

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geologia**

José Arthur Oliveira Santos

**CONSTRUÇÃO DE MODELOS ESTRATIGRÁFICOS DE ALTA RESOLUÇÃO A  
PARTIR DA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAL: um estudo de  
caso na Sequência Balbuena IV da Formação Yacoraite, Bacia de Salta,  
Argentina**

Belo Horizonte  
2023

José Arthur Oliveira Santos

**CONSTRUÇÃO DE MODELOS ESTRATIGRÁFICOS DE ALTA RESOLUÇÃO A PARTIR DA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAL: um estudo de caso na Sequência Balbuena IV da Formação Yacoraite, Bacia de Salta, Argentina**

**Versão Final**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Uhlein

Coorientador: Prof. Dr. Gabriel Jubé Uhlein

Belo Horizonte  
2023

S237c  
2023

Santos, José Arthur Oliveira.

Construção de modelos estratigráficos de alta resolução a partir de técnicas de análise de sinal [manuscrito] : um estudo de caso na sequência Balbuena IV da formação Yacoraite, Bacia de Salta, Argentina / José Arthur Oliveira Santos . – 2023.

112 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Alexandre Uhlein.

Coorientador: Gabriel Jubé Uhlein.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2023.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 100-112.

1. Geologia estratigráfica – Teses. 2. Fácies (Geologia) – Argentina – Teses. 3. Ciência da computação – Teses. I. Uhlein, Alexandre. II. Uhlein, Gabriel Jubé. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 551.7(82)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC-UFMG**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**CONSTRUÇÃO DE MODELOS ESTRATIGRÁFICOS DE ALTA RESOLUÇÃO A PARTIR DA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAL: UM ESTUDO DE CASO NA SEQUÊNCIA BALBUENA IV DA FORMAÇÃO YACORAITE, BACIA DE SALTA, ARGENTINA**

**JOSÉ ARTHUR OLIVEIRA SANTOS**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre(a) em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

Aprovada em 16 de agosto de 2023, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Dr. Alexandre Uhlein – Orientador  
UFMG

Prof. Dr. Tiago Amâncio Novo  
UFMG

Prof. Dr. Gabriel de Moraes Coutinho  
UFMG

Belo Horizonte, 16 de agosto de 2023.

## AGRADECIMENTOS

É com imensa gratidão que expresso meus mais sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Inicialmente agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional de sempre. Agradeço à Fernanda pelo companheirismo, cuidado, carinho e paciência durante todo esse período. Agradeço também à minha irmã, Maria Carolina, por ser um exemplo de dedicação e competência em tudo que se dispõe a fazer.

Ao meu orientador, Alexandre Uhlein, pelo convite e confiança depositada para embarcar no Projeto “Inteligência Artificial aplicada à exploração de petróleo na camada Pré-Sal”, desenvolvido pelos departamentos de Geologia e Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais. Seu convite veio em um momento desafiador, durante a pandemia, quando as oportunidades pareciam escassas. A partir do seu convite pude me redirecionar e voltar ao caminho da profissão que tanto amo. Aqui vai meu muito obrigado, grande mestre!!!

Ao coordenador geral do projeto supracitado, Prof. Wagner Meira Junior, do Departamento de Ciência da Computação, pela confiança e oportunidade. Aos professores Gabriel Coutinho e Douglas Macharet, expresso minha gratidão pela brilhante condução da linha Ciclos, vocês são exemplos de liderança e competência técnica, e sem a orientação de vocês este trabalho não teria sido possível. Também gostaria de agradecer imensamente ao Thomás, Kaio, Alan, Danilo e ao Maiko, que contribuíram diretamente para a construção do Jupyter Notebook, ferramenta indispensável no desenvolvimento deste trabalho. Vocês são incríveis!

Gostaria de agradecer aos professores Gabriel Uhlein, Tiago Novo, Humberto Reis, como também aos demais colegas da Linha Sísmica, especialmente Mariana, Tobias, Fernanda, Medanha, Caique, Thaís, Maria e Amanda. Agradeço imensamente pelo acolhimento na UFMG e pela dedicação nas discussões geológicas, sempre com uma atmosfera descontraída e bem-humorada, além de um rico compartilhamento de conhecimentos. Gostaria de agradecer ao William Viegas por toda atenção e paciência durante o meu tempo na UFMG, e estendo o agradecimento ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do IGC-UFMG, à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e ao Centro de Pesquisas Professor Manuel Teixeira da Costa.

Agradeço aos geólogos Daniel Galvão e Felipe Farias por lançarem o desafio que enfrentei nesta jornada, bem como pelo suporte e direcionamento ao longo das

discussões que tivemos durante esse período. Mesmo com muitos compromissos, vocês estiveram sempre presentes e solícitos em ajudar. Com certeza, vocês são exemplos nos quais me espelharei daqui em diante. Muito obrigado!

À Petrobras, pelo financiamento integral desta dissertação através dos recursos disponibilizados ao Projeto em desenvolvimento na UFMG. Agradeço ao geólogo Bento-Freire, pela gentileza de disponibilizar os dados da Bacia de Salta para serem explorados neste trabalho, bem como sua aprovação e incentivo quando apresentamos a proposta aqui desenvolvida.

Expresso meu profundo agradecimento ao Márcio Dantas. Posso dizer que ele é como um irmão que a geologia colocou em meu caminho, influenciando minha formação desde os dias em que eu era seu estagiário na Universidade Federal de Sergipe. Até hoje, continuamos trabalhando juntos no mesmo projeto, e esse trabalho reflete muito da sua orientação e expertise. Muito obrigado por toda a paciência, orientação e amizade que você tem demonstrado ao longo desses anos.

Por fim, expresso minha gratidão ao Laboratório PROGEOLOGIA/UFS, que sempre me recebe de portas abertas. Deixo meu abraço aos grandes amigos Prof. Antônio Garcia, Luiz Mário, Bruno, Raquel, João Paulo, Lucas, Karol, Simon, João Paulo, Vandelli, Ribeiro e ao Gustavo Garcia.

Encerro esta etapa com o sentimento de dever cumprido, mas já ansioso pelos novos desafios que enfrentarei nos próximos ciclos.

## RESUMO

Uma das aplicações mais importantes da estratigrafia de sequências em alta resolução é o zoneamento e caracterização de reservatórios de óleo e gás. Estabelecer um framework cronoestratigráfico hierárquico que compreenda sequências em múltiplas escalas é crucial para identificar as principais heterogeneidades do reservatório, que compartimentalizam o fluxo de fluidos no subsolo. Nesse contexto, esta dissertação propõe um fluxo de trabalho que integra diferentes técnicas de análise de sinais para identificar sequências de múltiplas hierarquias a partir de uma série de dados estratigráficos. As técnicas *Continuous Wavelet Transform* (CWT), *Detrend Error Log* (DTEL), e *Integrated Detrend Error Log* (INDTEL) são utilizadas para processar dados de raios gama obtidos de afloramentos da Formação Yacoraite (Bacia de Salta-ARG), que são convencionalmente utilizados como análogos para caracterização de reservatórios. Nossos resultados sugerem que a CWT se ajusta melhor a ciclos de alta frequência, enquanto o INDTEL apresenta um bom ajuste a ciclos de frequência média. Além dessas técnicas, Modelos de Markov Ocultos também foram aplicados, prevendo ciclos transgressivos-regressivos (T-R) como estados ocultos a partir da matriz de transição de fácies, bem como possíveis ocorrências de *missed-beats*. Todos esses métodos foram programados na linguagem de programação Python, permitindo a geração de resultados rápidos e interativos. Essa abordagem traz parâmetros que podem guiar a construção de modelos estratigráficos por processos automatizados, dinamizando alguns passos que são rotineiros no dia a dia da interpretação estratigráfica, e também, diminuir a subjetividade que existe na interpretação geológica por meio do pragmatismo matemático dos métodos que estão sendo aplicados.

Palavras-chave: estratigrafia de alta resolução; *Continuous Wavelet Transform*; DTEL; INDTEL; *Hidden-Markov Models*; ciclos transgressivos; ciclos regressivos.

## **ABSTRACT**

One of the most valuable applications of high-resolution sequence stratigraphy is reservoir zonation and characterization. Establishing a hierarchical chronostratigraphic framework comprising sequences at multiple scales is crucial to identify main reservoir heterogeneities that compartmentalize the fluid flow in the subsurface. In this context, this dissertation proposes a workflow that integrates different signal analysis techniques to identify sequences of multiple hierarchies from a series of stratigraphic data. The Continuous Wavelet Transform (CWT), Detrend Error Log (DTEL), and Integrated Detrend Error Log (INDTEL) techniques are utilized to process gamma-ray data obtained from outcrops of the Yacoraite Formation, which are conventionally employed as analogs for reservoir characterization. Our results suggest that CWT fits better with higher frequency cycles, while INDTEL shows a good fit with medium frequency cycles. In addition to these techniques, Hidden-Markov Models were also applied, predicting T-R cycles as hidden states from the facies transition matrix and possible occurrence of missed beats. This approach brings parameters that can guide the construction of stratigraphic models through automated processes, streamlining some steps that are routine in the day-to-day of stratigraphic interpretation, and also reducing the subjectivity that exists in geological interpretation through the mathematical pragmatism of the methods being applied.

**Keywords:** high-resolution stratigraphy; Continuous Wavelet Transform; DTEL; INDTEL; Hidden-Markov Models; transgressive cycles; regressive cycles.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Interface construída no Jupyter Notebook para visualização de dados e aplicação dos métodos desenvolvidos. ....	17
Figura 2: Importação dos dados e seleção das curvas a serem trabalhadas. ....	18
Figura 3: Exemplo da aplicação da transformada Wavelet que decompõe diferentes componentes de sinais a partir da curva de entrada. ....	18
Figura 4: Exemplo de output gerado a partir do método INDTEL, destacando trends oscilatórios. ....	18
Figura 5: Conjunto de bacias alinhadas segundo a direção NW-SE, que se formaram em resposta à fragmentação do Gondwana. Original em Ramos (1999), modificado de Bento-Freire (2012). ....	20
Figura 6: Mapa geológico da região de Salta, com destaque para as isópacas da Fm. Yacoraite na Bacia de Salta. Baseado em DeCelles et al. (2011) e Pedrinha (2014). ....	21
Figura 7: Configuração dos arcos que delimitam a bacia de Salta, bem como a disposição dos umbrais que compartimentam os principais depocentros da bacia. Original em Sabino (2002), modificado de Bento-Freire (2012). ....	23
Figura 8: Carta estratigráfica do Grupo Salta na Sub-Bacia Metán-Alemánia. Adaptado de Magalhães et al. (2020). ....	25
Figura 9: Estratigrafia do Sub-Grupo Pirgua, evidenciando os três ciclos de preenchimento do estágio rifte (Modificado de Marquillas et al. 2005). ....	26
Figura 10: Configuração das rochas do Sug-Grupo Pirgua preenchendo o rifte. Detalhe para a grande espessura da unidade e a geometria cuneiforme dos estratos. Disponível em Pedrinha (2014), original em Hernandez et al. (1999). ....	27
Figura 11: Seção estratigráfica geral do Supergrupo Balbuena, englobando as formações Lecho e Yacoraite. Modificado de Marquillas et al. (2005) e Bento-Freire (2012). ....	28
Figura 12: Reativação do rifte ocasionando mudança no padrão de subsidência na sub-bacia Lomas de Olmedo. Modificado de Starck (2011). ....	29
Figura 13: Vista panorâmica da Formação Yacoraite na região do Dique Cabra Coral. Zoom in detalhando o aspecto contínuo das camadas. Fonte: @felipeguadanin - Modelo virtual de afloramento - Sketchfab 2023. ....	31
Figura 14: Foto de afloramento (Pedrinha 2014); Perfil à direita: Fonte: Bento-Freire (2012). Original em Marquillas et al. 2007. ....	32
Figura 15: A e B) Destaques para os corredores epicontinentais que, esporadicamente, conectavam as sub-bacias mais ao norte com o oceano aberto. Imagens modificadas de Pedrinha (2014). C) Comparação dos valores isotópicos de	

87Sr/86Sr obtidos por Sial et al. (2001), com a concentração de 87Sr/86Sr presente na água do mar. ....	34
Figura 16: Modelo Ballanced-Filled Lake (Bohacs et al. 2000), o qual se encaixa melhor para explicar a dinâmica da sequência Balbuena IV (Bento-Freire, 2012)....	35
Figura 17: Detalhe microscópico dos grainstones, compostos essencialmente por oóides, oncóides e pelóides, com empacotamento moderado. Fonte: Deschamps et al. (2020). ....	39
Figura 18: Diferentes geometrias apresentadas pelos grainstones, podendo ser sigmóides (foto da esquerda) ou tabulares (foto da direita). Fonte: Bento-Freire (2012). ....	39
Figura 19: Estromatólitos com formato dômico. Fonte: Bento-Freire (2012).....	40
Figura 20: Estromatólitos do tipo colchetes são mais achatados e crescem lateralmente para manter-se dentro da lâmina d'água. Fonte: Bento-Freire (2012)..	40
Figura 21: Detalhe para a estrutura interna dos estromatólitos mostrando crescimento arborescente. Fonte: Bento-Freire (2012). ....	41
Figura 22: Laminito microbial com destaque para as gretas de ressecamento que normalmente ocorrem associadas a essa fácies. Fonte: Deschamps et al. (2020)...	41
Figura 23: Wackestone bioclástico, composto essencialmente por fragmentos de gastrópodes imersos em matriz fina. Fonte: Bento-Freire (2012). ....	42
Figura 24: Siltito (A) e argilitos (B) compõem dominam a associação de fácies formada pelos siliciclásticos finos.....	42
Figura 25: Disposição das associações de fácies dentro do perfil deposicional longitudinal. As barras pretas indicam os locais onde cada associação domina, as barras brancas indicam que alguma associação também pode ocorrer, mas sem dominar. As barras mais finas indicam a ocorrência pontual das associações de fácies. ....	43
Figura 26: Mapa de localização da área de estudo. Fonte: o autor, modificado de Bento-Freire (2012). ....	44
Figura 27: Oscilação do nível do lago em função dos momentos climáticos úmidos e áridos, bem como as fácies associadas a cada estágio, compondo um ciclo ideal de alta frequência. Modificado de Gomes et al. (2020). ....	48
Figura 28: Exemplo da ciclicidade empilhando fácies formadas em ambientes profundos (pelitos cinza) sobreposta aos carbonatos de água mais rasa (camadas claras). Fonte: Montano 2022.....	49
Figura 29: Ciclos elementares descritos para a sequência Balbuena II. Observe que os ciclos são diferenciados em função das fácies que os compõem, com todos ocorrendo em resposta às flutuações climáticas. Fonte: Pedrinha (2014). ....	50

Figura 30: Padrão geral da sequência Balbuena III. Observar a ocorrência da ciclicidade tanto no pacote silicilástico quanto no carbonático. A) Afloramento da seção siliciclástica. B) Afloramento da seção carbonática. Fonte: Roemers (2014). .....	50
Figura 31: Delimitação de microciclos em escala de lâmina petrográfica, ressaltando que os condicionantes climáticos também influenciam na escala microscópica. Fonte: Bunevich et al. (2017). .....	51
Figura 32: Exemplo proxies e seus respectivos conteúdos de frequência. Perceba que os periodogramas não apontam os locais onde cada pico domina dentro do sinal...53	53
Figura 33: Processo de análise de sinal a partir do método da Continuous Wavelets Transform. 1) Seleção da wavelet que melhor se ajusta ao seu sinal de entrada. 2) Definição dos parâmetros a e b (deformação e janela de translação) para a varredura do sinal. 3) Aplicação no sinal geológico e obtenção dos diferentes componentes de frequências.....	56
Figura 34: Procedimento para geração dos perfis DTEL e INDTEL. Note que o INDTEL apresenta um resultado com uma ciclicidade bem pronunciada. Adaptado de Behdad (2019).....	57
Figura 35: Síntese da detecção de ciclos T-R em função da transição de fácies. ....	59
Figura 36: Comprovante de submissão de manuscrito para a revista Geoscience Frontiers.....	60
Figura 37: Transferência de submissão para a revista Marine and Petroleum Geology. ....	61
Figura 38: Submissão para a revista Marine and Petroleum Geology. ....	61

