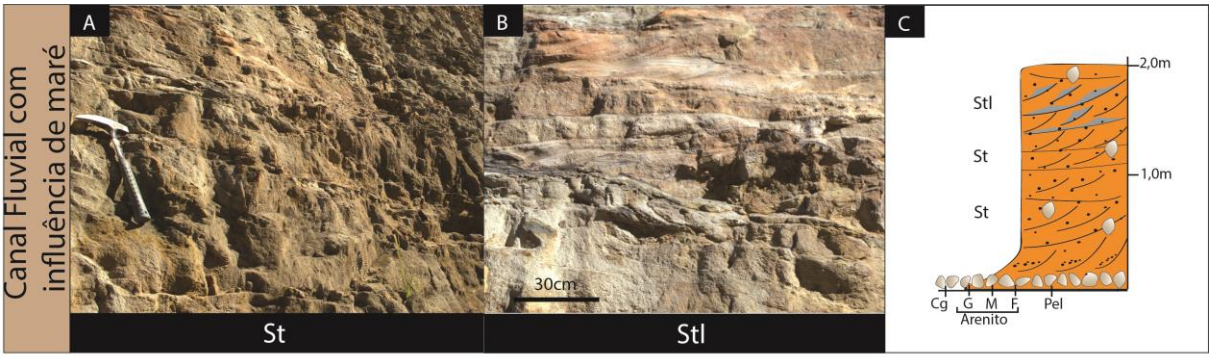
Interpretação: A fácies Sx é interpretada como correntes de fluxo dominantemente oscilatório devido a fortes ondas em eventos de tempestades (DUMAS; ARNOTT, 2006). A presença fácies Sx e camadas heterolíticas são interpretadas como uma variação entre processos trativos oscilatórios e decantação, sendo que a proporção entre areia e pelito reflete o grau de ação das ondas. Considerando a alternância entre fluxos oscilatórios e depósitos formados por decantação, esta associação de fácies foi formada entre a zona de ação das ondas normais e ondas de tempestade (WALKER, 1992). Para facilitar o entendimento da sucessão e dos ciclos, o *shoreface* inferior foi divido em *shoreface* inferior distal e *shoreface* inferior proximal. O proximal compreende uma parte do *shoreface* inferior onde as ondas de tempestade tem maior atuação e, portanto, é caracterizado por uma maior proporção de areia em relação a pelito, representado especialmente por heterolitos *wavy* (Htw) a *flaser* (Htf) e estratificação cruzada *hummocky* (Sx). Já o *shoreface* inferior distal é a parte com muito pouca ação de ondas de tempestade,

caracterizado por uma proporção maior de pelito em relação a areia representado por heterolitos *linsen* (Htl).

5.1.3 Canal Fluvial com Influência de Maré

Descrição: Esta associação de fácies compreende arenitos grossos a muito grossos, mal selecionados, com estratificações cruzadas tangenciais (St). Gradualmente em direção ao topo ocorrem estratificações cruzadas com drapes de lama ao longo dos *foresets* (Stl). Grânulos e seixos de intraclastos argilosos e quartzo encontram-se dispersos e em mais alta concentração na base da sucessão. Essa associação forma sucessão de fácies com granodecrescencia ascendente, com espessuras de aproximadamente 4 metros. O sentido predominante das paleocorrentes é para SE. O contato inferior é normalmente erosivo com o *shoreface* inferior distal. A figura 15 mostra a foto das fácies compreendidas nesta associação e uma seção colunar idealizada.

Figura 16 - Associação de fácies de canal fluvial. (A) Arenitos médios a muito grossos, mal selecionados, com estratificações cruzadas tangenciais. (B) Arenitos médios a grossos, mal selecionados, com estratificações cruzada tangenciais com drapes de lama nos *sets* e *foresets*. (C) Sucessão vertical de fácies.



Interpretação: A ocorrência de depósitos de areia grossa a muito grossa, seleção baixa, migração de dunas 3D subaquosas, formando sucessões com granodecrescência ascendentes limitadas na base por superfícies erosivas sugere canais fluviais. Os intraclastos e grânulos dispersos são interpretados como produtos de erosão por fluxos de alta magnitude (MIALL, 1977). O predomínio de paleocorrentes para SE, indica uma área fonte posicionada a NW. Entende-se que os *drapes* de lama são formados em momentos de decantação. Logo, esta parte da

sucessão possui processos predominantemente fluviais, como os descritos anteriormente, mas a presença destes *drapes* de lama nos *foresets* evidência uma corrente subordinada, que causa a deposição de lama em períodos de energia resultante nula (WALKER, 1992), indicando a influência de maré.

5.2 Anatomia de Ciclos de Alta Frequência

Segundo Zecchin (2007) é possível observar três anatomias de ciclos de alta frequência relacionados a movimentação da linha de costa em contexto marinho raso e parálicos, definidos como tipo R, T-R e T. Na seção estudada existe a predominância de ciclos R. Ciclos T-R também estão presentes e ciclos T não foram encontrados. No entanto, os ciclos R possuem variação na sua anatomia interna sendo possível a subdivisão em três subtipos distintos. O quadro a seguir mostra um resumo dos ciclos encontrados (considerando 34 ciclos de alta frequência) mostrando sua abundância nos depósitos estudados, padrão de empilhamento, superfícies estratigráficas e tratos de sistemas.

Quadro 3: Resumo dos ciclos encontrados considerando sua abundância nos depósitos estudados e suas características como padrão de empilhamento, superfícies estratigráficas e tratos de sistemas.

Ciclo	Abundância	Padrão	Superfícies	Tratos
R - 1	64%	Prog.	SRM SIM	TSNA
R - 2	11%	Prog.	SRM SIM SERM	TSNA TSEQ
R - 3	11%	Prog.	SRM SIM DS	TSNA TSNB
TR	14%	Prog. Retro.	SRM SIM	TST TSNA

5.2.1 Ciclos R – Tipo 1

Descrição: os ciclos R – tipo 1 possuem padrão progradacional, com espessuras variando de 1,0 a 4,0 metros. Como mostra o exemplo das figuras 17 e 18, estes ciclos constituem-se predominantemente do empilhamento da associação de fácies de *shoreface* inferior distal na base, *shoreface* inferior proximal na porção intermediária e *shoreface* superior no topo, definindo um trato de sistemas de nível alto. Os ciclos R – tipo 1 são limitados pela SRM. De maneira geral, os ciclos R estudados são sucedidos por outros ciclos R, sem a presença de um TST. Portanto, a SRM e a SIM vão estar na mesma posição como mostram as figuras 17 e 18.

Figura 17 - Painel com um exemplo representativo dos ciclos R – tipo 1. (A) Fotomosaico correspondente às alturas 21 a 26m do afloramento RB_05 (apêndice 1). (B) Seção colunar extraído do perfil RB_05 com superfícies e tratos de sistemas. (C) Gráfico representando a evolução da razão A/S do ciclo.