## LISTA DE FIGURAS DO ARTIGO

Figure 1: Location of the Salta Basin, north of Argentina. B) Salta basin paleomorphology at the time of the Yacoraite Formation deposition. C) Location of the outcrops sections used in this study. Adapted from Ceolin et al. (2022). .....	65
Figure 2: Stratigraphic chart for the Rift Phase of Salta Basin, highlighting the SAG Yacoraite Formation Interval. Adapted from Magalhães et al. (2020). .....	66
Figure 3: Cyclical pattern observed at Gauchito Gil section. Note that the cycle's thickness is variable along the section. The concepts presented are adaptation from Bento-Freire (2012) and Gomes et al. (2020) for climatic fluctuation explaining the facies stacking and T-R trends. Image modified from Google Earth Street View 2023 .....	67
Figure 4: Facies distribution within the lake system under arid and humid stages. Black bars indicate preferential places to facies occurrence. Thick and thin white bars indicate minors chances of occurrences of each facies. ....	68

Figure 5: Outcrop sections with facies and gamma-ray (green logs) and K, Th and U contents (Yellow logs). .....	69
Figure 6: Example of the Morlet Wavelet stretching and translating around an input time series in order to sweep different frequencies. Adapted from Li et al. (2023). ...	70
Figure 7: Examples of DTEL and INDTEL outputs. Adapted from Behdad (2019). ...	71
Figure 8: On the left, we have the representation of a HMM. The hidden Markov chain consists of hidden states R and T, representing regressive and transgressive cycles, and transition probabilities represented by weighted arrows $(\pi_{i,j})_{i,j \in \{R,T\}}$ . The observable states are the three types of facies and the weights on the dotted arrows indicate the probability of each of the facies being observed in each of the cycles. On the right, we have an observed facies sequence. The objective is to adjust the model probabilities in order to maximize the log-likelihood. Adapted from Geyman et al. (2021). .....	72
Figure 9: Scheme of the Morlet Wavelet searching the gamma-ray proxies and outputting multi-frequency curves. Adapted from Wei Li et al. (2023). .....	74
Figure 10: Example of calibration between the high-frequency output (CWT1) with facies occurrence in order to map the transgressive-regressive cycles. ....	75
Figure 11: High-frequency transgressive-regressive cycles identified for all sections, and the main trends that are responsible for the carbonatic or fine-siliciclastic occurrence. Note that the MRS is a turning point from a basal section dominantly carbonatic to an upper section with massive presence of fine-siliciclastic. ....	76
Figure 12: A) Traditional scale-up approach from the high to medium frequency cycles (Magalhães et al. 2020; Fragoso et al. 2021). B) Example of a good correlation between the traditional approach to the INDTEL output. (GR – Gamma Ray; FA – Facies associations; HF – High Frequency Cycles; MF – Medium Frequency Cycles). .....	77
Figure 13: Output from Hidden Markov Model showing a good pace with input of facies. Red and blue bars are regressive and transgressive cycles, respectively. ....	78
Figure 14: Main differences between upper and lower sections. Note the low amplitude signal in wavelet1 curve in the lower section, dominated by successive carbonate stacking. On the upper section there is a dominance high-amplitude signal due to the better preservation of fine-siliciclastics facies. Lower and Upper large trends are interpreted as long-term arid and humid trends (Bento-Freire, 2012; Gomes et al. 2020). .....	79
Figure 15: Model of a longitudinal profile of the depositional lake showing the facies belt evolution under a long-term arid trend. Arid and humid high-frequency cycles are still occurring within a long-term trend. However, the increased aridity conditions led to a progressively lowering of the base level, which makes it difficult to preserve the fine-siliciclastic facies formed during humid climates. This sedimentary stacking forms the signal with low amplitude oscillations. Adapted from Bento-Freire (2012). ....	80

Figure 16: Carbonate-dominated section with isolated occurrence of transgressive facies. Note in the high-frequency curve that amplitude reaches its maximum at the point where the transgressive facies is preserved (marker at zero depth). .....81

Figure 17: Model for missed-beats identification. When the lower-frequency is in a aridity trend, towards to the minimum amplitude peaks, and the high-frequency curve is in transgressive trend, the accommodation space is too low precluding the preservation of the fine facies, enhancing the possibility of the missed-beats occurrence. Observe the desiccation cracks at the top of the laminite facies (photo available in Deschamps et al. 2020). .....84

Figure 18: Potential chances of missed-beats occurrence on the sections. Note that there is a higher concentration on the lower part of the section as result of a higher aridity influence. ....84

Figure 19: Fine-siliciclastic facies will be more preserved when there is a convergent trend from the lower and higher frequencies towards the maximum amplitudes. The layers which have the higher thickness are matching with this pattern. ....85

Figure 20: Medium-frequencies correlation obtained from the INDTEL trends. Note that the transgressive- regressive cycles show a high lateral mappability with a thickness regularity.....87

Figure 21: Larger climatic trends forming the low-frequency cycles. Note that the Maximum Regressive Surface of the lower frequency represents a turning point in the sedimentation, where below it, there is a highly stacked carbonate facies, while above it the section is dominated by abrupt transitions between grainstones and fine-siliciclastic facies. ....87

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Resumo das fácies carbonáticas encontradas na Sequência Balbuena IV. Fonte Bento-Freire (2012). .....37

Quadro 2: Síntese das fácies siliciclásticas que ocorrem na Sequência Balbuena IV. Fonte: Bento-Freire (2012). .....38

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1 Objetivos .....	14
1.2 Materiais e Métodos .....	15
1.3 Programação Computacional.....	16
<b>2. GEOLOGIA E ESTRATIGRAFIA DA BACIA DE SALTA</b> .....	19
2.1 Estratigrafia da bacia do Grupo Salta.....	24
2.2 Aspectos gerais da Formação Yacoraite .....	30
2.3 Controles deposicionais da Formação Yacoraite .....	33
2.4 Facies sedimentares da Sequência Balbuena IV .....	36
2.5 Localização da área de estudo .....	44
<b>3. ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS</b> .....	45
3.1 Estratigrafia de Sequências na Formação Yacoraite.....	46
<b>4. MÉTODOS ESPECTRAIS E <i>HIDDEN-MARKOV MODELS</i> APLICADOS À ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA</b> .....	53
4.1 Continuous Wavelet Transform (CWT) .....	54
4.2 Detrend Error Log (DTEL) e Integrating Detrend Error Log (INDTEL) .....	57
4.3 Hidden-Markov Models (HMM) .....	58
<b>5. RESULTADOS</b> .....	60
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	97
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	100

## 1. INTRODUÇÃO

Realizar uma análise estratigráfica em alta resolução é uma etapa crucial no fluxo de trabalho para a caracterização de reservatórios de óleo-gás. Os parâmetros que controlam sua qualidade estão fortemente associados às tendências observadas nos ciclos transgressivos-regressivos, uma vez que suas superfícies limitantes geralmente coincidem com heterogeneidades petrofísicas que compartimentalizam o fluxo de fluido em subsuperfície (e.g., Zechin & Catuneanu, 2013; Melo et al. 2021; Magalhães et al. 2020, 2021; Fragoso et al. 2023). No entanto, obter informações de alta resolução de subsuperfície pode ser desafiador devido aos altos custos de obtenção de testemunhos de poços. A análise estratigráfica normalmente é realizada por meio de amostras pontuais laterais e lâminas delgadas, complementadas por dados indiretos de perfis de poços. Nesse sentido, uma das maneiras mais comuns de realizar a análise estratigráfica é por meio de perfis de raios gama, devido ao seu alto potencial interpretativo em termos de identificação de intervalos limpos e argilosos, que por sua vez estão diretamente associados a tendências transgressivas-regressivas (Adams & Weaver, 1958; Aigner et al. 1995; Bristol & Williamson, 1998; Ehrenberg & Svana, 2001).

Nos últimos anos, tem surgido uma corrente metodológica direcionada à aplicação da análise de sinais em proxies geológicos, com o objetivo de construir modelos estratigráficos. Técnicas de análise de sinais, incluindo a Transformada de Fourier (Herbert and Fischer, 1986; Schwarzacher, 1993), Singular Spectrum Analysis (Vautard & Ghil, 1989; Ghil et al. 2002; Hinnov et al. 2002), transformada de Hilbert (Huang et al. 2009) e INPEFA (Integrated Prediction Error Analysis - Nio et al. 2005; De Jong et al. 2009; Yuan et al. 2018; Wang et al. 2022; Abdolahi et al. 2023; Wei Li et al. 2023), têm resultado em modelos estratigráficos de diferentes níveis hierárquicos, onde cada hierarquia tem relação direta com determinada faixa de frequências encontradas a partir da decomposição de sinais.

Neste trabalho aplicou-se a *Continuous Wavelet Transform* (Carmona et al. 1998; Daubechies, 1992), *Detrended Error Log* (DTEL) e *Integrated Detrended Log* (INDTEL) (Behdad, 2019) para processar curvas de raios gamas da sequência Balbuena IV (Bento-Freire, 2012) da Formação Yacoraite, localizada na Bacia de Salta, Argentina. Afloramentos da referida formação são tradicionalmente utilizados como análogos para a caracterização de reservatórios (Magalhães et al. 2020; Mutti

et al. 2023). A sequência Balbuena IV oferece uma excelente seção para testar métodos de análise de sinais voltados para a construção estratigráfica, devido ao extenso conhecimento já existente no que diz respeito à sua caracterização estratigráfica, particularmente na sub-bacia Metán-Alemánia. Tal sequência é caracterizada por uma evidente ciclicidade, composta por ciclos transgressivo-regressivos em várias frequências como produto do empilhamento recorrente de carbonatos e fácies siliciclásticas finas, as quais ocorrem em resposta às oscilações entre períodos áridos e úmidos, respectivamente (Bento-Freire, 2012; Bunevich *et al.* 2017; Rohais *et al.* 2019; Deschamps *et al.* 2020; Gomes *et al.* 2020). Em conjunto aos resultados obtidos a partir da análise de sinal, também foram usados Hidden-Markov Models (HMM) baseado nas transições de fácies (Jeong et al. 2014; Dyer et al. 2018; Tian et al. 2021; Geyman et al. 2021).

Este trabalho está sendo desenvolvido dentro do escopo do projeto de pesquisa ***“Inteligência artificial aplicada à exploração de petróleo na camada Pré-Sal”***, realizado por pesquisadores do Instituto de Geociências e do Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Este Projeto é coordenado pelo Prof Dr. Wagner Meira Jr. (DCC), financiado pela Petrobras, em parceria e suporte com profissionais da empresa. Toda formulação matemática utilizada nesse trabalho foi implementada na linguagem Python.

### 1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é contribuir com a validação da caracterização de uma ciclicidade estratigráfica multiescala, a partir da aplicação pragmática de algumas técnicas de processamento de sinais. Uma vez que a caracterização da ciclicidade aqui apresentada seja validada, esses métodos podem ser aplicados em dados de outras bacias, como por exemplo nos reservatórios da Formação Barra Velha, no Pré-Sal da bacia de Santos. Espera-se que a proximidade com a ciência da computação facilite o trabalho do geólogo, dinamizando e automatizando alguns passos que são rotineiros no dia a dia, e também, diminuir a subjetividade que existe na interpretação geológica por meio do pragmatismo matemático dos métodos que estão sendo aplicados.

## 1.2 Materiais e Métodos

A dissertação foi direcionada para três grandes temas: 1) geologia local da Bacia de Salta, em especial a dinâmica sedimentar da Formação Yacoraite; 2) Estratigrafia, em especial as subdisciplinas da cicloestratigrafia e estratigrafia de sequências; e 3) Métodos matemáticos para análise de sinais e identificação de ciclos estratigráficos em diferentes hierarquias/frequências, em especial a *Continuous Wavelet Transform* (Daubechies, 1992), *Detrend Error Log*, *Integrated Detrend Error Log* (Behdad, 2019) e Cadeias de Markov (Markov, 1913). Esses temas serão abordados de maneira mais detalhada nos tópicos seguintes.

Para a realização desse estudo a Petrobras disponibilizou seis perfis estratigráficos levantados em afloramentos da sequência Balbuena IV, porção superior da Fm. Yacoraite (Bento-Freire, 2012; Gomes et al. 2021). Os perfis contêm descrições de fácies sedimentares, raios gama total e espectral (Tório, Urânio e Potássio).

Os dados recebidos estavam codificados em planilhas do *Excel* e tiveram que ser convertidos para arquivos com a extensão “.las” para fins de importação e visualização das informações das fácies e raio gama. Os arquivos foram importados no *software* SKUA-GOCAD e no *Jupyter Notebook*, que se trata de uma interface *online* para visualização e programação de linguagens de programação. A transformada Wavelet, os métodos DTEL, INDTEL e as cadeias de Markov também foram implementados no ambiente do *Jupyter Notebook*.

Fácies carbonáticas são apresentadas de acordo com as classificações de Dunham (1962), Embry & Klovan (1971) e Terra *et al.* (2010), enquanto que as fácies siliciclásticas seguem a classificação de Folk (1962). A radioatividade natural das rochas foi quantificada a partir do gamaespectômetro portátil do modelo RS-230BGO-SuperSpec®, da marca Radiation Solutions. As medidas foram realizadas dentro da janela de 60 segundos seguindo um *step* fixo de 20 cm para aquisição de cada amostra. A partir dessas medidas foi possível obter os valores do raio gama total e espectral (K (%), U (ppm) e Th (ppm)).

### 1.3 Programação Computacional

Foi criado um *Jupyter Notebook* (Figura 1, Figura 2, Figura 3 e Figura 4), que se trata de um editor interativo para escrever e executar códigos diretamente do ambiente da internet (Pandey *et al.* 2020). Dentro desse ambiente estão disponíveis todas as bibliotecas que já fazem parte do pacote instalado junto com Python, como também é possível instalar e executar outras bibliotecas a depender do objetivo requerido. As principais bibliotecas utilizadas, bem como suas principais aplicações são listadas a seguir (python.org):

- Jupyter==1.0.0: É uma biblioteca Python que fornece um ambiente de notebook para a criação de documentos interativos que misturam código, texto e gráficos;
- Lasio==0.30: É uma biblioteca Python para leitura e gravação de arquivos LAS (Log ASCII Standard), um formato de arquivo comum para dados de registro de poços;
- PyWavelets==1.3.0: É uma biblioteca Python para transformadas wavelet, usadas para análise de sinais e processamento de imagens;
- Numpy==1.22.3: É uma biblioteca Python para computação numérica e matricial em Python;
- Matplotlib==3.5.2: É uma biblioteca Python para criação de gráficos e visualizações de dados;
- Ipywidgets==7.7.0: É uma biblioteca Python que fornece widgets interativos para o Jupyter Notebook;
- Plotly==5.8.0: É uma biblioteca Python para criação de gráficos interativos e visualizações de dados;
- Scipy==1.8.0: É uma biblioteca Python para computação científica, incluindo estatística, processamento de sinais e álgebra linear;
- Hmmlern==0.2.7: É uma biblioteca Python para modelagem e inferência em modelos ocultos de Markov (HMM), que são usados para modelar sistemas estocásticos com estados ocultos.

A partir da utilização dessas bibliotecas é possível criar uma interface de visualização e exploração de dados totalmente independente de *softwares* comerciais.

As imagens a seguir mostram os *layouts* construídos e algumas opções para parametrização no tratamento das curvas estudadas diretamente no *Jupyter Notebook*. A implementação dos *notebooks* foi elaborada pela equipe de pesquisadores da Ciência da Computação, os quais atuam em paralelo neste projeto.