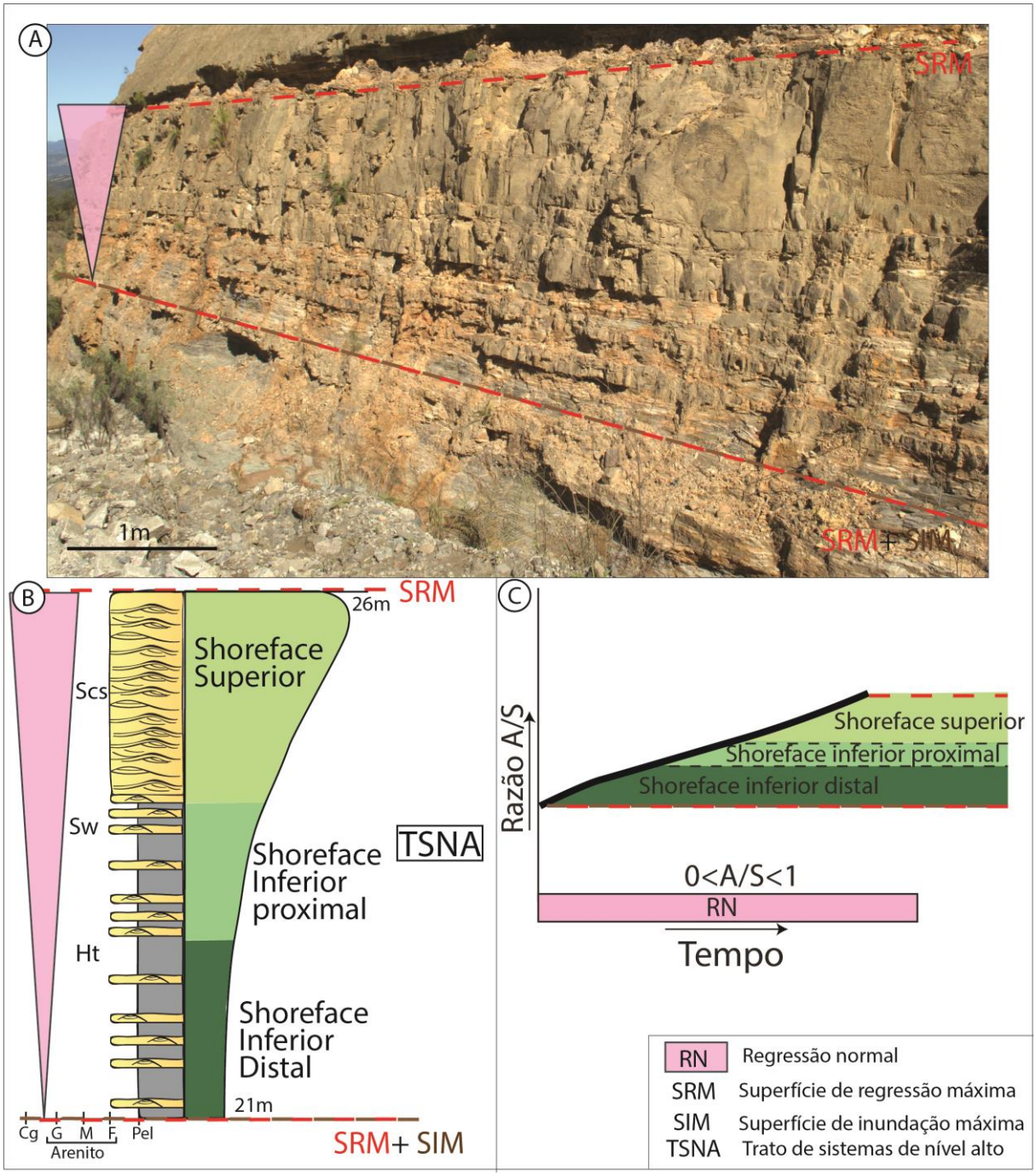
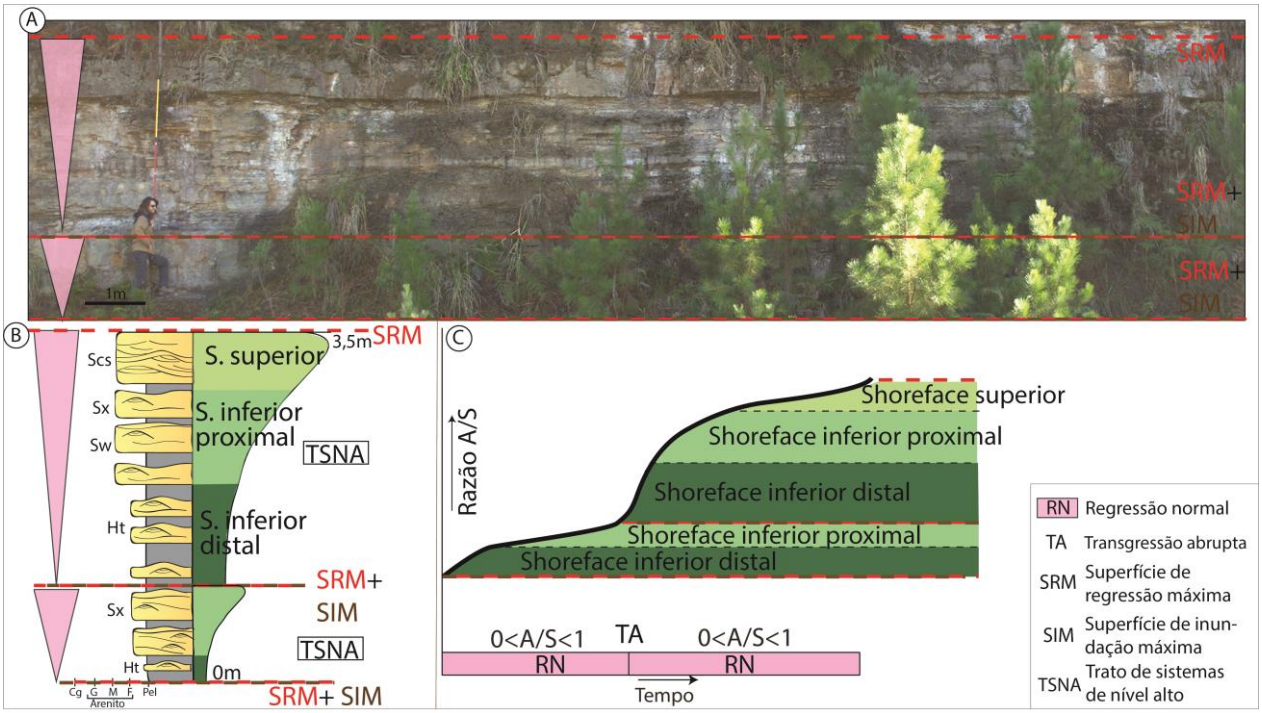


Figura 18 - Painel com um exemplo representativo dos ciclos R – tipo 1 mostrando dois ciclos seguidos. (A) Foto-mosaico correspondente as alturas 0 a 3,5m do afloramento RB_03 (apêndice 1). (B) Seção colunar extraída do perfil RB_03 com superfícies e tratos de sistemas. (C) Gráfico representando a evolução da razão A/S durante dois ciclos seguidos.



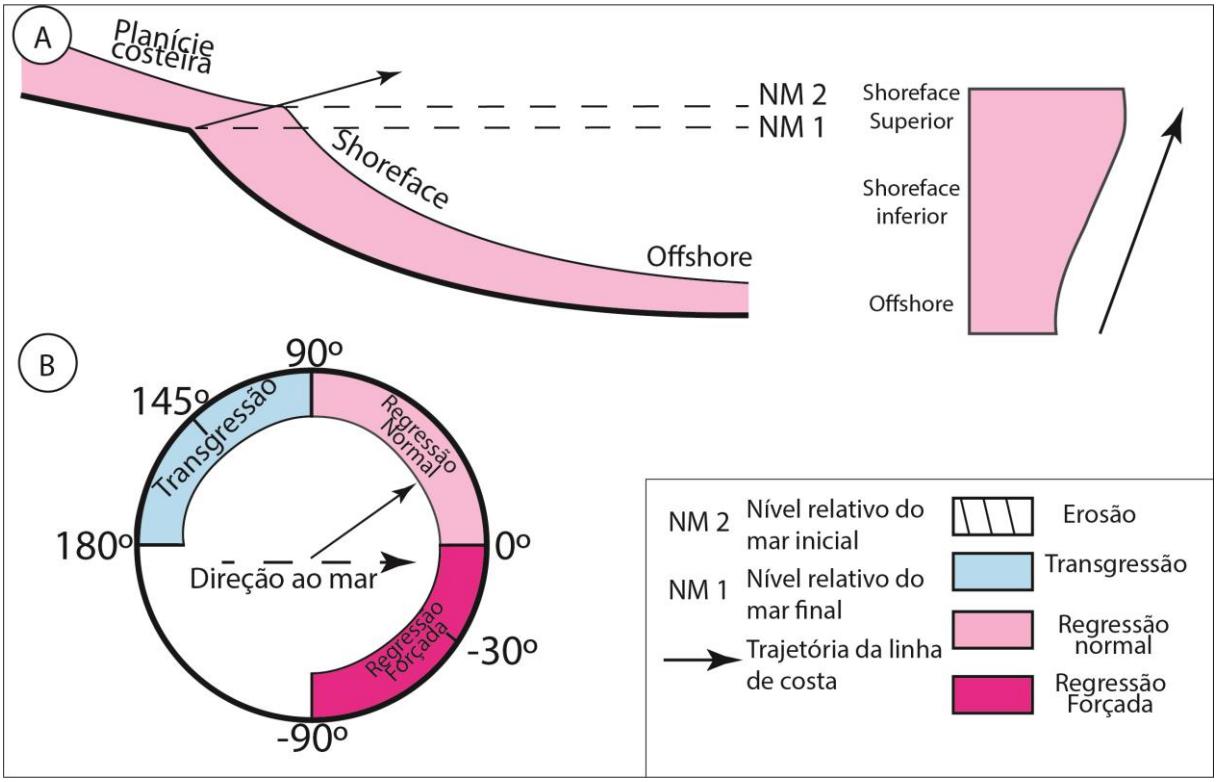
Interpretação: Os ciclos R - tipo 1 são formados a partir de uma regressão normal, criando um trato de sistemas de nível alto, onde a razão A/S é menor que um e maior que 0, ou seja, não há rebaixamento do nível relativo do mar (ZECCHIN, 2007). O TST não está representado, sendo assim, como podemos observar na figura 18C, a fase transgressiva, onde A/S > 1 deve ter sido geologicamente rápida e assim não preservando depósitos.

As condições para a formação e preservação dos ciclos R podem nos dizer características da costa como gradiente topográfico, relevo e posicionamento do depósito em relação a linha de costa. Os ciclos R – tipo 1 indicam situação mais suave de gradiente topográfico. Gradientes topográficos suaves são associados a depósitos transgressivos inexistentes ou pouco espessos, pois a subida do nível do mar é muito rápida, predominando erosão (CATTANEO; STEEL, 2003). Além disso, durante a fase regressiva pequenos gradientes associados a altas taxas de sedimentação e pequenas taxas de acomodação geram retração da linha de costa juntamente com espessas acumulações de sucessões progradacionais. Aliado a isto, a grande predominância de ciclos R – tipo 1 em todos os afloramentos estudados, como podemos ver no apêndice 1, leva-nos a interpretar que o

posicionamento destes ciclos são mais distais em relação linha de costa, onde depósitos regressivos são normalmente melhor preservados e depósitos transgressivos em contexto de alta sedimentação costumam ter falta de sedimentos (ZECCHIN, 2007).

Com base nas interpretações feitas acima é possível interpretar uma trajetória da linha de costa (Figura 19). A trajetória da linha de costa é definida como “o caminho de migração da linha de costa ao longo de seu mergulho em relação ao nível relativo do mar” (HELLAND-HANSEN; GJELBERG, 1994). Ciclos R - tipo 1 estão associados a contextos de regressão normal e A/S menor que 1 e maior que 0. Ou seja, ocorre uma subida do nível relativo (figura 19A) do mar em uma taxa menor que o influxo sedimentar, descrevendo uma trajetória da linha de costa entre 0° e 90° (Figura 19B).