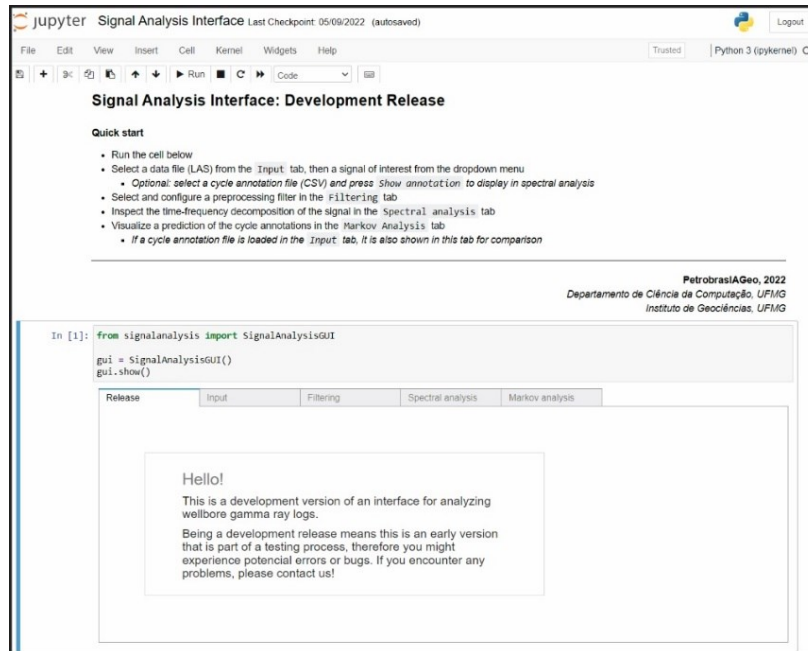


Figura 1: Interface construída no Jupyter Notebook para visualização de dados e aplicação dos métodos desenvolvidos.

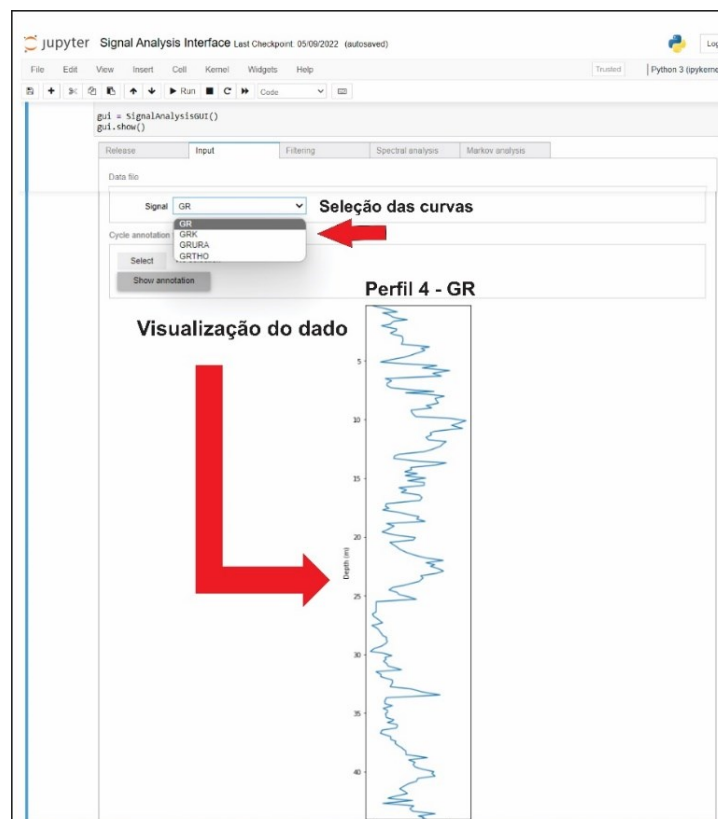


Figura 2: Importação dos dados e seleção das curvas a serem trabalhadas.

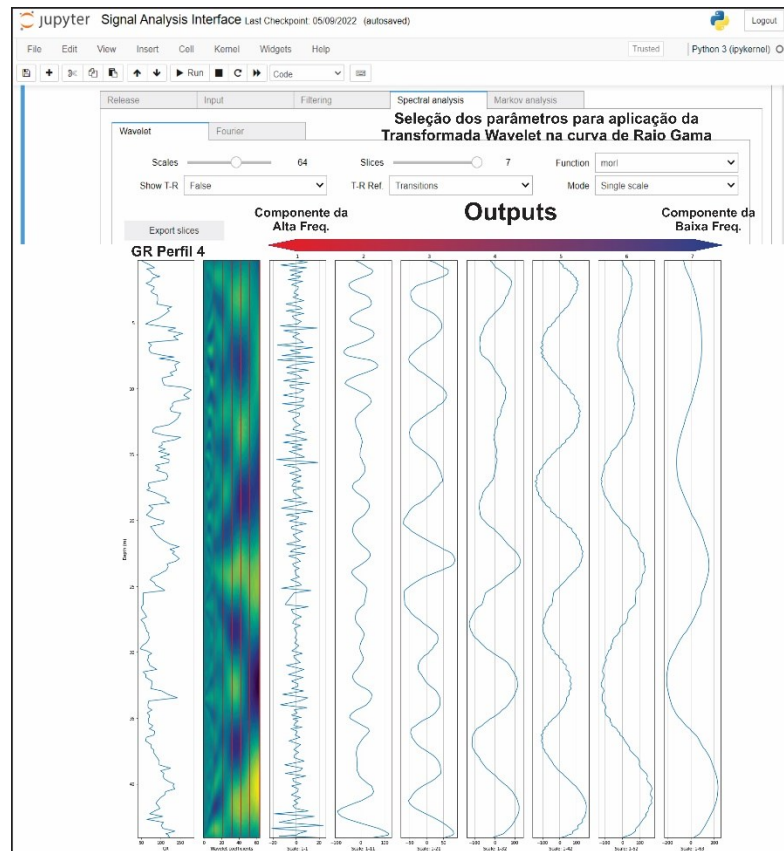


Figura 3: Exemplo da aplicação da transformada Wavelet que decompõe diferentes componentes de sinais a partir da curva de entrada.

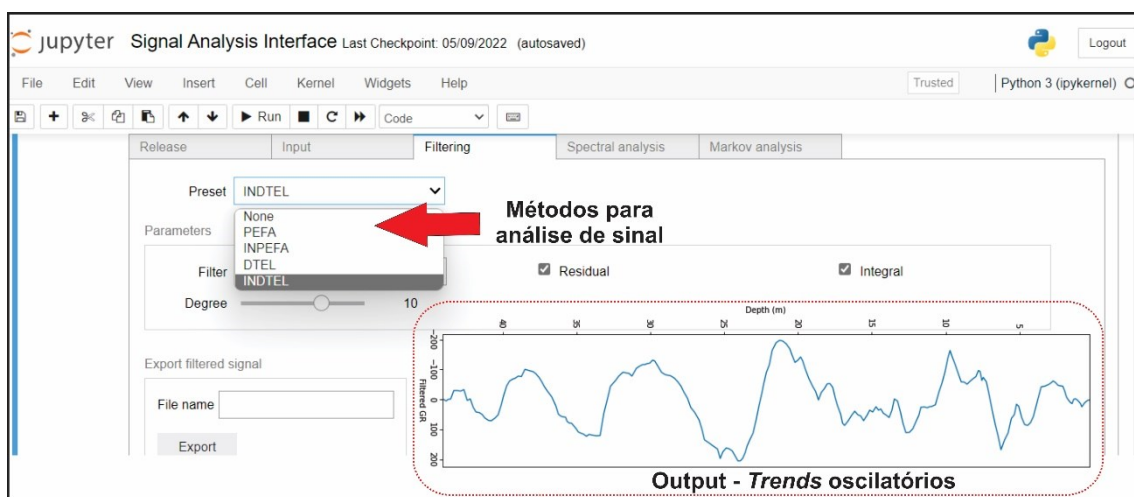


Figura 4: Exemplo de output gerado a partir do método INDTEL, destacando trends oscilatórios.

## 2. GEOLOGIA E ESTRATIGRAFIA DA BACIA DE SALTA

A bacia de Salta, também referenciada como bacia do Grupo Salta (Turner, 1959; Marquillas *et al.* 2005; Gianni *et al.* 2015), se desenvolveu durante o Cretáceo-Paleógeno na porção centro-oeste da América do Sul (Rohais *et al.* 2019). Sua extensão atual engloba a Argentina, Bolívia e Paraguai, com cerca de 70% da sua área no território argentino. Sua gênese está relacionada ao processo de rifteamento do supercontinente Gondwana (Keidel, 1921; Viramonte *et al.* 1999), fazendo parte do segmento tríplice que foi abortado enquanto o rifteamento principal fragmentava o *Gondwana* nas porções mais meridionais (Ramos, 1999; Matos, 2021) (Figura 5). A principal relevância dessa bacia está associada à sua grande extensão geográfica, excelente preservação de afloramentos e produção de hidrocarbonetos no seu setor oeste (Turic *et al.* 1987; Marquillas & Salfity, 1988; Gómez Omil *et al.* 1989; Salfity & Marquillas, 1994; Magalhães *et al.* 2020).

A evolução geotectônica da bacia é registrada nos estágios rifte e pós-rifte, onde cada fase apresenta particulares mecanismos de subsidência, resultando em diferentes características deposicionais (Roemers, 2014). Configurações estruturais compartimentaram a Bacia de Salta em quatro sub-bacias (Salfity, 1979; Bianucchi *et al.* 1981; Salfity & Marquillas, 1994) separadas pelo arco vulcânico de Salta-Jujuy (Reyes, 1972), delimitando a sub-bacia Lomas de Olmedo, no setor leste; sub-bacia Sey, à oeste; sub-bacia Tres Cruces ao norte e a sub-bacia Metán-Alemánia no extremo sul, sendo essa última o foco desse estudo (Figura 6).

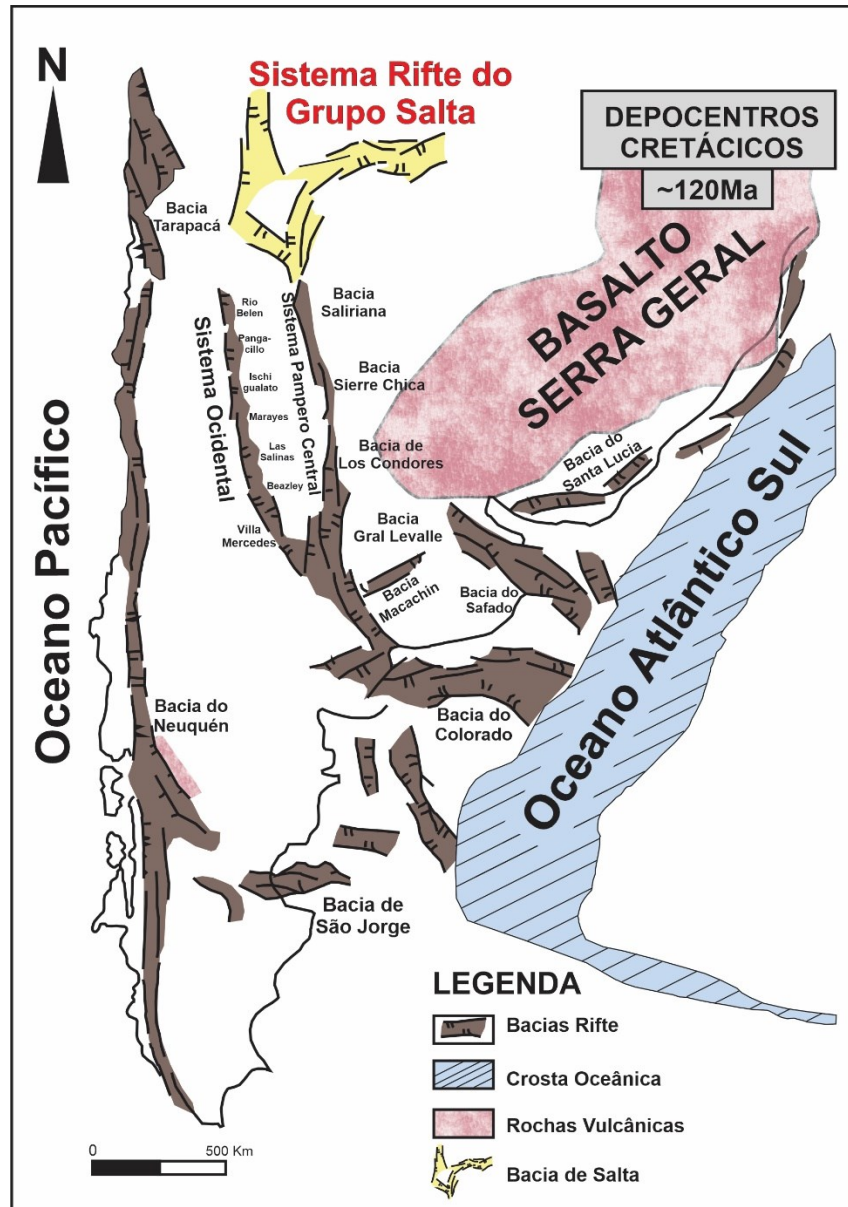
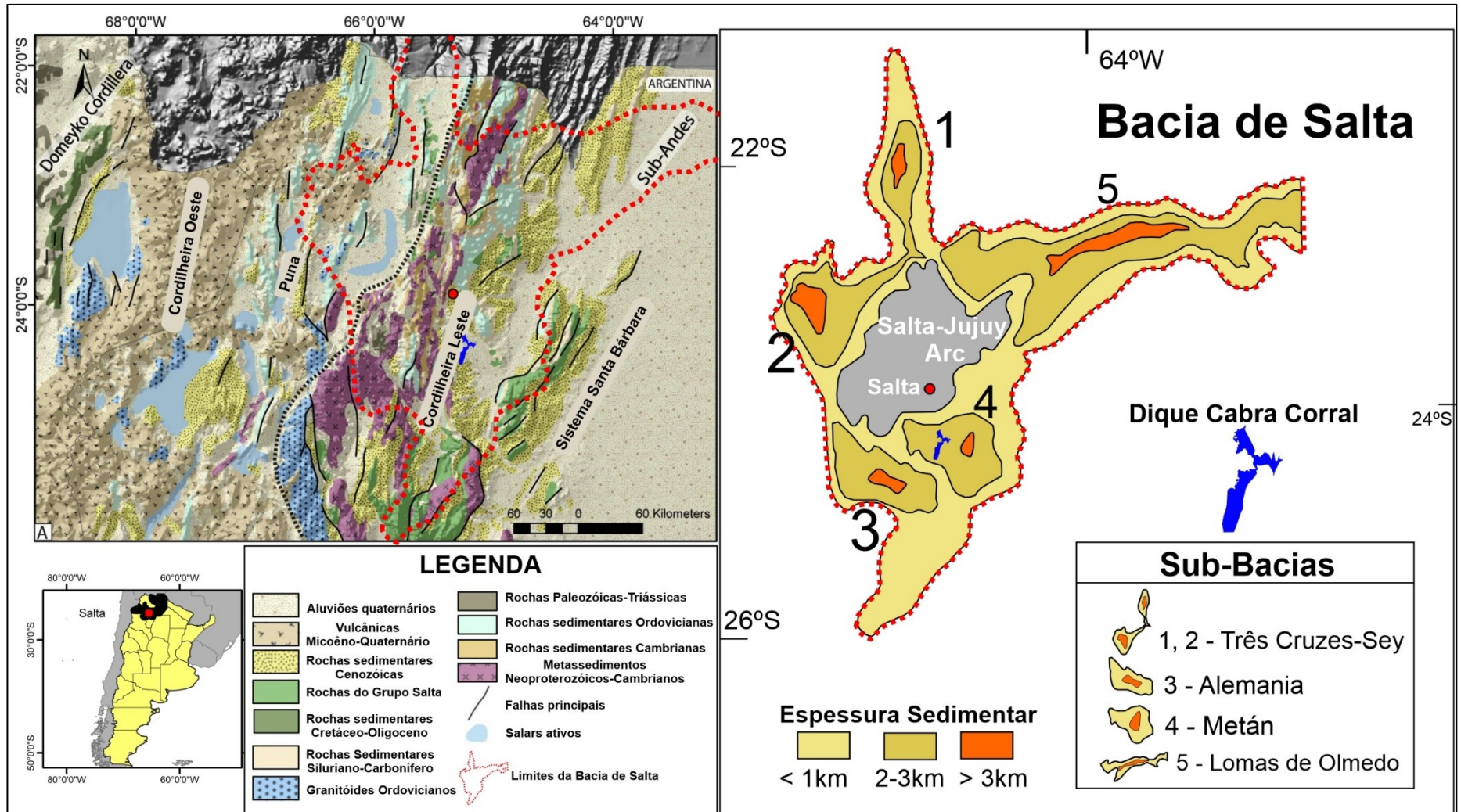


Figura 5: Conjunto de bacias alinhadas segundo a direção NW-SE, que se formaram em resposta à fragmentação do Gondwana. Original em Ramos (1999), modificado de Bento-Freire (2012).