Figura 19 - Trajetória de uma linha de costa regressiva sendo representada pela sua inclinação em relação a horizontal. (A) Perfil de uma planície costeira e plataforma hipotética com a trajetória da linha de costa. (B) Trajetória da linha de costa em relação ao nível relativo do mar.



Fonte: Modificado de Zecchin (2007).

5.2.2 Ciclos R – Tipo 2

Descrição: Os ciclos R - Tipo 2 possuem padrão progradacional e espessuras variando de 1,5 a 4,0 metros. Conforme as figuras 20 e 21, os ciclos R – tipo 2 são limitados pela SRM. A ausência do TST faz com que subsequentes SIM coincida com a SRM. A porção inferior do ciclo é marcada por depósitos de shoreface inferior distal, que apresenta uma sutil tendência progradacional, marcada por heterolitos do tipo *linsen* na base, que passa verticalmente para heterolitos do tipo *wavy*, definindo um TSNA. O topo do *shoreface* inferior distal é limitado por um contato abrupto com o *shoreface* superior. Este contato é definido como uma SERM, marcando o início do TSEQ.

Figura 20 - Painel com um exemplo representativo de um ciclo R – tipo 1 (base) seguido por um ciclo R – tipo 2 (topo). (A) Fotomosaico correspondente as alturas 3 a 7,5m do afloramento RB_03. (B) Perfil estratigráfico extraído do perfil RB_03 juntamente com tratos de sistemas e superfícies estratigráficas. (C) Gráfico representando a evolução da razão A/S durante os dois ciclos R representados.

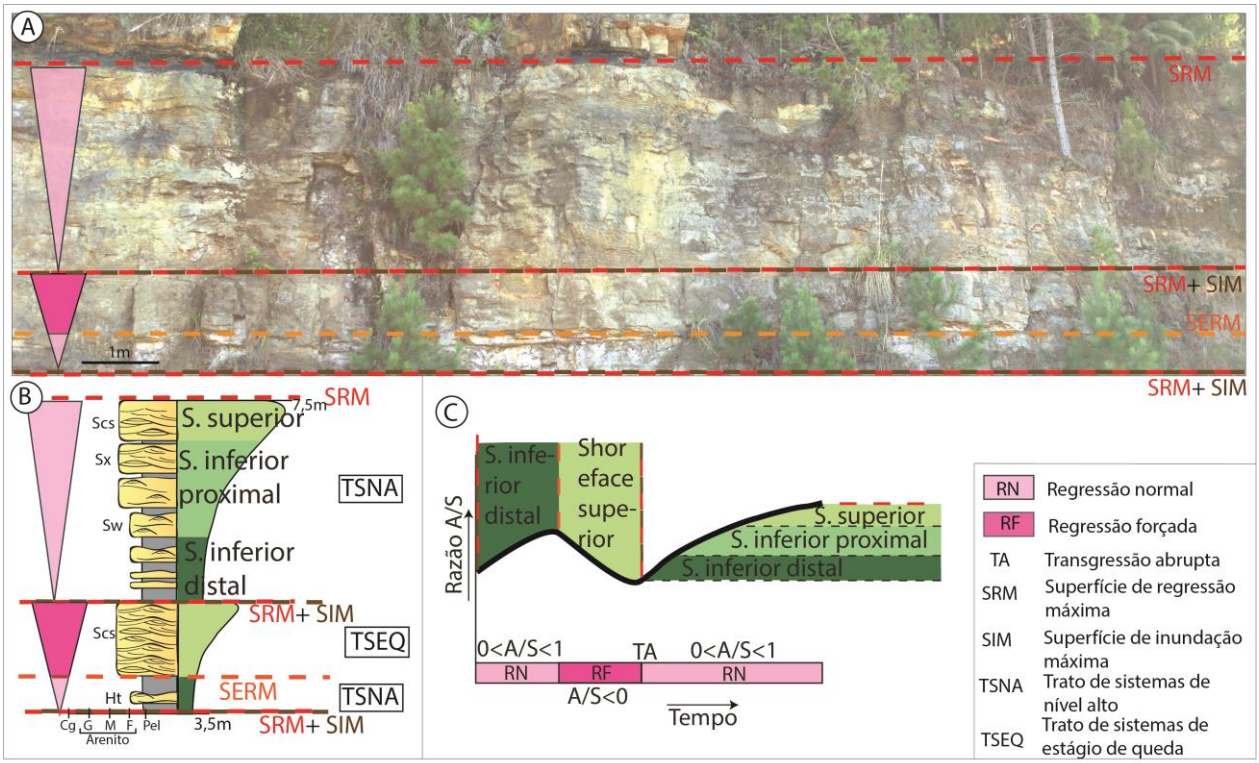
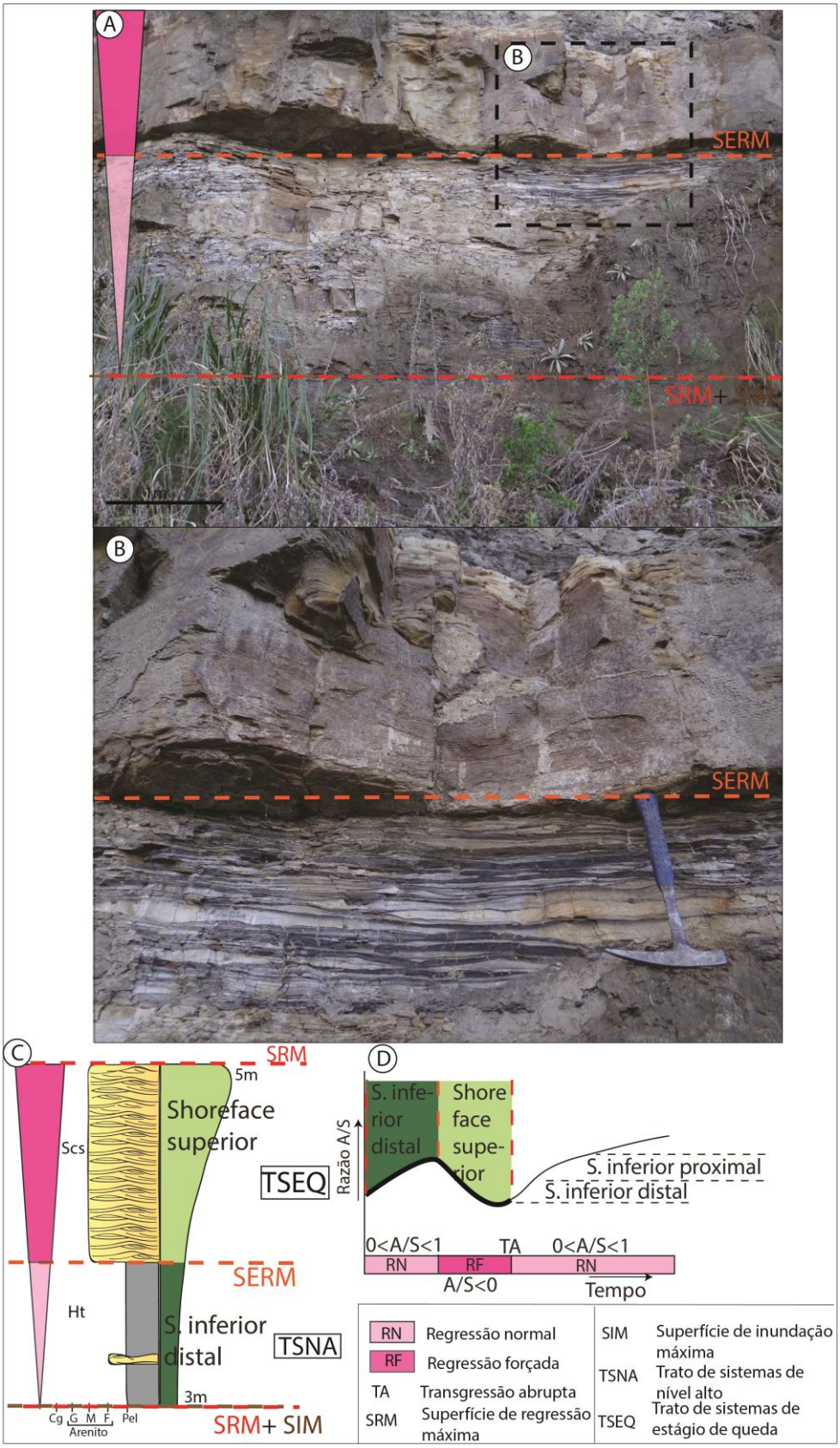


Figura 21: Detalhe do painel da Figura 20 ilustrando o Ciclo R – tipo 2. (A) Fotomosaico correspondente as alturas 3 a 5m do afloramento RB_03. (B) Detalhe da superfície erosiva de regressão marinha (SERM). (C) Perfil estratigráfico extraído do perfil RB_03 juntamente com tratos de sistemas e superfícies estratigráficas. (D) Gráfico representando a evolução da razão A/S.