A fase rifte é caracterizada por depósitos continentais fortemente influenciados por controles estruturais, se estendendo desde o Neocomiano Superior até o Maastrichiano Inferior (Marquillas *et al.* 2005). A transição com as rochas do embasamento pré-rifte é marcada pela presença de uma discordância angular bem definida ao longo da bacia (Hernández *et al.* 1999).

No início do processo de rifteamento, falhas incipientes produzem pequenos núcleos com bacias isoladas (Ramos, 1988). A sedimentação era dominada por leques aluviais e conglomerados junto à borda de falha, e por sistemas fluviais na borda flexural, de modo semelhante ao modelo proposto por Gawthorpe & Leeder (2000) para os estágios iniciais de um rifte. À medida que as taxas do estiramento crustal aumentavam, as pequenas bacias se conectavam e eram limitadas por falhas com grandes rejeitos em resposta ao clímax do rifte (Prosser, 1993). Nesta fase são instalados lagos mais profundos e com potencial para geração de matéria orgânica. Esses lagos atingiam mais de 4 mil metros de profundidade na sub-bacia Metán-Alemánia (Marquillas *et al.* 2005).

Após o clímax do rifte, a geomorfologia é alterada em função da estruturação dos *grabens* e *horsts* que se formam ao longo da região. Por conta das diferentes naturezas reológicas, influenciadas principalmente pelos diferentes tipos de rochas do embasamento, taxas de subsidências diferenciais favorecem para que alguns *horsts* se destaquem como altos estruturais conhecidos por “umbrais” (Cominguéz & Ramos, 1995; Cristallini *et al.* 1998), os quais delimitam depocentros mais isolados (Reyes & Salfity, 1973). Por vezes esses altos fazem a conexão da borda da bacia até o Arco de Salta y Jujuy, conferindo um aspecto radial para a bacia (Sabino, 2002; Bento-Freire, 2012). Alguns autores se baseiam nos umbrais para delimitar um número maior de sub-bacias (Salfity, 1980; Sabino, 2002) (Figura 7).

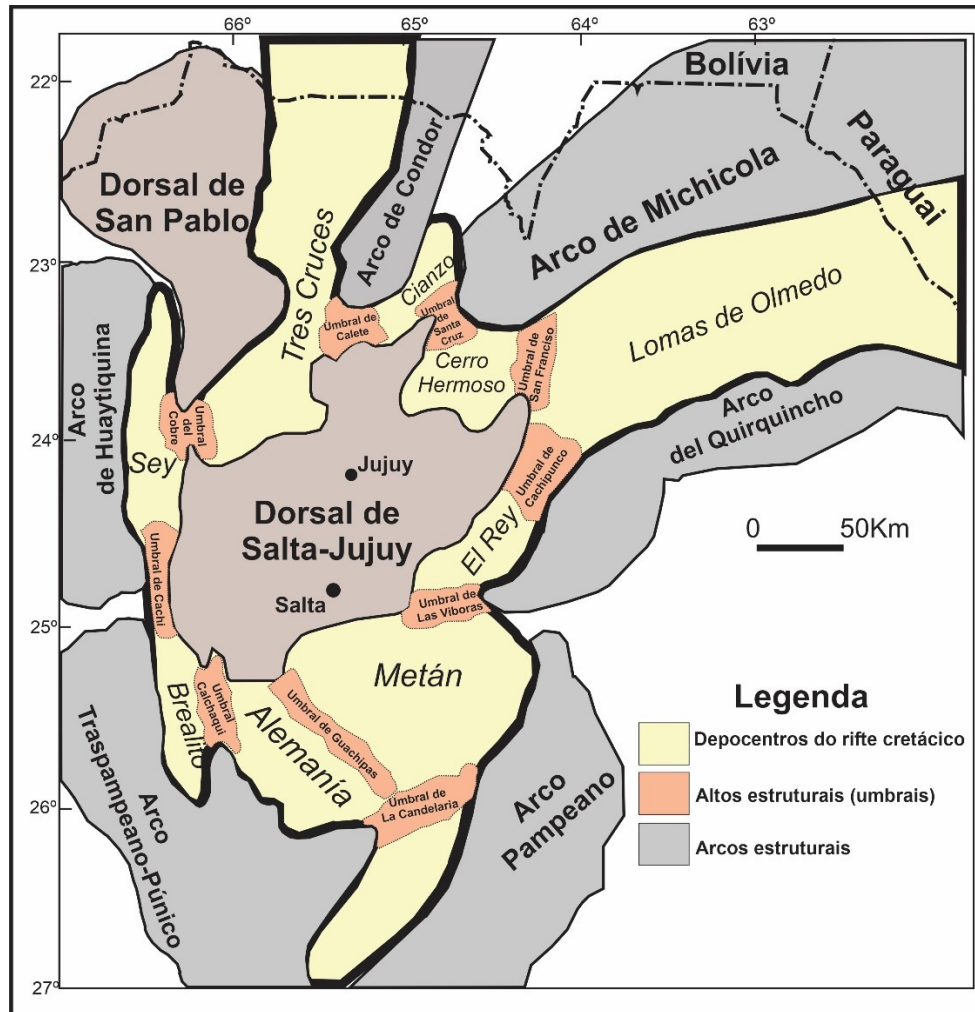


Figura 7: Configuração dos arcos que delimitam a bacia de Salta, bem como a disposição dos umbrais que compartimentam os principais depocentros da bacia. Original em Sabino (2002), modificado de Bento-Freire (2012).

O clímax do rifte cessa no Maastrichiano Superior, com a transição do mecanismo de subsidência mecânica para a termal. Essa transição resulta em significativa diminuição nas taxas de subsidência, a qual influencia para a instalação de um novo padrão sedimentar que caracteriza a fase pós-rifte da bacia (Del Papa & Salfity, 1999; Salfity & Marquillas, 1989). O relevo que era caracterizado por grandes desníveis topográficos, torna-se progressivamente mais equilibrado à medida que a erosão avança, diminuindo também o aporte sedimentar para a bacia (Hernández *et al.* 1999; Gomez Omil & Boll, 2005). Esse processo acaba por unir os antigos depocentros delimitados pelos umbrais, e originam uma bacia *sag* ampla e rasa dominada por depósitos lacustres tabulares (Bento-Freire, 2012; Roemers, 2014), ou ligeiramente cuneiformes quando próximos aos paleoaltos da fase rifte (Hernández *et al.* 1999).

A última etapa evolutiva da bacia perdura desde o final do Eoceno até o Recente, onde a bacia passou a ser dominada por um regime tectônico de *foreland* em resposta à Orogenia Andina (Ramos, 1988; Gianni et al. 2015). Os esforços compressivos provocaram uma grande deformação e inversão da bacia, reativando antigas falhas e criando grandes faixas dominadas por falhas de empurrão (Hernández *et al.* 1999).

Ao longo da evolução tectonossedimentar da Bacia do Grupo Salta, vários episódios magmáticos foram identificados. O evento de maior impacto ocorreu entre 80-75Ma, caracterizado por uma suíte alcalina, e o último evento vulcânico é datado entre 65-60Ma (Viramonte *et al.* 1999; Gianni *et al.* 2005). Esses eventos se intercalam à sedimentação da bacia a partir de intrusões de diques ígneos e depósitos de tufos vulcânicos.

## 2.1 Estratigrafia da bacia do Grupo Salta

Os primeiros estudos de caracterização e mapeamento das unidades sedimentares da bacia de Salta datam do século XIX, a partir do trabalho pioneiro de Brackebush (1891), que denominou pela primeira vez os depósitos cretácicos como “Sistema Salta”. Com o salto tecnológico das décadas posteriores, a partir da disponibilização de dados sísmicos e integração de metodologias estratigráficas e paleontológicas mais avançadas, Turner (1959) aplicou a nomenclatura sugerida pelo primeiro guia para princípios estratigráficos, terminologia e procedimentos classificatórios, que fora criado e apresentado formalmente em 1952, no 19º Congresso Internacional de Geologia, na cidade de Algiers, Argélia (Gradstein et al. 2020). Assim, o antigo sistema Salta, passou a ser conhecido formalmente como Grupo Salta, englobando rochas formadas desde o Cretáceo até o Paleógeno. Posteriormente, o Grupo Salta foi subdividido nos sub-grupos Pirgua (Reyes & Salfity 1973), Balbuena e Santa Barbara (Moreno 1970) (Figura 8). A evolução do Grupo Salta registra intervalos depositados em resposta a contextos de rifte, *sag* e pós-rifte.

Tempo (Ma)				Litoestratigrafia			Ambientes Depositionais	Estágios Tectônicos
	Período	Época	Idade	Grupo	Sub-Gp.	Formação		
47.8	Paleógeno	Eoceno	Ypresiano	SALTA	Santa Bárbara	Maiz Gordo	Flúvio/Lacustre	Rifte II* Sag II
56.0			Thanetiano			Mealla		
59.2		Paleoceno	Selandiano		Tunal			
61.6			Daniano		Yacoraite			
66.0	Cretáceo Superior		Maastrichiano	Balbuena	Lecho	Lacustre	Pós-Rifte Sag	
72.1			Campaniano		VULCÂNICAS	Los Blanquitos		Flúvio/Eólico
83.6					VULCÂNICAS	Las Curtiembres		Lacustre
				Pirgua	La Yesera			

Figura 8: Carta estratigráfica do Grupo Salta na Sub-Bacia Metán-Alemánia. Adaptado de Magalhães *et al.* (2020).

### Depósitos da fase rifte (Barremiano – Campaniano)

As rochas da fase rifte são representadas pelo Sub-grupo Pirgua, constituídas por depósitos continentais clásticos com cores avermelhadas a roxas (Seggiaro *et al.* 2019). São compostas por conglomerados, arenitos, siltitos e rochas vulcânicas alcalinas (Gallinski & Viramonte 1988), apresentando geometria fortemente condicionada pelo arcabouço estrutural (Grier *et al.* 1991). A sedimentação iniciou simultaneamente ao evento vulcânico Alto de Las Salinas, intercalando-se com rochas basálticas e riolíticas (Bossi 1969; Marquillas *et al.* 2005). Três principais ciclos constituem o preenchimento do rifte, com os dois primeiros representando o sin-rifte basal, expressos pelas formações La Yesera e Las Curtiembres, seguindo um padrão *fining-upwards*, e um sin-rifte superior representado pela Formação Los Blanquitos, com padrão *coarsening-upwards* (Marquillas *et al.* 2005) (Figura 9).

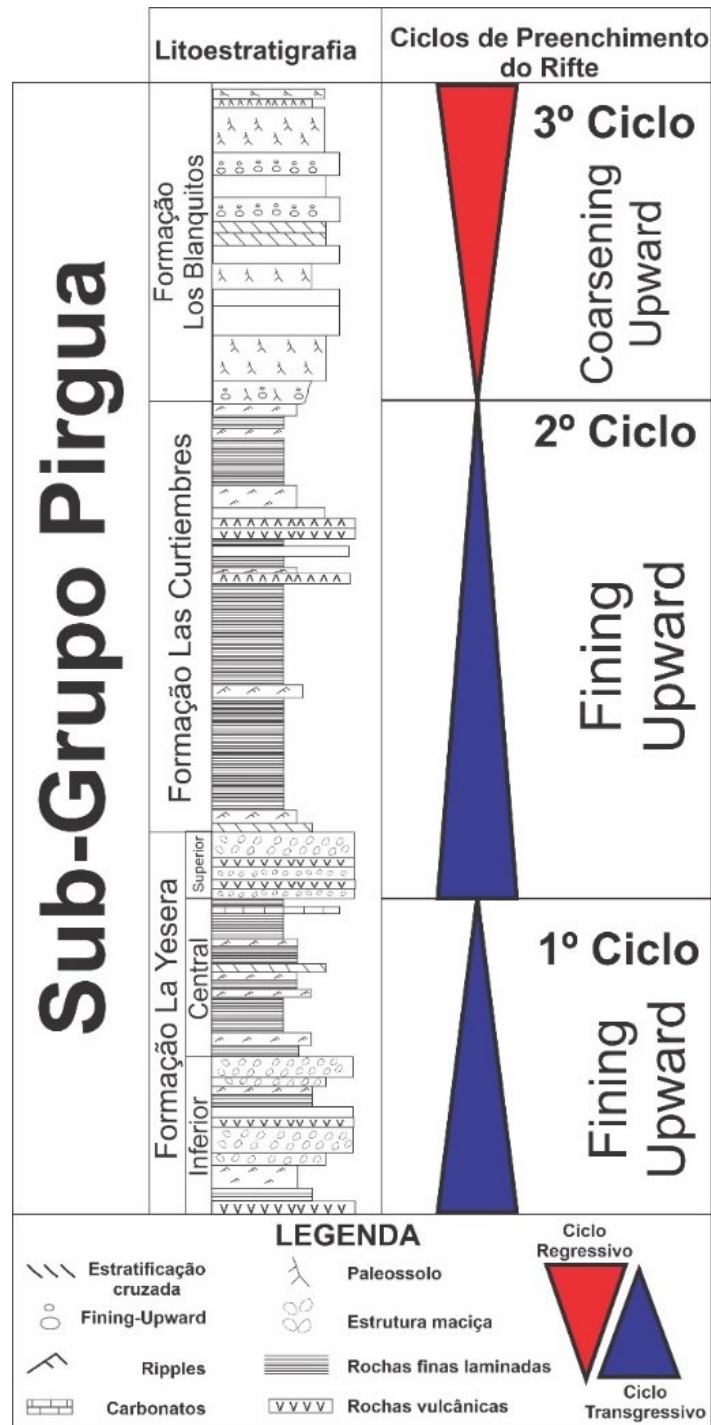


Figura 9: Estratigrafia do Sub-Grupo Pirgua, evidenciando os três ciclos de preenchimento do estágio rifte (Modificado de Marquillas *et al.* 2005).

Em função dos grandes depocentros gerados por falhas, as geometrias dos estratos são predominantemente cuneiformes, com espessuras variando de 6000 metros (Sub-Bacia Lomas Olmedo), até 1000 metros (Sub-Bacias Tres Cruces) (Gomez Omil *et al.* 1989; Sabino, 2002) (Figura 10).

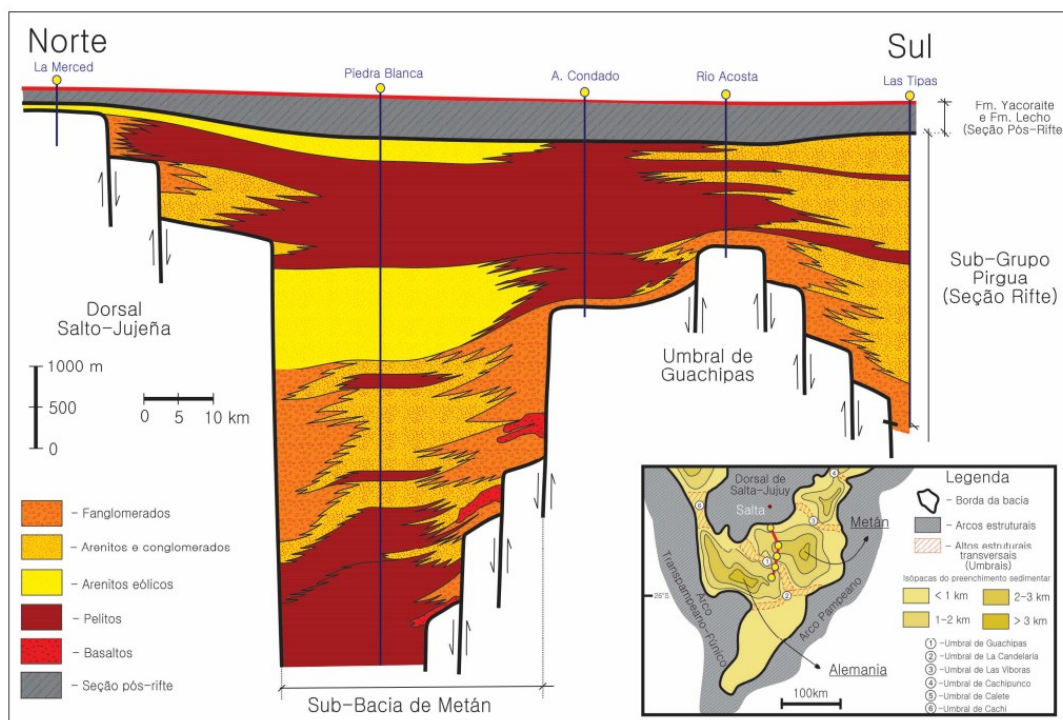


Figura 10: Configuração das rochas do Sub-Grupo Pirgua preenchendo o rifte. Detalhe para a grande espessura da unidade e a geometria cuneiforme dos estratos. Disponível em Pedrinha (2014), original em Hernandez et al. (1999).