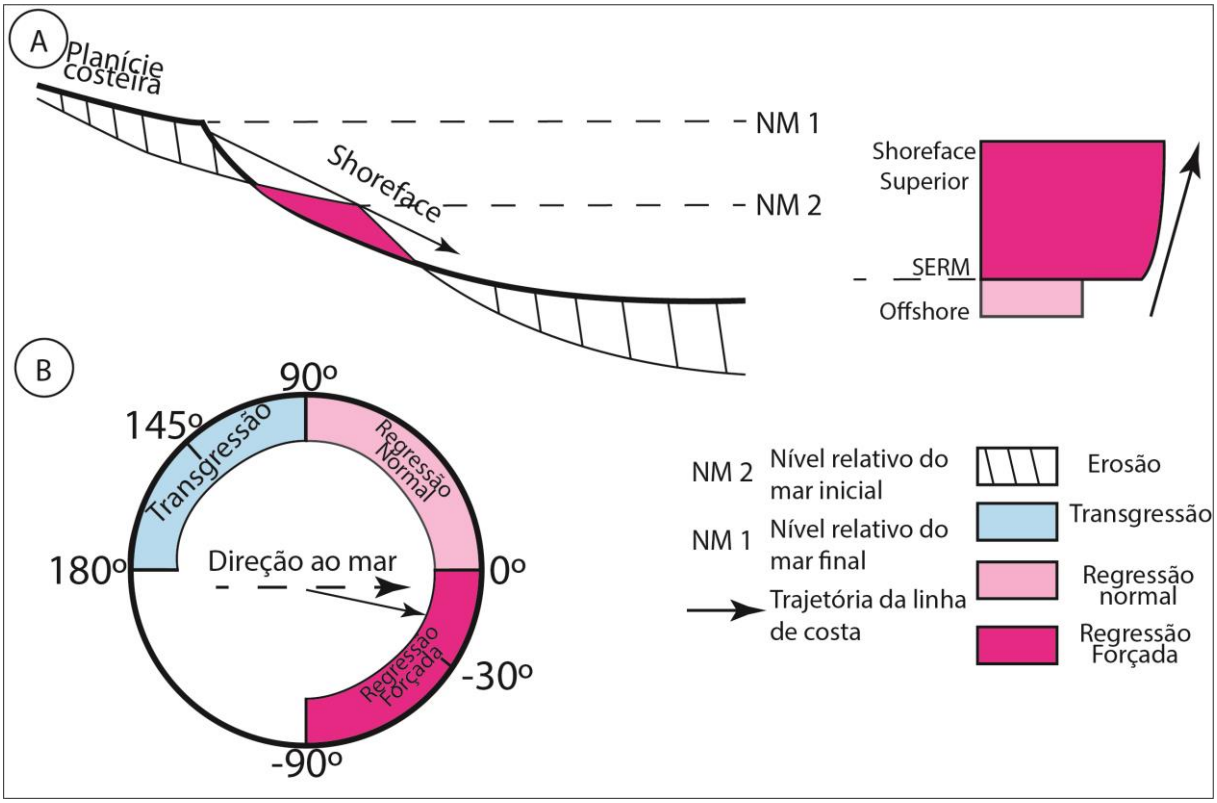


Interpretação: Os ciclos R - tipo 2 estão associados a uma regressão normal seguida de uma regressão forçada. A regressão normal ocorre durante o TSNA, onde a razão A/S é menor que um e maior que 0, e segue até a SERM. Conforme as figuras 20C e 21D, a partir desta superfície ocorre uma mudança na razão A/S que passa a ser menor que 0 resultando em um rebaixamento da linha de costa. Assim como nos ciclos R - tipo 1, o TST não é representado, sendo assim a transgressão entre um ciclo R e outro deve ter sido abrupta, não preservando depósitos, fazendo com que a SIM coincida com a SRM.

As informações no que dizem respeito a gradiente topográfico, relevo e posicionamento em relação a linha de costa são similares aos ciclos R – tipo 1. Por sua vez, destaca-se que ciclos R – tipo 2 também formam-se mais facilmente em contextos de gradiente topográfico suave. Gradientes topográficos suaves necessitam de rebaixamento do nível relativo do mar menos acentuados para a formação da SERM e iniciar a deposição de depósitos de regressão forçada.

Entretanto, a trajetória da linha de costa dos ciclos R – tipo 2 difere-se daquelas de ciclos R – tipo 1. Como já definido, ciclos R – tipo 2 estão associados a contextos de regressão forçada, onde A/S < 0. Sendo assim, podemos observar na figura 22A que um rebaixamento da linha de costa associado a perda de acomodação e erosão deve ter ocorrido. Tendo isso em vista, conforme figura 22B, podemos perceber que a trajetória da linha de costa que reflete estes processos está entre 0° e -30°.

Figura 22: Trajetória de uma linha de costa regressiva com rebaixamento sendo representada pela sua inclinação em relação a horizontal. (A) Perfil de uma planície costeira e plataforma hipotética com a trajetória da linha de costa. (B) Trajetória da linha de costa em relação ao nível relativo do mar.

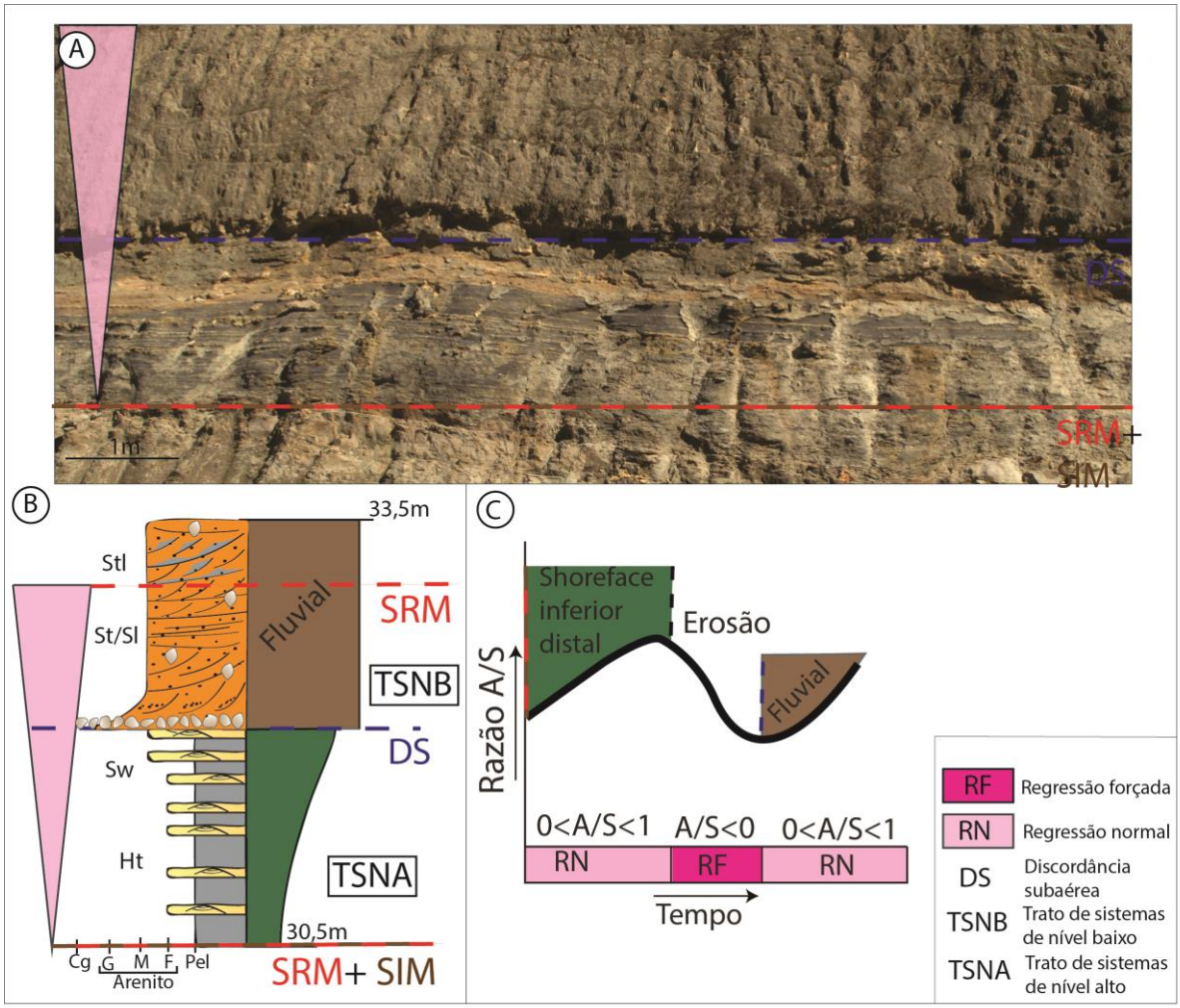


Fonte: modificado de Zecchin (2007).

5.2.3 Ciclos R - Tipo 3

Descrição: Os ciclos R – tipo 3 também possuem padrão progradacional, sendo limitados no topo e na base pela SRM (Figura 23). No topo, a SRM é marcada pelo aparecimento de fácies de maré. A ausência do TST faz com que ocorra uma coincidência entre a SRM e SIM. A porção inferior do ciclo é marcado por depósitos de *shoreface* inferior distal, que também apresenta uma sutil tendência progradacional marcada por heterolitos do tipo *linsen* gradando verticalmente para heterolitos do tipo *wavy*, definindo um TSNA. O topo do *shoreface* inferior é limitado por um contato abrupto e erosional com as areias grossas e mal selecionadas da associação de fácies fluvial. Este contato representa a DS e marca o início do TSNB.

Figura 23 - Painel com um exemplo representativo dos ciclos R – tipo 3. (A) Fotomosaico correspondente as alturas 30,5 a 33,5m do afloramento RB_05. (B) Gráfico representando a evolução da razão A/S durante o ciclo R representado. (C) Seção colunar extraída do perfil RB_05.



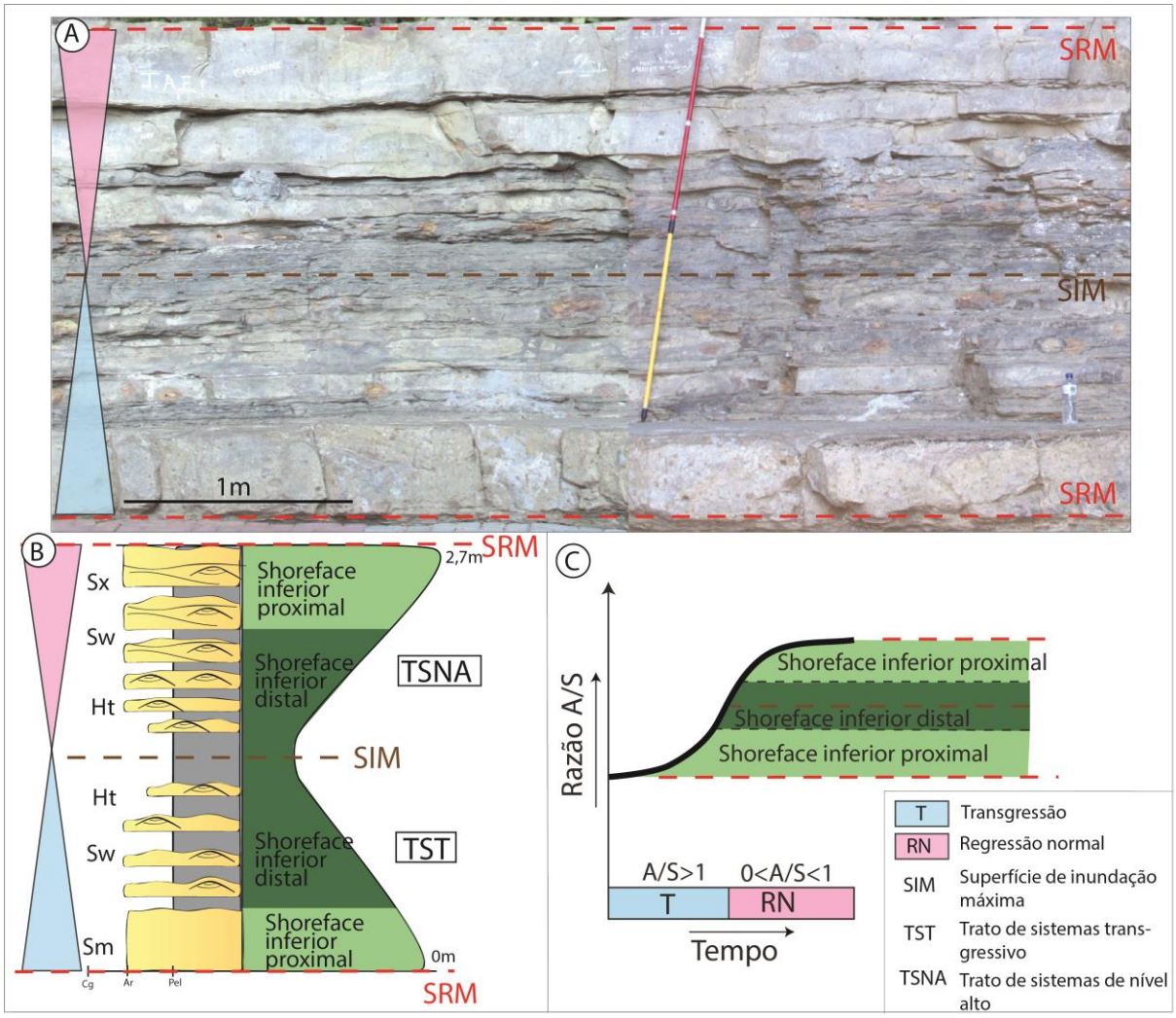
Interpretação: Os ciclos R - tipo 3 estão associados a uma regressão normal seguida de uma regressão forçada e novamente uma regressão normal. A primeira regressão normal ocorre durante o TSNA, onde a razão A/S é menor que 1 mas maior que 0, e segue até DS. A partir desta superfície a razão A/S passa a ser menor que 0 ocasionando uma regressão forçada (Figura 23C). Acima da DS estão os depósitos fluviais em um contexto de regressão normal do TSNB que seguem até o aparecimento de feições de maré que indicam o início de uma transgressão.

No que diz respeito as características da costa e trajetória da linha de costa, este tipo de ciclo não difere-se dos ciclos R- tipo 2. Isto se deve pelo fato de que este ciclo é uma continuação da regressão forçada e, portanto, compartilha de suas características.

5.2.4 Ciclos TR

Descrição: Os ciclos TR possuem padrão retrogradacional seguido por um padrão progradacional, com espessuras variando de 1,0 a 4,0 metros. A parte retrogradacional do ciclo é limitada na base pela SRM e no topo pela SIM (Figura 24). Esta parte do ciclo é composta do *shoreface* inferior proximal seguido pelo distal, formando um trato de sistemas transgressivo. Acima da SIM, ocorre a parte progradacional do ciclo que é limitada no topo pela SRM. Esta parte do ciclo é formada pela continuação do *shoreface* inferior distal seguido pela sobreposição do proximal, formando um trato de sistemas de nível alto.

Figura 24 - Painel com um exemplo representativo dos ciclos TR encontrados. (A) Fotomosaico correspondente as alturas 0 a 2,7m do afloramento RB_02 (apêndice 1). (B) Gráfico representando a evolução da razão A/S durante os ciclos TR representados. (C) Perfil estratigráfico extraído do perfil RB_02.

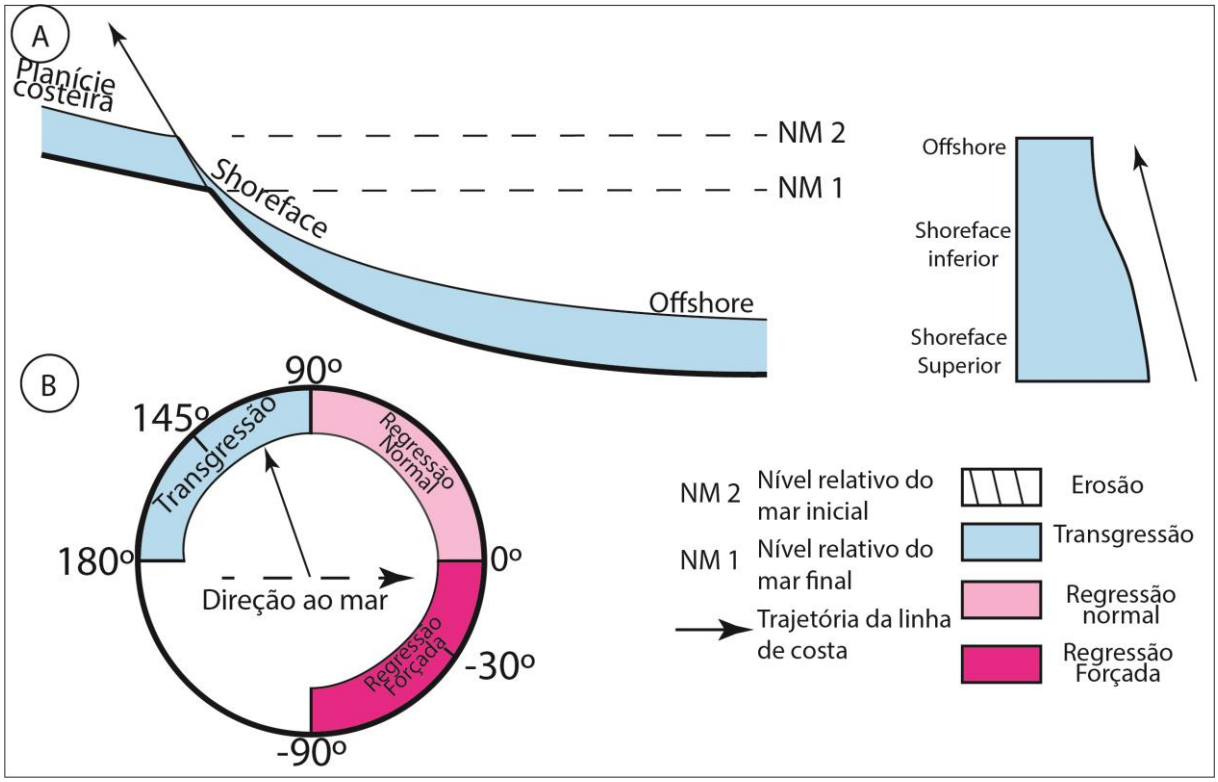


Interpretação: Os ciclos TR estão associados a uma transgressão seguida de uma regressão normal. A transgressão ocorre durante o TST, onde a razão A/S é maior que 1, representando uma subida do nível relativo do mar. A SIM limita a fase transgressiva e marca o início da regressão normal e um trato de sistemas de nível alto onde a razão A/S passa a ser menor que 1 e maior que 0 (Figura 24C).

O gradiente topográfico de ciclos TR difere-se daquele dos ciclos R. A acumulação de espessos depósitos transgressivos sugere um substrato com altos gradientes topográficos (HELLAND-HANSEN; MARTINSEN, 1996). Sendo assim, em relação a ciclos predominantemente R, os ciclos TR devem ter um gradiente topográfico mais alto. Sendo assim, a formação de ciclos TR está associada a provável existência de um acidente geográfico que cria um relevo acidentado.. Provavelmente, os ciclos TR ocupam uma posição mais proximal em relação a linha de costa do que os ciclos R. Isto deve-se ao fato de que margens da bacia possuem taxas de sedimentação mais alta durante transgressões em relação a partes mais distais, levando a uma maior deposição de depósitos transgressivos (ZECCHIN, 2007).