### Depósitos da fase pós-rifte (Maastrichiano – Bartoniano)

A fase pós-rifte é composta pelas rochas do Sub-grupo Balbuena e Santa Bárbara. O primeiro foi depositado entre o Maastrichiano e o Paleoceno, representando o estágio de preenchimento pós-rifte inicial da bacia. Já o Sub-Grupo Santa Bárbara foi depositado entre Paleoceno médio (~60Ma) e o Bartoniano (~37Ma), representando uma deposição associada com as menores taxas de subsidência da bacia, o que contribuiu para alta continuidade lateral das unidades depositadas (Marquillas *et al.* 2005).

### Sub-Grupo Balbuena (Maastrichiano-Daniano)

O Sub-grupo Balbuena é composto pelas formações Lecho, Yacoraite e Tunal. A porção basal é composta por arenitos esbranquiçados, os quais caracterizam a Formação Lecho. A seção intermediária é caracterizada pela forte intercalação entre carbonatos e pelitos da Formação Yacoraite. A parte superior é dominada por pelitos negros das formações Olmedo e Tunal (Figura 11) (Marquillas *et al.* 2005). Registros vulcânicos se intercalam à sedimentação a partir de intrusões de diques ígneos e

depósitos de tufos vulcânicos, gerando excelentes camadas guias para datação e correlação regional. Uma vez que o presente trabalho é focado na Formação Yacoraite, esta será mais detalhada nos próximos tópicos.

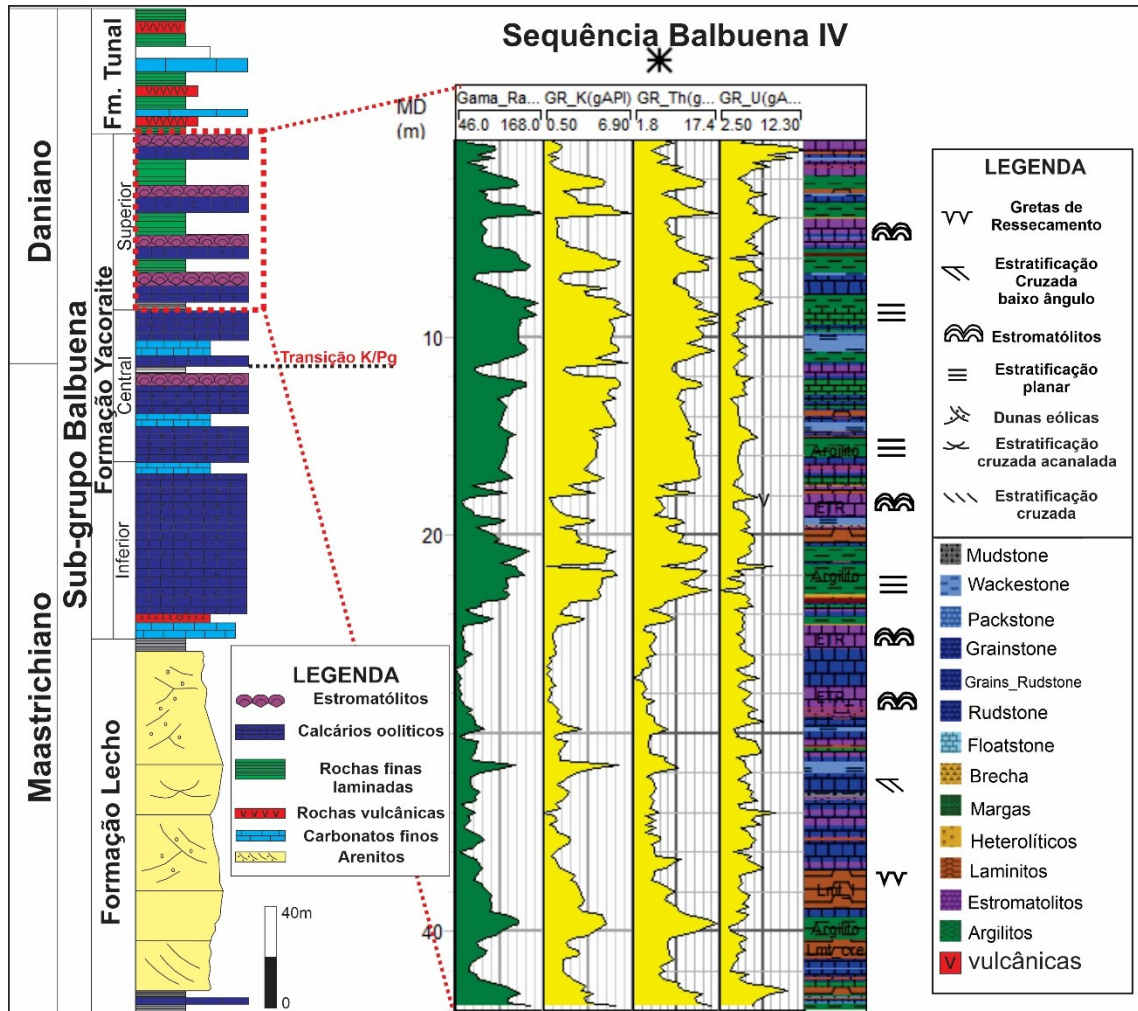


Figura 11: Seção estratigráfica geral do Supergrupo Balbuena, englobando as formações Lecho e Yacoraite. Modificado de Marquillas *et al.* (2005) e Bento-Freire (2012).

### Sub-grupo Santa Bárbara (Daniano – Bartoniano)

Desde o Paleoceno médio a bacia permanecia com taxas de subsidência muito baixas, o que deu origem a deposição de três unidades com grande continuidade regional, são as formações Mealla, Maíz Gordo e Lumbreira. A sucessão é dominada por arenitos finos avermelhados, siltitos e argilitos. Esses depósitos representam o preenchimento final do estágio pós-rifte da bacia do Grupo Salta (Marquillas *et al.* 2005).

Na Sub-bacia Lomas de Olmedo há a constatação de uma mudança no padrão da subsidência no início da deposição da Fm. Mealla em função de um novo pulso distensivo (Starck, 2011) (Figura 12), o qual reativou falhas antigas. Por conta desse evento, alguns autores costumam referenciar os estágios rifte II e sag II referindo-se ao contexto tectônico atuante no momento da deposição do Sub-grupo Santa Bárbara (Bianucci *et al.* 1981; Gomez Omil *et al.* 1989).

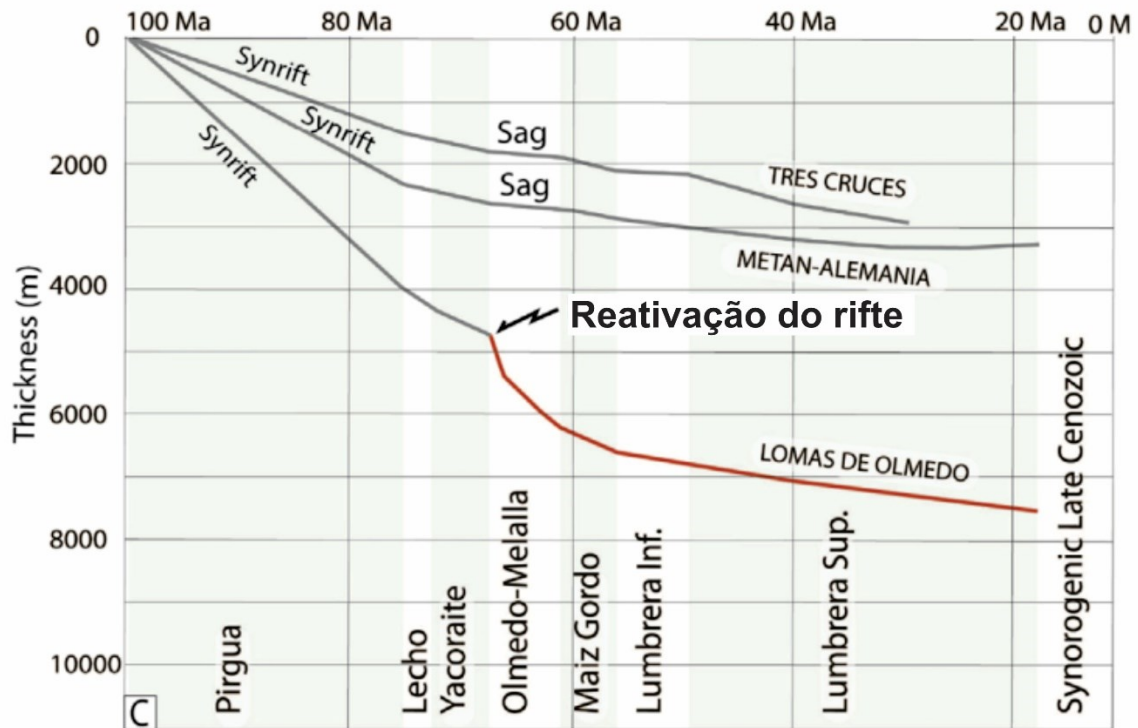


Figura 12: Reativação do rifte ocasionando mudança no padrão de subsidência na sub-bacia Lomas de Olmedo. Modificado de Starck (2011).

De todo modo, esse evento não foi capaz de gerar depocentros significativos que pudessem acumular espessuras comparáveis àquelas do primeiro rifte. Com isso, os depocentros foram preenchidos rapidamente, e foram recobertos por sedimentos com geometrias tabulares (Hernández *et al.* 1999), dominado pelo mecanismo de subsidência termal que durou até o Eoceno, quando a bacia foi invertida (Bento-Freire, 2012).

## 2.2 Aspectos gerais da Formação Yacoraite

A Fm. Yacoraite é um importante horizonte marcador no Grupo Salta devido à sua coloração acinzentada que a distingue das demais (Marquillas *et al.* 2005) (Figura 13). Suas variações faciológicas têm permitido a caracterização de intervalos estratigráficos informais, como o Calcário Amblayo (Marquillas *et al.* 2011) e o Marco Maradona (Bento-Freire, 2012). Essas subdivisões permitem o reconhecimento estratigráfico desses estratos em diferentes locais na bacia, facilitando sua correlação regional. A Fm. Yacoraite também registra um importante marco estratigráfico internacional, que é a passagem do Cretáceo para o Paleógeno (Marquillas *et al.* 2007) (Figura 14). Estudos isotópicos apontam valores negativos do  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^{13}\text{C}$  (Marquillas *et al.* 2007; Rohais *et al.* 2019) seguindo uma tendência concordante com os valores internacionais que delimitam essa transição (Gradstein *et al.* 2020).

A deposição ocorreu entre o Maastrichiano e o Daniano como produto de um sistema lacustre (Marquillas *et al.* 2007). Seus principais controladores são balizados pelo equilíbrio entre taxas de acomodação, nível freático e a disponibilidade de sedimentos. Durante a deposição da Fm. Yacoraite, as taxas de subsidência eram constantes (Starck, 2011), o que resulta em uma maior imposição climática na assinatura das variações faciológicas e arquitetura estratigráfica (Seranne & Anka, 2005; Scherer *et al.* 2015). Dessa forma, o empilhamento faciológico e a presença de estruturas sedimentares suportam os ciclos climáticos, como por exemplo, os ciclos em *shallowing-upwards*, com topos marcados por superfícies de exposição.

Datações recentes com o método U/Pb em zircões presentes nas rochas vulcanossedimentares intercaladas (Rohais *et al.* 2019; Montano *et al.* 2022) propõem um intervalo máximo para a deposição em torno de 6.8 Ma. Um modelo de idade mínima também foi estimado a partir da datação U/Pb nas fases carbonáticas precipitadas tardiamente, estimando um intervalo de 4,7 Ma. Regressões lineares a partir dessas datações, sugerem que a base da unidade pode ter idades de  $68.1 \pm 0.9$  Ma (datação em zircões) ou  $67.9 \pm 1.7$  Ma (datação em carbonatos), e seu limite superior de  $62.3 \pm 0.5$  Ma (datação em zircões) ou  $61.9 \pm 1.2$  Ma (datação em carbonatos) (Rohais *et al.* 2019; Montano *et al.* 2022).

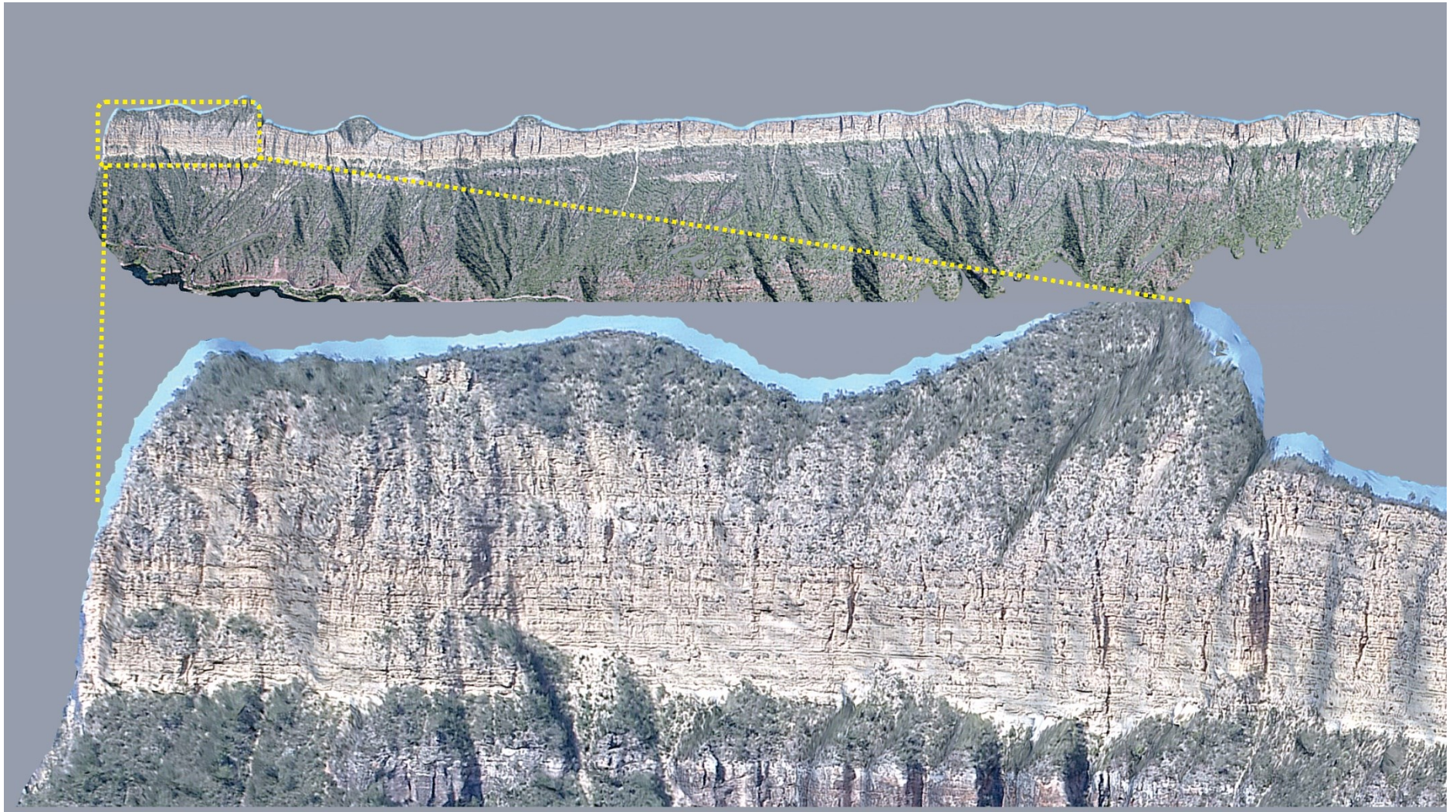


Figura 13: Vista panorâmica da Formação Yacoraité na região do Dique Cabra Coral. Zoom in detalhando o aspecto contínuo das camadas. Fonte: @felipeguadanin - Modelo virtual de afloramento - Sketchfab 2023.