A trajetória da linha de costa em ciclos TR possui a metade R idêntica a ciclos R – tipo 1, estando direcionada entre 0° e 90°. Por sua vez, podemos observar na figura 24C que o intervalo transgressivo do ciclo está associado a taxa de subida do nível relativo do mar maior eu a taxa de influxo sedimentar, ou seja, A/S > 1. Desta forma, conforme figura 25A e B, a trajetória da linha de costa neste intervalo deve ser entre 90° e 135 °. Contextos entre 135º e 180º acarretariam em uma trajetória da linha de costa que gerariam superfícies de ravinamento (SR) erodindo os depósitos transgressivos, mas este tipo de superfície não foi vista nestes depósitos.

Figura 25 - Trajetória de uma linha de costa transgressiva com rebaixamento sendo representada pela sua inclinação em relação a horizontal. (A) Perfil de uma planície costeira e plataforma hipotética com a trajetória da linha de costa. (B) Trajetória da linha de costa em relação ao nível relativo do mar.



Fonte: modificado de Zecchin (2007).

6 CONCLUSÕES

- Foram identificadas 9 litofácies, sendo uma heterolítica e 8 arenosas.

- A partir da relação genética entre as litofácies, três associações de fácies foram identificadas: *shoreface* superior, *shoreface* inferior e canal fluvial. O *shoreface* inferior pode ser dividido em duas subassociações de fácies, uma proximal e outra distal.

- Utilizando a análise dos perfis estratigráficos, padrões de empilhamento, superfícies estratigráficas e tratos de sistemas foram identificados. Utilizando-se destas informações, anatomias de ciclos de alta frequência foram definidas e interpretadas com base em transgressões, regressões, razão A/S, mecanismos influenciadores e trajetórias de linha de costa

- As anatomias identificadas foram separadas em ciclos R e ciclos TR, sendo que os ciclos R possuem 3 tipos, de acordo com suas características internas. A figura 26 resume as anatomias dos ciclos encontrados.

- Ciclos R – tipo 1 (figura 26A) são os mais abundantes na seções estudadas e são limitados pela SRM e compostos por um TSNA ($0 < A/S < 1$). Possuem um contexto paleoambiental de gradiente topográfico suave e um posicionamento mais distal em relação a linha de costa. A trajetória da linha de costa que melhor descreve este contexto está em 0° e 90°.

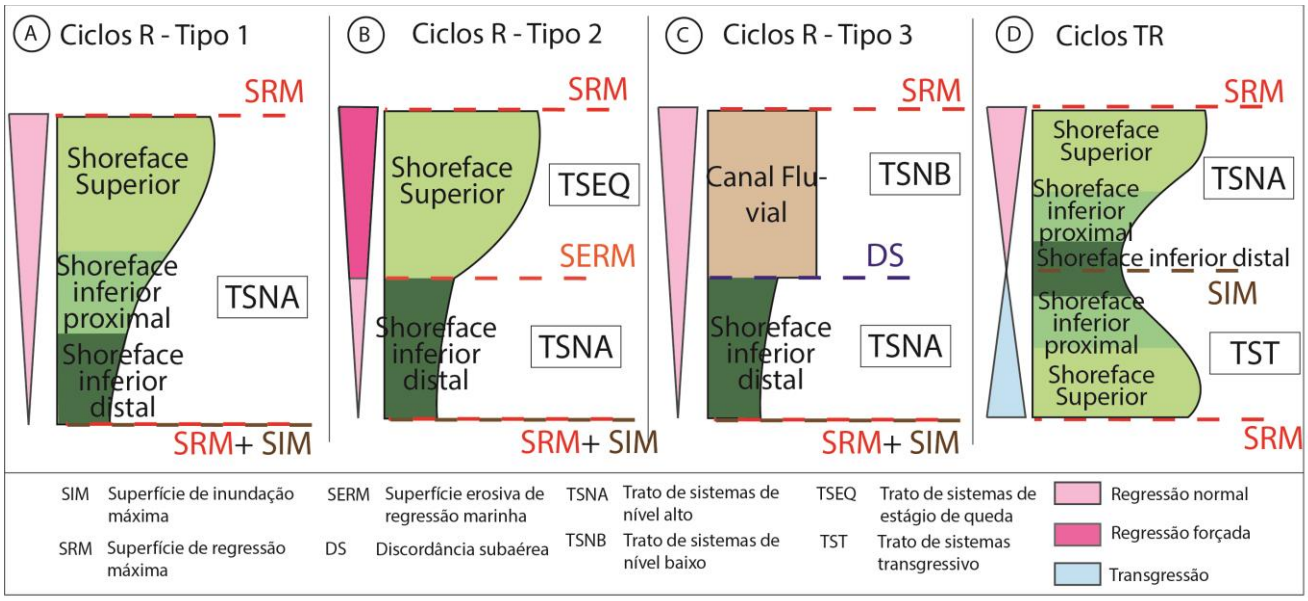
- Ciclos R – tipo 2 (figura 26B) são limitados pela SRM e compostos por um TSNA ($0 <A/S < 1$) seguido por um TSEQ ($A/S < 0$) separados pela SERM. Possuem um contexto paleoambiental igual ao tipo 1, mas a trajetória de linha de costa que melhor descreve este contexto está entre 0° e -30°.

- Ciclos R – tipo 3 (figura 26C) são limitados pela SRM e compostos por um TSNA ($0 < A/S < 1$) seguido por um TSNB ($0 < A/S < 1$) separados pela DS.

Possuem um contexto paleoambiental igual ao tipo 1 e 2 e a trajetória de linha de costa que melhor descreve esta contexto é semelhante ao tipo 2.

- Ciclos TR (figura 26D) são limitados pela SRM e compostos por um TST (A/S > 1) seguido por um TSNA (0 <A/S < 1) separados pela SIM. Possuem um contexto paleoambiental de gradiente topográfico mais alto que o anteriores, provável existência de acidentes geográficos como incisões fluviais, além de um posicionamento mais proximal em relação a linha de costa. A trajetória que melhor descreve este contexto está entre 0° e 90° durante a regressão e 90° e 135° durante a transgressão.

Figura 26 – Resumo dos 4 tipos de ciclos encontrados. (A) Ciclos R - tipo 1 possuem padrão de empilhamento progradacional, são limitados pela SRM e são compostos de um TSNA. (B) Ciclos R – tipo 2 possuem um padrão de empilhamento progradacional, são limitados pela SRM e são compostos por um TSNA seguido por um TSEQ separados pela SERM. (C) Ciclos R – tipo 3 possuem um padrão de empilhamento progradacional, são limitados pela SRM e compostos por um TSNA seguido por um TSNB separados pela DS. (D) Ciclos TR possuem um padrão de empilhamento retrogradacional seguido por um padrão progradacional de espessuras semelhantes, são limitados pela SRM e são compostos de um TST seguido por um TSNA separados pela SIM.



REFERÊNCIAS

CASTRO J.C., WEINSCHUTZ L.C., CASTRO M.R. Estratigrafia de Seqüências das formações Taciba e Rio Bonito (Membro Triunfo) na região de Mafra/SC, leste da Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 13, p. 27-42, 2005.

CATTANEO, A.; STEEL, R. J. Trangressive deposits: a review of theis variability. **Earth-Science Reviews**, v. 62, p. 187–228, 2003.

CATUNEANU, O. **Principles of Sequence Stratigraphy**. Elselvier, Canadá, 1ª ed., 375 p., 2006.

CATUNEANU, O. *et al*. Towards the standardization of sequence stratigraphy. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 92, n. 1–2, p. 1–33, 2009.

CATUNEANU, O; ZECCHIN, M. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves II: Controls on sequence development. **Marine and Petroleum Geology**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 26–38, 2013.

DUKE, W. L., ARNOTT, R. W. C., CHEEL, R. J. Shelf sandstones and hummocly cross-stratification: new insights on a stormy debate. **Geology**, v. 19, p. 626–628, 1991.

DUMAS, S., ARNOTT, R.W.C. Origin of hummocky and swaley cross-stratification – the controlling influence of unidirectional current strength and aggradation rate. **Geology**, v. 34, p. 1073-1076, 2006.

GALLOWAY, W.E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis, I. Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin,** v. 73, p. 125-142, 1989.

HELLAND-HANSEN, W., GJELBERG, J. Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy: a differente perspective: **Sedimentary Geology**, v. 92. p. 31-52, 1994

HELLAND-HANSEN, W.; MARTINSEN, O. Shoreline trajectories and sequences: description of variable depositional-dip scenarios. **Journal of Sedimentary Research** v. 66, 670-688, 1996.

HOLZ, M. The Eo-Permian coal seams of the Parana Basin in southernmost Brazil: an analysis of the depositional conditions using sequence stratigraphy concepts. **International Journal of Coal Geology**, [s. l.], v. 36, n. 1–2, p. 141–163, 1998.

HOLZ, M. Sequence stratigraphy of lagoonal esturine system – an example from the lower Permian Rio Bonito Formation, Parná Basin, Brazil. **Sedimentary Geology**, Amsterdam 162 (3-4), 301-327, 2003

HOLZ, M. *et al*. Hierarchy of tectonic control on stratigraphic signatures: Base-level changes during the Early Permian in the Parana Basin, southernmost Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [s. l.], v. 22, n. 3–4, p. 185–204, 2006.