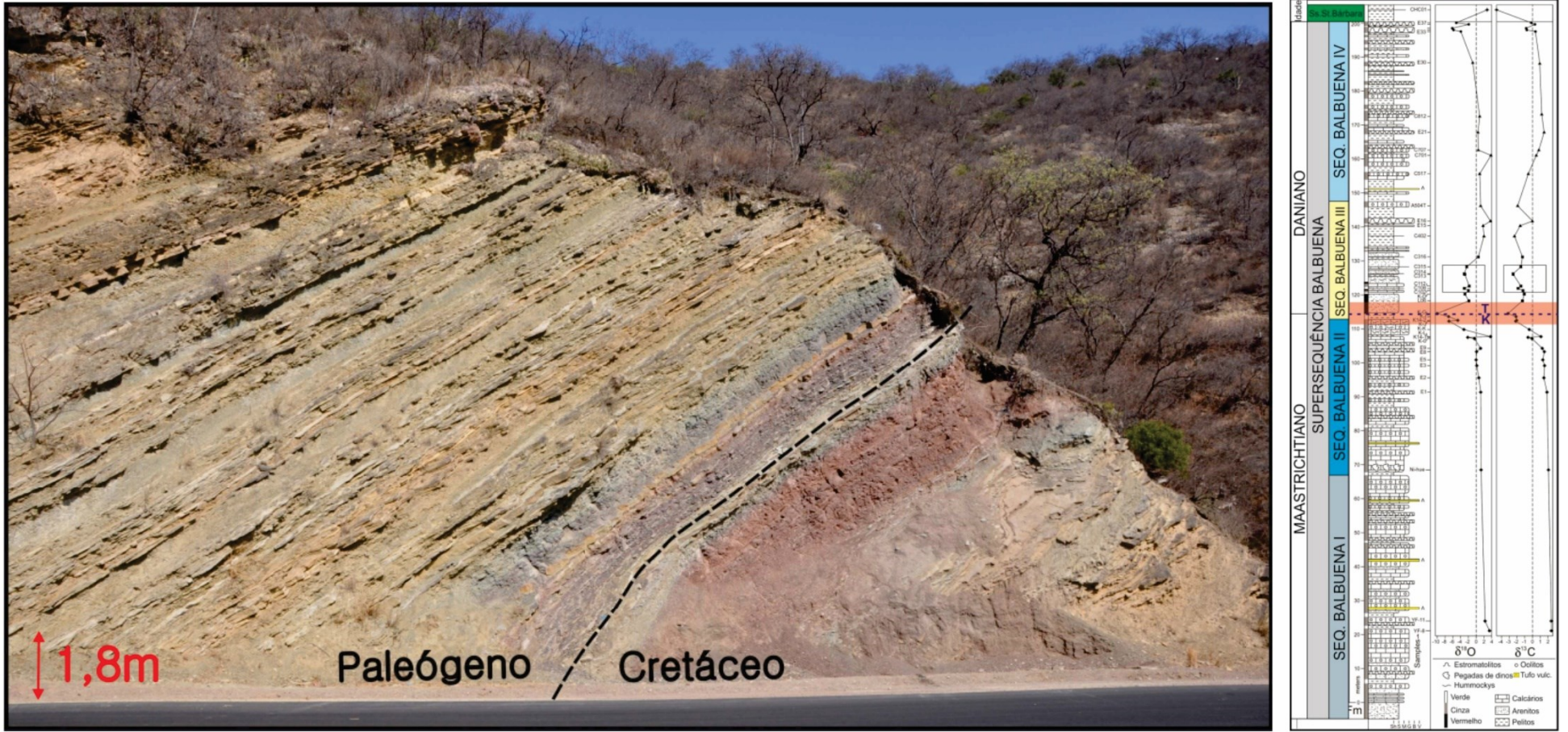


Figura 14: Foto de afloramento (Pedrinha 2014); Perfil à direita: Fonte: Bento-Freire (2012). Original em Marquillas *et al.* 2007.

A Formação Yacoraite é composta por estromatólitos, laminitos microbiais, *grainstones*, *wackestones*, *mudstones*, margas, argilitos, siltitos, e arenitos subordinados (Del Papa & Salfity, 1999; Salfity & Marquillas 1989; Marquillas *et al.* 2005; Bento-Freire, 2012; Roemers, 2014; Pedrinha, 2014; Rohais *et al.* 2019; Deschamps *et al.* 2020; Montano *et al.* 2022; Mutti *et al.* 2023). Um aspecto estratigráfico marcante é a sua ciclicidade interna em alta frequência evidenciada pela intercalação entre intervalos pelíticos e carbonáticos. Em termos da estratigrafia de sequências, a Formação Yacoraite engloba as sequências Balbuena II, III e IV, consideradas por Gomez Omil & Boll (1999) como sequências de terceira ordem *sensu* Vail *et al.* (1977).

Essa formação apresenta rico conteúdo de macrofósseis, como pegadas e fragmentos bem preservados de dinossauros terópodes (Alonso, 1980; Alonso & Marquillas, 1986) e crocodilos (Gasparini & Buffetaut, 1980). Também ocorrem ostracodes (Moroni, 1982; Quattrocchio, 2006; Ceolin *et al.* 2022), pelecípodes, gastrópodes (Salfity & Marquillas, 1999; Cónsole Gonella *et al.* 2009), algas e peixes (Benedetto & Sanches, 1972; Aceñolaza, 1968) que auxiliam na interpretação quanto ao ambiente deposicional (Pedrinha, 2014).

### 2.3 Controles deposicionais da Formação Yacoraite

A fisiografia da bacia de Salta teve forte influência durante a instalação do ambiente deposicional que originou a Formação Yacoraite, imprimindo diferentes condições ao longo da bacia. Nas sub-bacias mais ao norte, o ambiente deposicional era alcançado por incursões marinhas a partir dos corredores epeiricos que as invadiam desde o Norte. Na Sub-Bacia Três Cruces, fósseis de amonóides (Cónsole Gonella *et al.* 2009), foraminíferos e dinoflagelados (Méndez & Viviers, 1973) sustentam uma influência marinha, no entanto, estes fósseis são encontrados em associação frequente com outros elementos típicos de água doce, como algas carófitas encontradas em pelitos (Musachio, 1972). Isso corrobora que as condições não eram predominantemente marinhas, mas que em certos momentos mares epicontinentais se conectavam a essas bacias (Salfity & Marquillas, 1999; Hernández *et al.* 1999). Por outro lado, acredita-se que o Arco de Salta-Jujuy protegeu a Sub-bacia Metán-Alemania, impedindo que as ingressões marinhas invadissem a região mais ao sul da bacia. Dados isotópicos confirmam a assinatura de maior restrição na

Sub-Bacia Metán-Alemánia, com valores de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variando entre 0.7140 e 0.7156, constatando que a deposição ocorreu sob forte influência continental (Sial *et al.* 2001) (Figura 15). Dessa forma, a Sub-Bacia Metán-Alemánia foi depositada em um ambiente essencialmente lacustre.

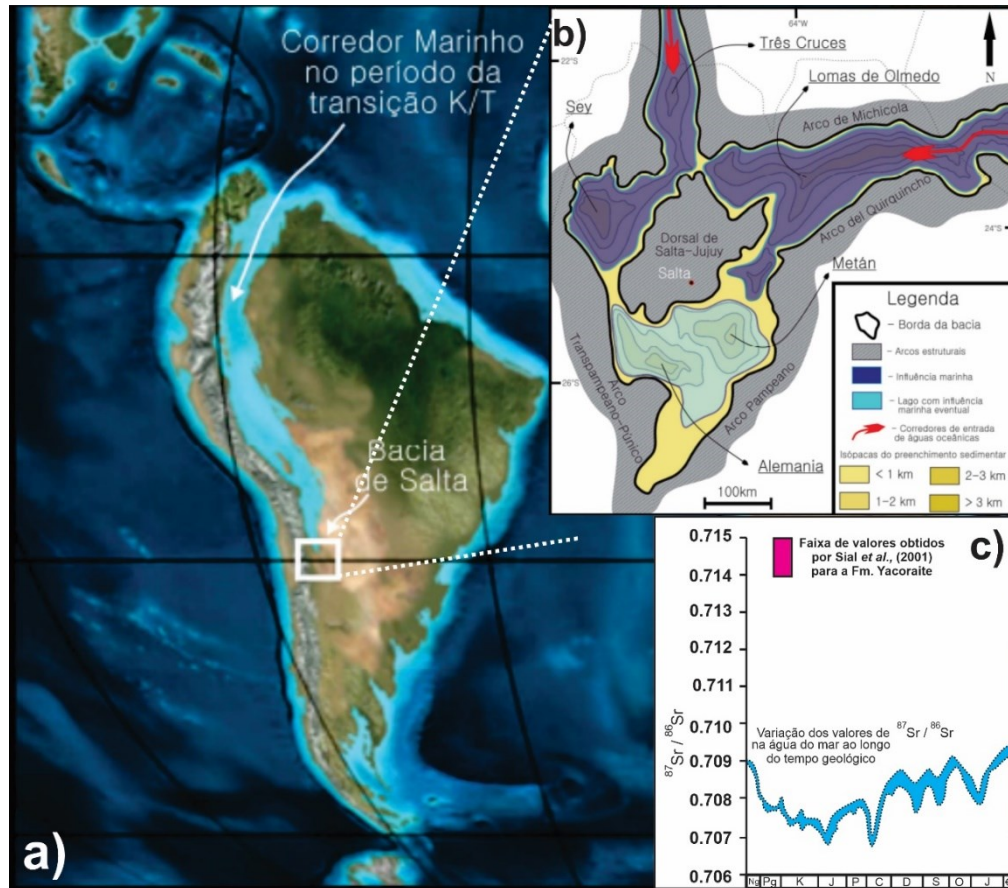


Figura 15: A e B) Destaques para os corredores epicontinentais que, esporadicamente, conectavam as sub-bacias mais ao norte com o oceano aberto. Imagens modificadas de Pedrinha (2014). C) Comparação dos valores isotópicos de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  obtidos por Sial *et al.* (2001), com a concentração de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  presente na água do mar.

Bohacs *et al.* (2000) individualizam três tipos principais de sistemas lacustres – *Underfilled Lakes*, *Overfilled Lakes* e *Balanced-Filled Lakes*. *Underfilled Lakes* são aqueles onde o volume de água presente não é suficiente para ultrapassar seu vertedouro, mesmo em épocas mais úmidas, o que favorece a concentração de íons e a precipitação de evaporitos. *Overfilled Lakes* são aqueles que sempre estão cheios, com a água minando a partir do seu vertedouro mesmo em épocas de seca. A dinâmica desse tipo de lago não favorece a formação de paleossolos e feições de exposição. Já o *Balanced-Filled Lake* é transitório entre os dois sistemas anteriores, onde nos períodos de maior umidade, seu nível ultrapassa o vertedouro, enquanto

que no período de maior aridez, a evaporação favorece para um grande ressecamento e retração de sua linha de costa.

Bento-Freire (2012) caracteriza o sistema lacustre da sequência Balbuena IV como um representante dos lagos *Balanced-Filled* (Figura 16). A dinâmica vigente nesses sistemas explicaria a frequente ocorrência de paleossolos e feições de exposição, bem como a ausência de evaporitos, já que a água concentrada nos períodos mais áridos seria reciclada e extravasada pelo vertedouro já na fase seguinte de maior umidade. Assim, o lago nunca alcançaria uma concentração suficiente para a precipitação dos evaporitos.

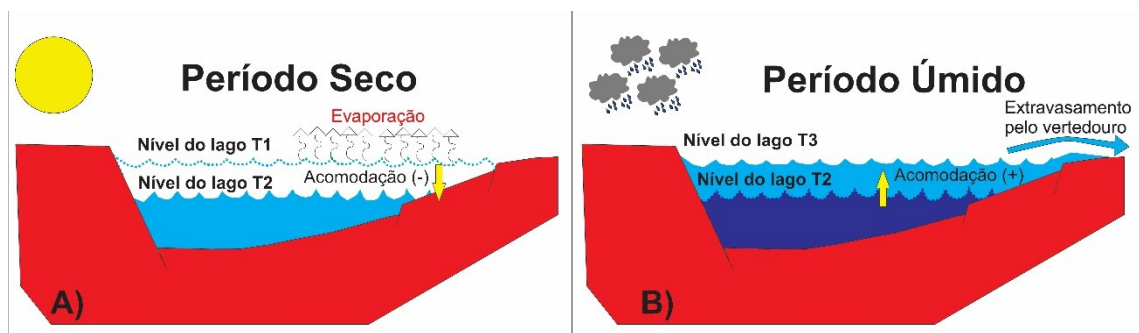


Figura 16: Modelo *Balanced-Filled Lake* (Bohacs *et al.* 2000), o qual se encaixa melhor para explicar a dinâmica da sequência Balbuena IV (Bento-Freire, 2012).

O equilíbrio entre precipitação e evaporação controlam a posição da linha de costa e, conseqüentemente, os padrões de empilhamentos sedimentares. Quão maior for a aridez, maior será a retração do sistema, resultando em empilhamentos sedimentares com padrões progradacionais, enquanto que momentos de maior umidade serão favoráveis para a transgressão da linha de costa e formação de empilhamentos retrogradacionais (Bento-Freire, 2012). Períodos mais secos também convergem para mudanças nas condições químicas do lago, favorecendo para que as águas fiquem cada vez mais límpidas, atingindo a alcalinidade e as temperaturas ideais para o desenvolvimento de carbonatos que se formam em condições restritas, como os estromatólitos e laminitos microbiais. Já os períodos mais úmidos contribuem para uma maior entrada de sedimentos externos, “sujando” o lago e anulando a precipitação carbonática, depositando arenitos nas bordas da bacia, e sedimentos mais finos nas porções distais.

Roemers (2014) apresenta valores isotópicos de  $\delta^{18}\text{O}$  em torno de +4.5 para os estromatólitos que ocorrem no topo da seção da sequência Balbuena III. Esses resultados corroboram com a interpretação de que estes carbonatos tiveram gênese

associada a ambientes de maior restrição ambiental, associados a um sistema lacustre fechado (Talbot, 1990). Romero-Sarmiento *et al.* (2019), estudando intervalos pelíticos dessa mesma sequência, documentaram um teor de 10% de matéria orgânica Tipo I (característica de ambientes lacustres) nos intervalos mais pelíticos dessa unidade. A observação desses extremos dentro de uma mesma sequência, reforça o caráter cíclico o qual a Formação Yacoraite foi submetida em sua deposição.

#### 2.4 Facies sedimentares da Sequência Balbuena IV

A seguir, serão apresentadas as fácies sedimentares presentes na Sequência Balbuena IV, que é o foco desse estudo. Maiores informações sobre as fácies e os processos que ocorrem nas sequências Balbuena II e III podem ser encontrados em Pedrinha (2014) e Roemers (2014), respectivamente.

As fácies carbonáticas são representadas principalmente por *grainstones*, estromatólitos, laminitos microbiais, *rudstones*, *packstones*, *wackestones* e *mudstones*, que são produtos de um clima árido. Já as fácies siliciclásticas ocorrem em resposta a momentos de maior umidade, sendo compostas por siltitos, argilitos, margas, arenitos, além de pontuais tufos vulcânicos. As principais características das fácies siliciclásticas e carbonáticas serão apresentadas de forma resumida nas tabelas 1 e 2.