JERVEY, M. Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression, **Wilgus, C.K., Hasting, B.S., Kendall, C.G.St.C, Posamentier, HW, Ross, CA, and Van Wagoner, JC, eds., Sea-level changes: an integrated approach: Tulsa, OK, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication,** v. 42, p. 47-69, 1988.

JOHNSON, J.; MURPHY, M. Time-rock model for Siluro-Devonian continental shelf, western United States. **Geological Society of America Bulletin 95**, p. 1349-1359, 1984.

KÜCHLE, J.; HOLZ, M.. Aplicação da Estratigrafia de Seqüências para Caracterização em Multiescala de Reservatórios no Grupo Guatá (Eopermiano da Bacia do Paraná) na Região de São Gabriel - RS , Brasil. **Pesquisas em Geociências**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 3–20, 2002.

MCMURRAY, L. S., GAWTHORPE, R. L. Along-strike variability of forced regressive deposits: late Quaternaty, northern Peloponnesos, Greece. **Em: Hunt, D.. Gawthorpe, R. L. (Eds.), Sedimentary Responses to Forced Regressions**. Geological Society Special Publication, v. 172, p. 363–377, 2000.

MIALL, A. A review of the braided-River depositional environment. **Earth-Science Review**, v. 13, p. 1-62, 1977.

MIALL, A. The geology of fluvial deposits: Sedimentary Facies, Nasin Analysis, and Petroleum Geology. **Springer-Verlag**, New York, 1996.

MIALL, A. **The Geology of Stratigraphic Sequences.** Springer-Verlag, Berlin, p. 433, 1997

MILANI, J. *et al*. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 265–287, 2007.

MILANI, J. *et al*. Sequence and stratigraphic hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), southern Brazil. **Boletim IG-USP**, São Paulo, p. 125-173, 1997.

MITCHUM, R. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 11: glossary of terms used in seismic stratigraphy. **Payton, C.E. (Ed.), Seismic Stratigraphy e Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir**, v. 26, p. 205-212, 1977.

NUMMEDAL, D.; SWIFT, D. Transgressive stratigraphy at sequence-bounding unconformities: some principles derived from Holocene and Cretaceous examples. **Em: Nummedal, D., Pilkey, O.H., Howard, J.D. (Eds.), Sea-level Fluctuation and Coastal Evolution. SEPM Special Publication**, v. 41, p. 241-260, 1987.

PLINT, G. Sharp-based shoreface sequences and offshore bars in the Cardium Formation of Alberta; their relationship to relative changes in sea level. Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A., Van Wagoner, J.C. (Eds**.), Sea Level Changes: an Integrated Approach**. SEPM Special Publication, v. 42, p. 357-370, 1988.

POSAMENTIER, H.; VAIL, P. Eustatic controls on clastic deposition, II: sequence and systems tract models. Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A., Van Wagoner, J.C. (Eds.), **Sea Level Changes: an Integrated Approach**. SEPM Special Publication, v. 42, p. 125-154, 1988.

RASMUSSEN, E. S., DYBKJAER, K. Sequence stratigraphy of the Upper Oligocene-Lower Miocene of eastern Jylland, Denmark: role of structural relief and variable sediment supply in controlling sequence development. **Sedimentology**, v. 52, p. 25–63, 2005.

SCHERER, C.M.S. Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paraná Basin, southern Brazil. **Sedimentology**, v. 49(1), p. 97-116, 2002.

SCHNEIDER, R. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre. Anais do... São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia**, 1974. v. 1, p. 41-65, 1974.

SLOSS, L.; KRUMBEIM, W. Integrated facies analysis. **Em: Longwell, C.R. (Ed.), Sedimentary Facies in Geologic History. Geological Society of America Memoirs**, v. 39, p. 91-124, 1949.

SWIFT, D., PHILLIPS, S., THORNE, J. Sedimentation on continental margins: V. Parasequences. **Em: Swift, D., *et al*. Shelf sand and sandstone bodies geometry, facies and sequence stratigraphy. International Association of sedimentologists Special Publication**, v. 14, p. 153-187, 1991.

TUCKER, M. E. **Sedimentary rocks in the Field**. Willey, UK, 3ª ed., 234 p., 2003

VAIL, P.; MITCHUM, R.; THOMPSON, S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: relative changes of sea level from coastal onlap. **PAYTON, C. E. (Ed.). Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists. p. 63-81. (AAPG. Memoir, 26), 1977.

VAIL, P. *et al*. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology: an overview **Einsele, G., Ricken, W., Seilacher, A. (Eds.), Cycles and Events in Stratigraphy**. Springer-Verlag, Berlin, pp. 617-659, 1991.

VAN WAGONER, J. C., MITCHUM, R. M., POSAMENTIER, H. W., VAIL, P. R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, part 2: key definitions of sequence stratigraphy, **Em: Bally, A. W. (Ed.), Altlas of seismic stratigraphy**. American Association of Petroleum Geologists Stud. Geol., v. 27, p. 11–14, 1987.

WALKER, R. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. Em: Walker, R. & James, N. (Eds.), Facies models: response to sea level change, Canadá, Geological Association of Canada, p. 409, 1992.

WILDNER, W. **Mapa geológico do Estado de Santa Catarina**. CPRM, 2014. Escala 1:500,000.

ZECCHIN, M. The architectural variability of small-scale cycles in shelf and ramp clastic systems: The controlling factors. **Earth-Science Reviews** v. 84, p. 21–55, 2007.

ZECCHIN, M.; CATUNEANU, O. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves I: Units and bounding surfaces. **Marine and Petroleum Geology**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 1–25, 2013.

ZECCHIN, M., CATUNEANU, O., CAFFAU, M. High-resolution stratigraphy of clastic shelves V: Vriteria to discriminate between stratigraphic sequences and sedimentological cycles. **Marine and Petroleum Geology**, v. 85, p. 259–271, 2017.

APÊNDICE

Apêndice 1: Perfis colunares dos afloramentos RB_01, RB_02, RB_03, RB_04 e RB_05 e do testemunho RB_T:

COLUNA ESTRATIGRÁFICA

Ponto: RB_001 | Coord. UTM 22J 521m N: 6967576 E: 0659948 | Data: 21/05/2018

Escala: 1/50

Areia: Bl Sx Gr Mg G M F Mf S Ag

Cód. Fácies	Paleocorrente Estruturas	Fotos Amostras	Assoc. de fácies	DESCRIÇÃO LITOLÓGICA
Fl			Shorf inf distal	
Hcs			Shorf Inf prox	Arenito fino, amarelado, bem selecionado com estratificação hummocky, topo ondulado.
Hcs				
Sw/Sl			Shorf Sup	Arenito fino alaranjado com laminação ondulada truncada.
			Emcoberto	
S?				
P			Planície deltáica	Arenito fino alaranjado, maciço com fósseis de raízes.
Sm		255-6	Frente deltáica proximal	
Fl			Baía	
Sm/Sr				Ripples críticas a subcríticas.
Fl				
Sm/Sr		253-4 (Sr)	Frente deltáica proximal	
Sm/Sr	22/230			
Sm				
Sm				
Fl				
Sm			Frente deltáica distal	Arenito maciço por fluidização.
Fl				Arenito muito fino com laminação horizontal. Ripples fluidizadas.
Ht			Pró-delta	Estrutura em chama.
Ht		252 (geral)		
			Emcoberto	
S?		247-8 (geral)	Shorf Sup	
Ht			Shorf Inf prox	
Fl			Shor inf distal	
Scs/Sl/ Sw			Shoreface Supperior	Pacotes de arenito fino que gradam de ripples simétricas e ripples levemente assimétricas para cruzada de baixo ângulo e swalley.
Sw		244		Arenito fino, bem selecionado, com marcas de onda simétricas
Ht(f)		243 240-2	Shor inf proximal	Fluidizações.
Ht(l)				
Scs		237-8 (swalley)	Shor inf distal	
Fl				
Ht		233-4 (geral)	Shoreface Inferior proximal	
S?				
Ht(w)				
Sl			Shoreface Supperior	Arenito fino, bem selecionado, com laminação de baixo ângulo.
Ht		236	Shoreface inferior priximal	
Hcs/Sl		230-1		
Ht				
Ht				
Hcs/Sl			Shoreface inferior distal	Arenito fino com laminação de baixo ângulo com topo e base ondulado limitados por finos.
Ht				Heterolito linsen marcado pela variação de pelito laminado e arenito maciço ou onda simétrica, bem selecionado.