Quadro 1: Resumo das fácies carbonáticas encontradas na Sequência Balbuena IV. Fonte Bento-Freire (2012).

<b>Fácies</b>	<b>Caracterização macroscópica</b>	<b>Processos deposicionais</b>
Grainstones	Compostos principalmente por oólitos, oncólitos ou por pelóides. Tamanho de grão variando entre areia fina a muito grossa, com seleção moderada. Podem conter intraclastos de argila. Possuem estrutura maciça ou estratificações cruzadas de baixo ângulo. Apresentam geometria sigmóide, lenticular ou tabular, com marcas de ondas no topo	Tração subaquosa sob células de convecção oscilatórias (Bento-Freire, 2012);  Mineralização induzida por microorganismos (Dupraz et al. 2009)
Estromatólitos	Depósitos sedimentares laminados com estruturas internas dendriformes, arbustiformes ou arborescentes. Apresentam geometria dômica ou em colchetes. São associados aos laminitos, grainstones wackestones e rudstones	Mineralização induzida por microorganismos (Dupraz et al. 2009) e processos de <i>trapping and bidding</i> (Black, 1993).
Laminitos	Fácies laminada formada por processos organosedimentares. Podem ter laminação lisa ou crenulada, formada pela intercalação entre lâminas ricas em sedimentos sílticos e lâminas ricas em lama carbonática	Mineralização induzida por microorganismos (Dupraz et al. 2009),  <i>trapping and bidding</i> (Black, 1993); Precipitação química (Bento-Freire, 2012)
Rudstones	Rocha carbonática suportada por grãos (cascalho, areia). Apresenta pobre seleção e abundante presença de intraclastos de laminitos, estromatólitos, grainstones.	Tração subaquosa sob células de convecção oscilatórias e fluxos unidirecionais (Bento-Freire, 2012);
Packestones	Composto por oóides, oncóides ou pelóides. Podem apresentar intraclastos de estromatólitos e laminitos. Apresentam estrutura maciça ou estratificações cruzadas de baixo ângulo.	Tração subaquosa sob células de convecção oscilatórias e fluxos unidirecionais (Bento-Freire, 2012);
Wackestones	Compostos por oóides, oncóides, bioclastos e pelóides, que compõem camadas laminadas bem finas.	Decantação subaquosa (Bento-Freire, 2012);
Mudstones	Rocha fortemente laminada formando camadas tabulares.	Decantação subaquosa (Bento-Freire, 2012)

Quadro 2: Síntese das fácies siliciclásticas que ocorrem na Sequência Balbuena IV. Fonte: Bento-Freire (2012).

Fácies	Caracterização macroscópica	Processos deposicionais
Argilitos	Apresentam coloração verde-acinzentada, com aspecto maciço a laminado. É comum apresentar fratura conchoidal. Comum ocorrência fóssil de peixes e vegetais.	Decantação subaquosa (Bento-Freire, 2012)
Siltitos	Apresentam coloração verde-acinzentada, com aspecto maciço a laminado. Apresenta fratura conchoidal. Comum ocorrências fóssil de peixes e vegetais. Diferem-se dos argilitos por apresentarem granulometria levemente mais grossa.	Decantação subaquosa e correntes fracas (Bento-Freire, 2012)
Margas	Ocorre entre os siltitos e argilitos, ou os substituindo. Apresentam coloração verde-acinzentada formando camadas tabulares com laminações finas.	Decantação subaquosa (Bento-Freire, 2012)
Arenitos	Rochas essencialmente quartzo-feldspáticas. Compostos por sedimentos de fração areia média a matação. É comum a ocorrência de fragmentos líticos. Apresentam geometria sigmoidal, estratificação cruzada acanaladas e de baixo ângulo. Intensa bioturbação.	Fluxo de detritos e correntes fluviais alcançando as bordas do lago (Bento-Freire, 2012)
Tufo vulcânico	Apresentam textura afanítica com coloração branco-acinzentada. Formam camadas tabulares de até 30cm com granulometria fina.	Precipitação física de cinzas vulcânicas (Vulcanismo ativo)

Para esse trabalho utilizou-se a associação de fácies descrita em Bento-Freire (2012), agrupando-as em termos dos processos deposicionais que as geraram. Dessa forma os carbonatos foram divididos entre os de alta energia e os que apresentam significativa matriz em sua trama, sendo os primeiros agrupados como **grainstones** (*grainstones*, *rudstones* e *packstones*), e os últimos formando os **carbonatos com matriz** (*wackestones* e *mudstones*). **Estromatólitos** e **laminitos microbiais** mantiveram-se independentes, e todos os sedimentos depositados por decantação foram agrupados como **siliciclásticos finos**.

Os **grainstones** são compostos principalmente por oólitos, oncólitos (Figura 17) ou por pelóides. São ricos em intraclastos de argilitos e *mudstones*. Podem possuir estrutura maciça ou estratificações cruzadas tabular e de baixo ângulo. Apresentam geometria sigmoide, lenticular ou tabular com marcas de ondas nos topos (Figura 18). Por vezes apresentam relações de contato com os estromatólitos que indicam uma formação contemporânea, ou ainda podem ocorrer logo após a formação destes,

capeando-os. *Grainstones* são originados em porções dominadas por correntes trativas e oscilatórias subaquosas (Bento-Freire, 2012).

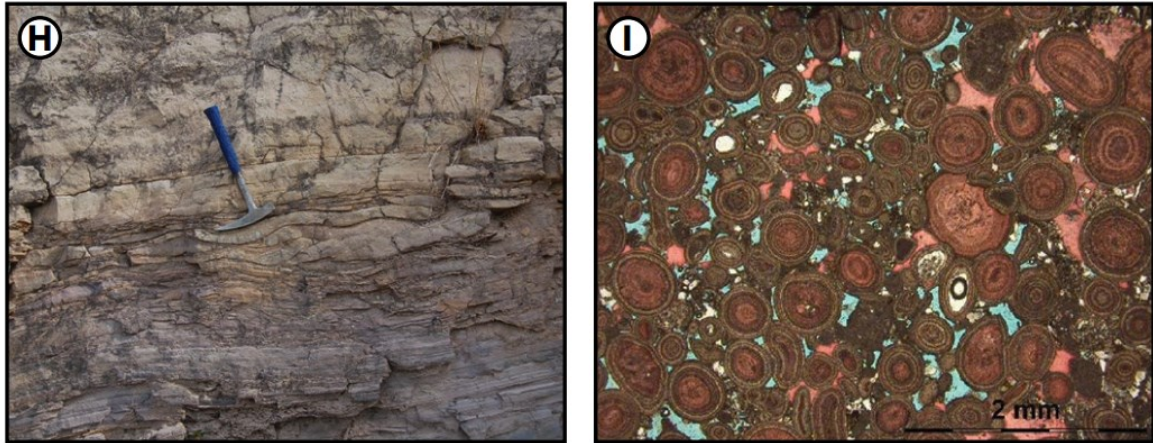


Figura 17: Detalhe microscópico dos *grainstones*, compostos essencialmente por oóides, oncóides e pelóides, com empacotamento moderado. Fonte: Deschamps *et al.* (2020).



Figura 18: Diferentes geometrias apresentadas pelos *grainstones*, podendo ser sigmóides (foto da esquerda) ou tabulares (foto da direita). Fonte: Bento-Freire (2012).

Os **Estromatólitos** ocorrem com geometria dômica ou achatada, em forma de colchetes. Bento-Freire (2012) interpreta que essa variação das geometrias ocorre em função da disponibilidade da lâmina d'água, onde um maior espaço de acomodação favorece o crescimento dômico (Figura 19), enquanto que em menores lâminas d'água o estromatólito se achata e cresce lateralmente para se ajustar ao espaço disponível (Figura 20). Estruturas internas são marcadas por feições dendriformes, arbustiformes e arborescentes (Figura 21), que crescem pelo processo de biomineralização induzida por *trapping and binding* (Dupraz *et al.* 2009; Suarez-Gonzalez *et al.* 2019). Essas rochas são desenvolvidas quando o ambiente deposicional reúne uma composição química específica durante os momentos de maior aridez. A condição mais alcalina

favorece o desenvolvimento das comunidades microbiais e formação dos estromatólitos. Normalmente ocorrem associados aos laminitos microbiais, *grainstones* e *rudstones*.

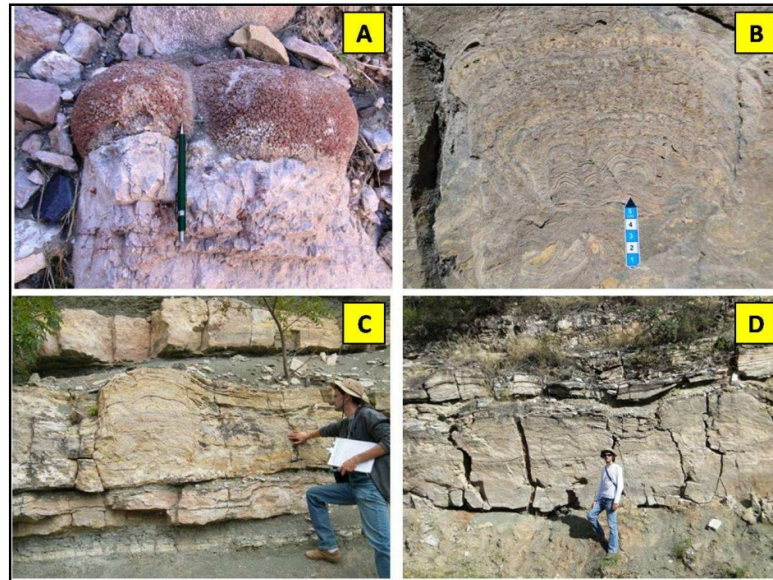


Figura 19: Estromatólitos com formato dômico. Fonte: Bento-Freire (2012).

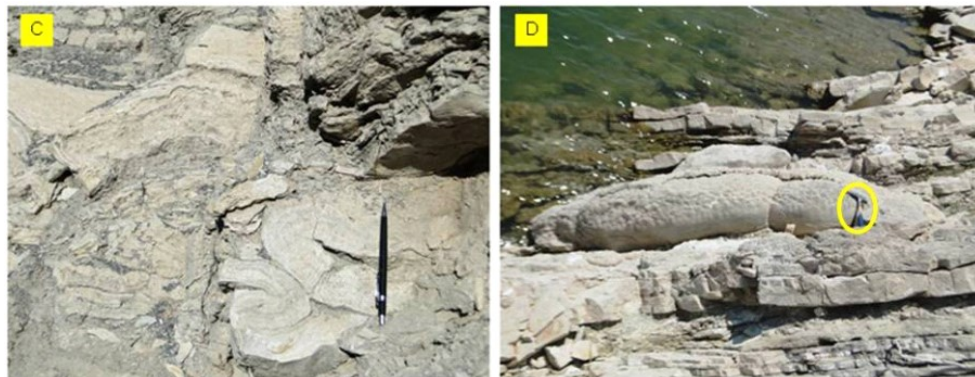


Figura 20: Estromatólitos do tipo colchetes são mais achatados e crescem lateralmente para manter-se dentro da lâmina d'água. Fonte: Bento-Freire (2012).

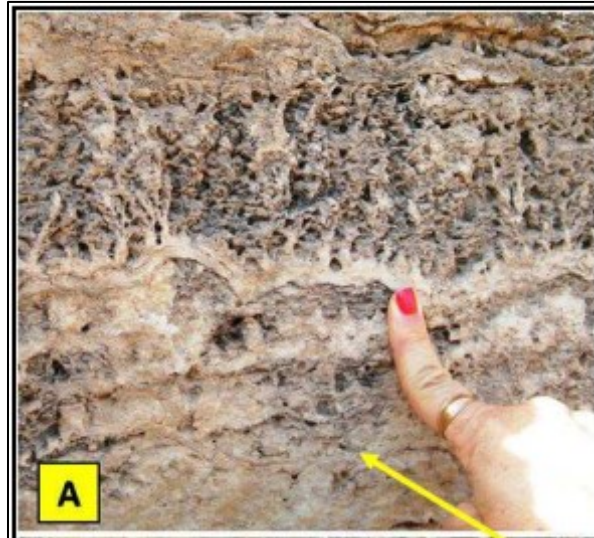


Figura 21: Detalhe para a estrutura interna dos estromatólitos mostrando crescimento arborescente. Fonte: Bento-Freire (2012).

**Laminitos microbiais** são predominantemente tabulares, com laminações internas podendo ser lisas ou crenuladas. Normalmente estão associadas aos estromatólitos e podem apresentar superfícies de exposição (Figura 22) que marcam o topo de um ciclo de raseamento (Bento-Freire, 2012).



Figura 22: Laminito microbial com destaque para as gretas de ressecamento que normalmente ocorrem associadas a essa fácies. Fonte: Deschamps *et al.* (2020).

**Carbonatos com matriz** são formados por fragmentos de oóides, oncóides e raros pelóides e fragmentos de estromatólitos, os quais ocorrem dispersos dentro da matriz carbonática lamosa (Figura 23). Frequentemente apresentam laminações

tabulares e se formam em zonas protegidas das ações das ondas de tempo bom (Bento-Freire, 2012).

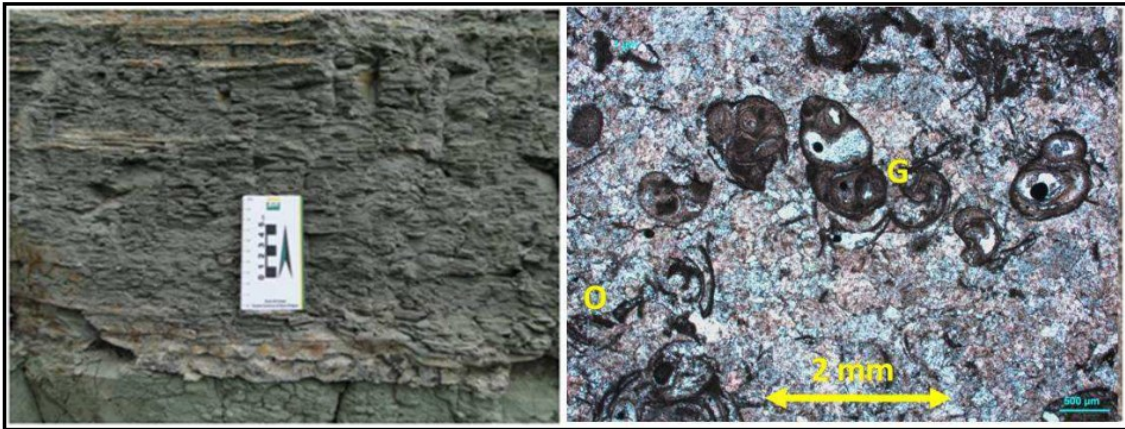


Figura 23: *Wackestone* bioclástico, composto essencialmente por fragmentos de gastrópodes imersos em matriz fina. Fonte: Bento-Freire (2012).

**Siliciclásticos finos** são formadas por argilitos, siltitos e margas, as quais ocorrem predominantemente com geometria tabular, podendo ter estrutura maciça ou com laminação interna (Figura 24). Essa associação resulta da sedimentação sob influência climas úmidos, quando a reativação das cabeceiras fornece sedimentos externos para a bacia. Esses sedimentos são depositados por processos de decantação e podem apresentar fragmentos fósseis, como espinhas de peixe e restos vegetais (Bento-Freire, 2012).