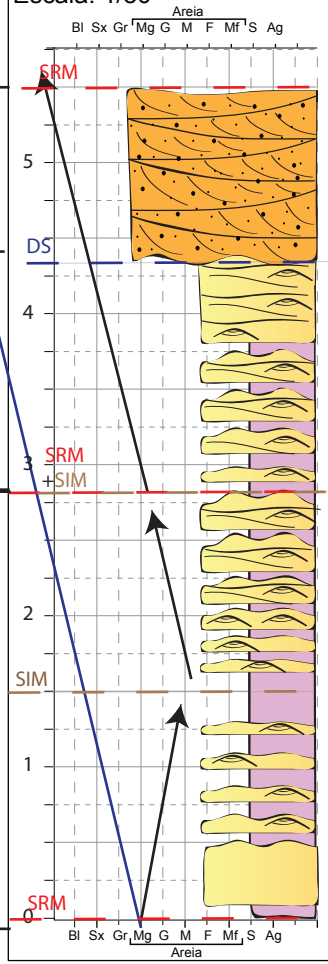
Ciclo R - tipo 1 | Ciclo R - tipo 1 | R -1 | Ciclo R - tipo 1

SIM+ SRM

COLUNA ESTRATIGRÁFICA

Ponto: RB_002 | Coord. UTM 22J 521m N: 6966554 E: 0637427 | Data: 21/05/2018

Escala: 1/50



Cód. Fácies	Paleocorrente Estruturas	Fotos Amostras	Assoc. de fácies
St		266-75 (mosaico) 265 (superfície)	Canal fluvial
Hcs		310	Shor inf proximal
Hcs		306 (nódulos) 298-300 (pro)	
Sw		311-2	Shor inf distal
Ht			
Hcs		292-7 Hcs 291 (pro) 305 (ripple)	Shor inf proximal
Sw		287-90	Shor inf distal
Ht			
Ht		283, 302-4 276-7	
Sw		281-2	
Sm			Shor inf proximal

DESCRIÇÃO LITOLÓGICA

Arenito grosso, mal selecionado com grânulos dispersos e concentrados na base.

Intercalação de finos com pacotes de areia com ripples de onada e hummocky.

Painel 1

Estrutura de carga e estratificação cruzada hummocky.

Heterolito com pelito laminado e arenito fino com laminação ondulada, gradando de flaser para wavy e linsen.

Arenito fino amarelado com estrutura maciça e topo ondulado.

COLUNA ESTRATIGRÁFICA

Ponto: RB_003 | Coord. UTM 22J 700m N: 6931287 E: 0661003 | Data: 22/05/2018

Escala: 1/50

Areia: Bl Sx Gr Mg G M F Mf S Ag

Cód. Fácies	Paleocorrente Estruturas	Fotos Amostras	Assoc. de fácies	DESCRIÇÃO LITOLÓGICA
			Offshore	
			Encoberto	
			Canal de maré	Níveis com domínio de ripples, algumas levemente simétricas,
St/Sr				Ripples de corrente na ireção oposta.
St				Drapes de lama nos foresets.
Fl				
St				Pelito na base dos foresets.
			Tufo	
			Canal fluvial com influência de maré	Pelito entre o sets com laminação ondulada.

COLUNA ESTRATIGRÁFICA

Ponto: RB_004 | Coord. UTM 22J 1000m N: 6935708 E: 0684711 | Data: 22/05/2018

Escala: 1/50

Areia: Bl Sx Gr Mg G M F Mf S Ag

Cód. Fácies	Paleocorrente Estruturas	Fotos Amostras	Assoc. de fácies	DESCRIÇÃO LITOLÓGICA
Hcs			Shor inf prox	Pelito com lentes de arenito fino a médio com estratificação cruzada hummocly e as vezes wavy ripple.
Hcs				
Hcs				Camadas de areia lenticulares com laminação de baixo ângulo em meio a lama.
Ht			Shor inf distal	
Scs/Sm			Shoreface Supperior	Arenito grosso maciço amarelado com muitos intraclastos alongados, base é um conglomerado de intraclastos. Lag?
St			Canal fluvial com inflência de maré	
Stl				Sets afinando em direção ao topo com lama separando. Também lama nos foresets.
St			Canal fluvial	Arenito grosso, mal selecionado com intraclastos lamosos e grânulos. Laminação horizontal incipiente marcada pela orientação dos intraclastos. Bases dos sets com mais grânulo e gradação normal. Heterolito linsen levemente ondulado.
Ht			Shor inf distal	
Scs			Shoreface Supperior	
Hcs			Shor inf prox	
Ht			Shor inf distal	Arenito muito fino.
Scs			Shoreface Supperior	
Hcs				
Ht			Shor inf distal	

SRM, SIM, SIM+SRM, DS

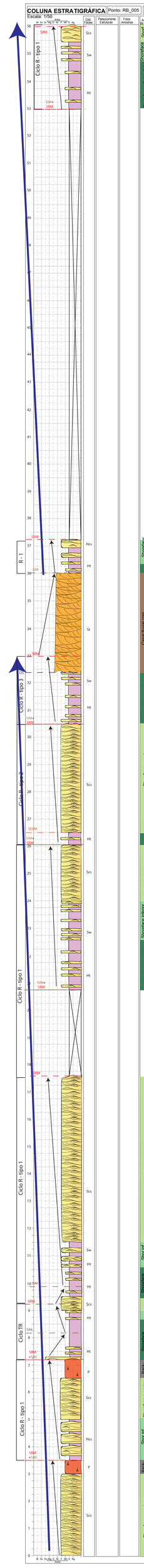
Ciclo R - tipo 3

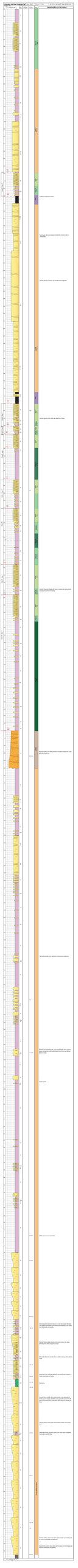
Ciclo TR

Ciclo R - tipo 1

COLUNA ESTRATIGRÁFICA | Ponto: RB_005 | Coord. UTM 22J 1000m N: 6953733 E: 0650893 | Data: 23/05/2018

Escala: 1/50




Surface
Depth (m)
Lithology
Stratigraphy
Quaternary
Holocene
Pleistocene
Tertiary
Pliocene
Miocene
Oligocene
Eocene
Paleocene
Cretaceous
Late Cretaceous
Early Cretaceous
Jurassic
Late Jurassic
Middle Jurassic
Early Jurassic
Triassic
Late Triassic
Middle Triassic
Early Triassic
Permian
Late Permian
Early Permian
Carboniferous
Late Carboniferous
Early Carboniferous
Devonian
Late Devonian
Middle Devonian
Early Devonian
Silurian
Ordovician
Cambrian
Precambrian
Proterozoic
Archean
Topsoil and alluvial clay
Loess
Glacial till
Sand
Gravel
Clay
Silt
Peat
Limestone
Dolomite
Chalk
Sandstone
Shale
Mudstone
Siltstone
Conglomerate
Breccia
Coal
Rock salt
Gypsum
Anhydrite
Chert
Basalt
Granite
Gneiss
Schist
Quartzite
Marble
Slate
Phyllite
Tuff
Ash
Pumice
Obsidian
Fossiliferous
Unconformity
Fault
Water table
Aquifer
Aquitard
Confining layer
Bedrock
Soil horizon
Fill
Concrete
Asphalt
Rubble
Organic matter
Root zone
Weathered zone
Fractured zone
Karst
Cave
Groundwater flow
Recharge
Discharge
Spring
Well
Borehole
Contact
Gradational
Sharp
Erosional
Depositional
Metamorphic
Igneous
Sedimentary
Clastic
Chemical
Biogenic
Evaporite
Volcanic
Intrusive
Extrusive
Pyroclastic
Lava flow
Dike
Sill
Batholith
Stock
Laccolith
Volcanic neck
Caldera
Crater
Fumarole
Geyser
Hot spring
Mud pot
Steam vent
Sinkhole
Doline
Uvala
Polje
Karst window
Tufa
Travertine
Speleothem
Stalactite
Stalagmite
Flowstone
Column
Rimstone
Cave pearl
Cave coral
Cave bacon
Cave fish
Cave crayfish
Cave beetle
Cave spider
Cave cricket
Cave salamander
Cave bear
Cave lion
Cave hyena
Cave wolf
Cave fox
Cave rabbit
Cave rodent
Cave bat
Cave owl
Cave swallow
Cave guano
Cave sediment
Cave fill
Cave entrance
Cave mouth
Cave passage
Cave chamber
Cave system
Cave map
Cave survey
Cave exploration
Cave rescue
Cave diving
Cave photography
Cave video
Cave lighting
Cave ventilation
Cave temperature
Cave humidity
Cave pressure
Cave gas
Cave water
Cave ice
Cave snow
Cave frost
Cave dew
Cave condensation
Cave evaporation
Cave precipitation
Cave runoff
Cave infiltration
Cave percolation
Cave seepage
Cave drip
Cave flow
Cave pool
Cave lake
Cave river
Cave waterfall
Cave rapids
Cave sump
Cave siphon
Cave duck
Cave dive
Cave diver
Cave rescue
Cave accident
Cave fatality
Cave injury
Cave illness
Cave death
Cave burial
Cave archaeology
Cave paleontology
Cave geology
Cave hydrology
Cave biology
Cave ecology
Cave conservation
Cave protection
Cave management
Cave tourism
Cave guide
Cave lamp
Cave helmet
Cave suit
Cave boots
Cave gloves
Cave rope
Cave ladder
Cave harness
Cave carabiner
Cave descender
Cave ascender
Cave knot
Cave anchor
Cave bolt
Cave hammer
Cave chisel
Cave drill
Cave saw
Cave camera
Cave light
Cave battery
Cave charger
Cave generator
Cave compressor
Cave tank
Cave regulator
Cave mask
Cave snorkel
Cave fin
Cave wetsuit
Cave drysuit
Cave undersuit
Cave overboots
Cave gloves
Cave hood
Cave mask
Cave goggles
Cave helmet
Cave light
Cave battery
Cave charger
Cave generator
Cave compressor
Cave tank
Cave regulator
Cave mask
Cave snorkel
Cave fin
Cave wetsuit
Cave drysuit
Cave undersuit
Cave overboots
Cave gloves
Cave hood
Cave mask
Cave goggles