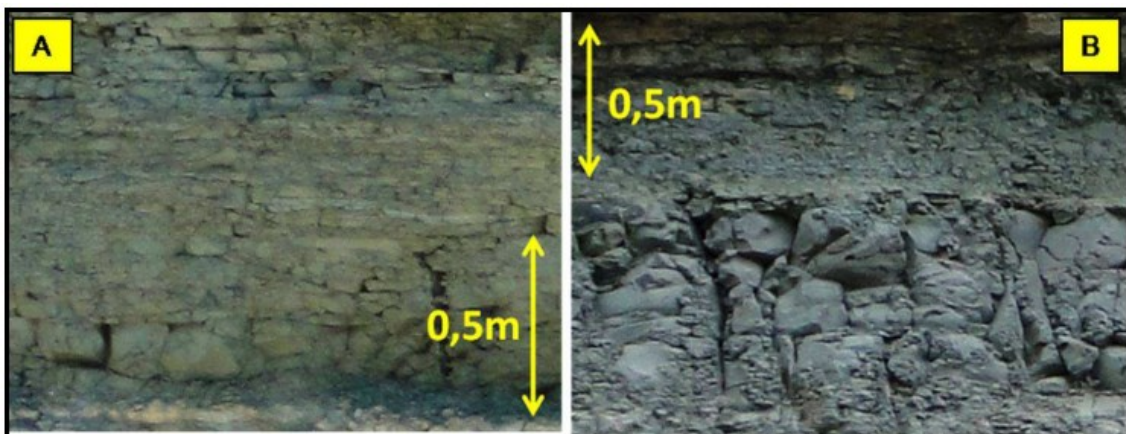


Figura 24: Siltito (A) e argilitos (B) compõem dominam a associação de fácies formada pelos siliciclásticos finos

A Figura 25 sintetiza o posicionamento de cada associação de fácies dentro do ambiente deposicional. Em épocas dominadas por climas áridos, nas porções mais rasas do perfil deposicional longitudinal, são desenvolvidas as condições químicas



## 2.5 Localização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Província de Salta, situada no extremo noroeste da Argentina, a cerca de 1466 Km da capital Buenos Aires. Os dados foram coletados por Bento-Freire (2012) na região conhecida como Dique Cabra Corral, localizado no distrito de Coronel Moldes.

Partindo do Aeroporto Internacional de Salta, o acesso à área de estudo é feito a partir da autopista RA-51 seguindo por cerca de 5 Km no sentido nordeste até alcançar o anel viário que dá acesso à autopista nacional RA-68. A partir dessa via, segue-se no sentido sul por cerca de 55 Km, passando pelos distritos de Cerrillos, Las Merced e El Carril até chegar em Coronel Moldes. Para acessar o Dique Cabra Corral, abandona-se a autopista RA-68 e entra na via municipal RA-47, a qual após cerca de 10 Km para o leste encontra-se o acesso para o local de estudo (Figura 26).

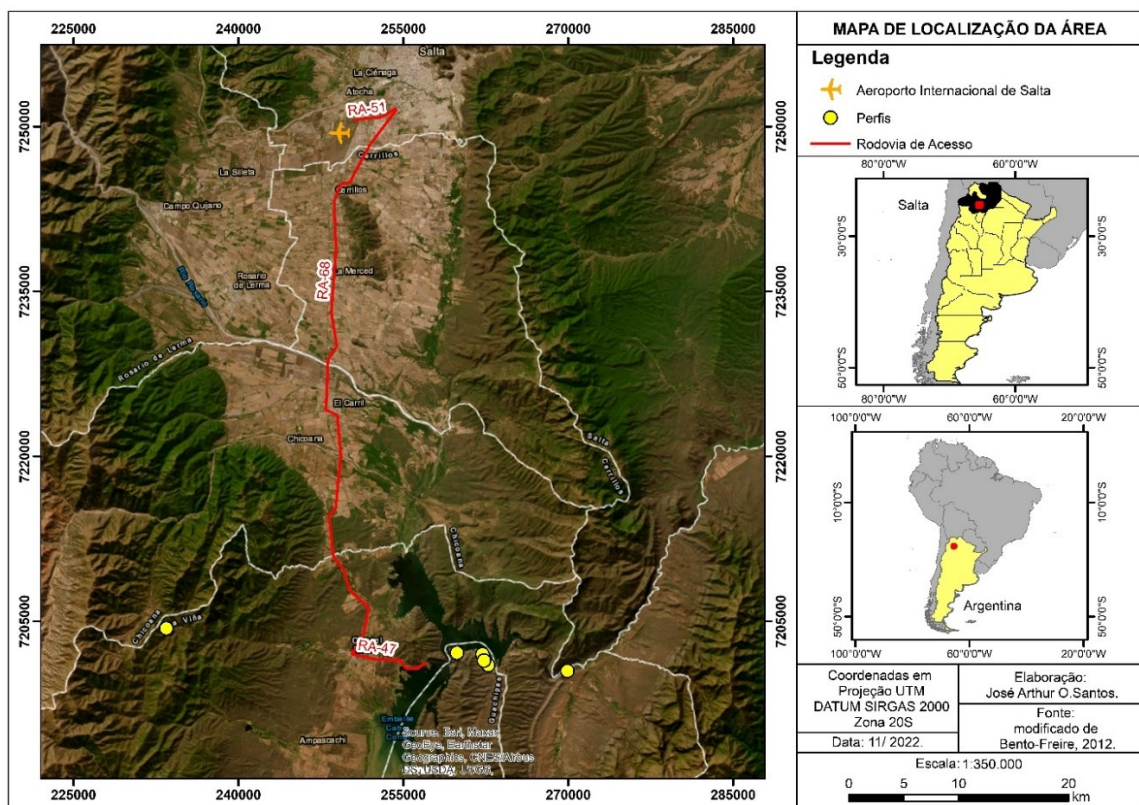


Figura 26: Mapa de localização da área de estudo. Fonte: o autor, modificado de Bento-Freire (2012).

### 3. ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS

A metodologia da estratigrafia de sequências foi formalizada na comunidade científica a partir da publicação do Memoir 26 da AAPG “Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration” (Payton, 1977), formalizando o termo **sequência** como uma “sucessão de estratos concordantes, geneticamente relacionados e limitados no topo e na base por discordâncias e suas conformidades correlatas” (Mitchum *et al.* 1977). Vail *et al.* (1977) apontaram que o principal mecanismo controlador para a formação das sequências seriam os ciclos eustáticos globais, que geravam sequências de diferentes hierarquias e com magnitudes definidas de acordo com o intervalo tempo em que cada sequência foi formada.

Desde então houve uma ampla evolução dos conceitos e aplicações da estratigrafia de sequência (Johnson and Murphy 1984, Posamentier *et al.* 1988, Van Wagoner *et al.* 1988, Galloway 1989, Embry and Johannessen 1992, Hunt and Tucker 1992, Catuneanu, 2006, Catuneanu *et al.* 2011), o que gerou uma grande confusão de terminologias em função dos diferentes *datasets*, escalas e bacias trabalhadas por cada autor. Diante de tal confusão, Catuneanu *et al.* (2009, 2010) apresentam uma padronização dos termos, de modo que a estratigrafia de sequências se afirmasse como uma metodologia objetiva, descritiva e independente de modelos, podendo ser aplicada em qualquer cenário tectônico, ambiente deposicional, em escala sísmica ou em afloramentos (Catuneanu, 2019a).

A abordagem da Estratigrafia de Sequências trabalha com a arquitetura estratal resultante dos *trends* observados em diferentes padrões de empilhamentos, como um produto resultante da acomodação *versus* sedimentação junto à linha de costa. Assim, a identificação de uma quebra de tendência em uma sucessão faciológica, como por exemplo, a mudança de um perfil com padrão *finning-upward* para um *coarsening-upward*, será marcada por uma superfície estratigráfica chave, registrando a transição de um padrão de empilhamento retrogradacional para um progradacional. O conceito mais atual define que qualquer unidade sedimentar resultante de um ciclo completo de mudança na acomodação ou suprimento sedimentar, limitada no topo e na base por uma superfície estratigráfica recorrente, é candidata a ser uma **sequência** em qualquer ordem de magnitude. Essa definição se embasa em critérios objetivos, independente de escalas, contextos tectônicos e interpretações dos processos atuantes (Catuneanu & Zecchin 2013, Catuneanu 2019a, 2019b).

O sucesso da aplicação da estratigrafia de sequências em diversas escalas, tem confirmado que uma metodologia independente de modelos, é um caminho satisfatório, como também confirma que o *framework* estratigráfico é construído de um modo organizado e hierarquizado, onde as unidades básicas das mais altas frequências se agrupam para compor as unidades básicas das frequências mais baixas (Catuneanu, 2019a; Magalhães et al. 2020).

Fragoso *et al.* (2021) reconhecem a prudência da metodologia puramente descritiva, mas ressaltam que a pura descrição também necessita de um *background* interpretativo. A identificação e descrição das unidades básicas da estratigrafia de sequência, que são os padrões de empilhamento, necessita de uma habilidade previamente adquirida pelo geólogo para juntar os vários fragmentos da sucessão sedimentar e apontá-la como um *trend* retrogradacional ou progradacional. Esse exemplo mostra que uma metodologia, mesmo bem definida e baseada em critérios objetivos, sempre trará consigo critérios subjetivos e, portanto, interpretativos. Dessa forma, Fragoso *et al.* (2021) ressaltam que descrição e observação são complementares, e que o melhor critério descritivo para qualquer sucessão geológica resulta da interpretação de como tal sucessão poderia ter se desenvolvido. Os mesmos autores ainda acrescentam que o conhecimento sobre os principais processos periódicos que controlam a sedimentação e, principalmente, sua preservação, ajuda a definir uma lógica preditiva e que traz melhorias para a metodologia da estratigrafia de sequências.

### 3.1 Estratigrafia de Sequências na Formação Yacoraite

Até pouco tempo atrás pouco se viu da metodologia sendo aplicada em sistemas carbonáticos lacustres, no entanto, após a descoberta dos reservatórios do pré-sal brasileiro, estudos de estratigrafia de sequência nesse tipo de ambiente começaram a se tornar mais comuns (Bento-Freire, 2012; Roemers, 2014; Pedrinha, 2014; Gomes *et al.* 2020; Artagão, 2018; Muniz & Bosence, 2015; Fragoso, 2021; Magalhães *et al.* 2020, 2021). As premissas para a definição das sequências permanecem as mesmas, no entanto, como os sistemas lacustres normalmente são isolados ou com raras conexões com os mares e oceanos, o principal controlador para o nível de base estaria relacionado a imposições locais, com o nível de base oscilando em resposta aos condicionantes climáticos ou tectônicos.

O padrão estratigráfico dominante da Fm. Yacoraite é marcado por seu empilhamento cíclico e recorrente das fácies siliciclásticas e carbonáticas alternando entre si, conforme já descrito por diversos autores que estudaram a formação (Bento-Freire, 2012; Pedrinha, 2014; Roemers, 2014; Rohais *et al.* 2019; Deschamps *et al.* 2020; Montano *et al.* 2022; Mutti *et al.* 2023). Esses autores concordam que o principal condicionante para a geração do padrão cíclico em alta frequência são as oscilações entre momentos úmidos e áridos, que por sua vez controlam as fases de expansão e retração do ambiente deposicional lacustre.

Trabalhos específicos nas sequências Balbuena II, III e IV têm tido como objetivo geral a análise da sua organização estratigráfica, pontuando como que os ciclos de alta frequência podem influenciar na compartimentalização de reservatórios. Independente do alvo de estudo, sempre há uma organização estratigráfica ordenada, com ciclos de alta frequência refletindo oscilações recorrentes no ambiente deposicional, que por sua vez se empilham para compor as hierarquias de maior ordem. O entendimento de tal agrupamento hierárquico contribui para um melhor zoneamento de reservatórios e, conseqüentemente, leva a uma melhor produção de hidrocarbonetos (Magalhães *et al.* 2021; Fragoso *et al.* 2023).

Bento-Freire (2012) criou uma curva da variação do nível de base para a sequência Balbuena IV, em função da oscilação climática entre períodos úmidos e áridos, apontando os locais em que se formariam as superfícies estratigráficas chave dentro da dinâmica oscilatória lacustre. Para os momentos dominados por clima úmido, foi introduzida a **superfície de máxima umidade (SMU)** e a **superfície de máxima cheia (SMC)**. A primeira representa o momento de maior precipitação pluviométrica na bacia, sendo reconhecida pela assinatura espectral dos picos de K. Já a **SMC**, corresponde ao ponto de máxima transgressão da linha de costa, sendo o equivalente à **superfície de inundação máxima (SIM)**, e marca o ponto de transição do regime úmido para o árido.

Para as fases áridas, o momento de **máxima evaporação** corresponde a maior aridez no sistema, gerando condições ótimas para o pico de precipitação dos organismos microbiais. Dessa forma, as altas taxas de crescimento aliada a alta evaporação consomem o espaço de acomodação do lago. O progressivo consumo do espaço de acomodação levará a exposição do substrato, representado pela **superfície de exposição inicial (SEI)**. Após esse ponto o nível continua a descer,

porém afetando o nível do freático, que quando alcança seu mínimo delimita a **superfície de máxima retração (SMR)** equivalente ao rebaixamento máximo do nível de base. Essas superfícies estratigráficas são importantes porque representam *turning-points* da sedimentação, refletindo as principais mudanças nos termos dos padrões de empilhamento sedimentar. Assim, a **SMC** e **SMR** delimitariam os *trends* retrogradacionais e progradacionais, respectivamente. Gomes *et al.* (2020) adicionaram as fácies específicas de acordo com cada momento do ciclo climático (Figura 27).

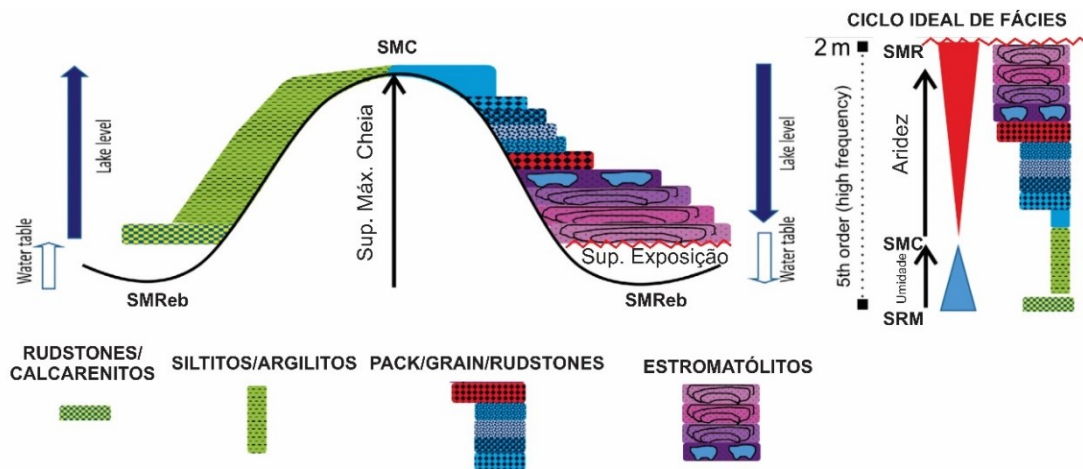


Figura 27: Oscilação do nível do lago em função dos momentos climáticos úmidos e áridos, bem como as fácies associadas a cada estágio, compondo um ciclo ideal de alta frequência. Modificado de Gomes *et al.* (2020).

Uma característica marcante da sequência Balbuena IV é a presença de ciclos formados pela transição abrupta de fácies formadas em ambientes deposicionais extremos (Figura 28), bem como a presença recorrente de superfícies de exposição. Deschamps *et al.* (2020) interpretam que essa transição abrupta se deu em decorrência de uma suavização fisiográfica da bacia e, dessa forma, pequenas flutuações no nível de base gerariam mudanças de grandes amplitudes na linha de costa, fazendo com que ambientes deposicionais extremos ficassem sobrepostos uns aos outros (Figura 28).



Figura 28: Exemplo da ciclicidade empilhando fácies formadas em ambientes profundos (pelitos cinza) sobreposta aos carbonatos de água mais rasa (camadas claras). Fonte: Montano 2022.

O conceito descrito em Bento-Freire (2012) acerca da ciclicidade e das superfícies estratigráficas presentes na sequência Balbuena IV, fomentou o trabalho de alguns autores subsequentes. Pedrinha (2014) e Roemers (2014) utilizaram-se desse conceito para estudar as Sequências Balbuena II e III, respectivamente (Figura 29 e Figura 30). Esses autores identificaram vários tipos de ciclos elementares de alta frequência, bem como suas superfícies estratigráficas chaves, chamando atenção para grande rastreabilidade ao longo da bacia. Esses ciclos podem ser compostos por diferentes associações de fácies, mas sempre ocorrem em função das oscilações climáticas.

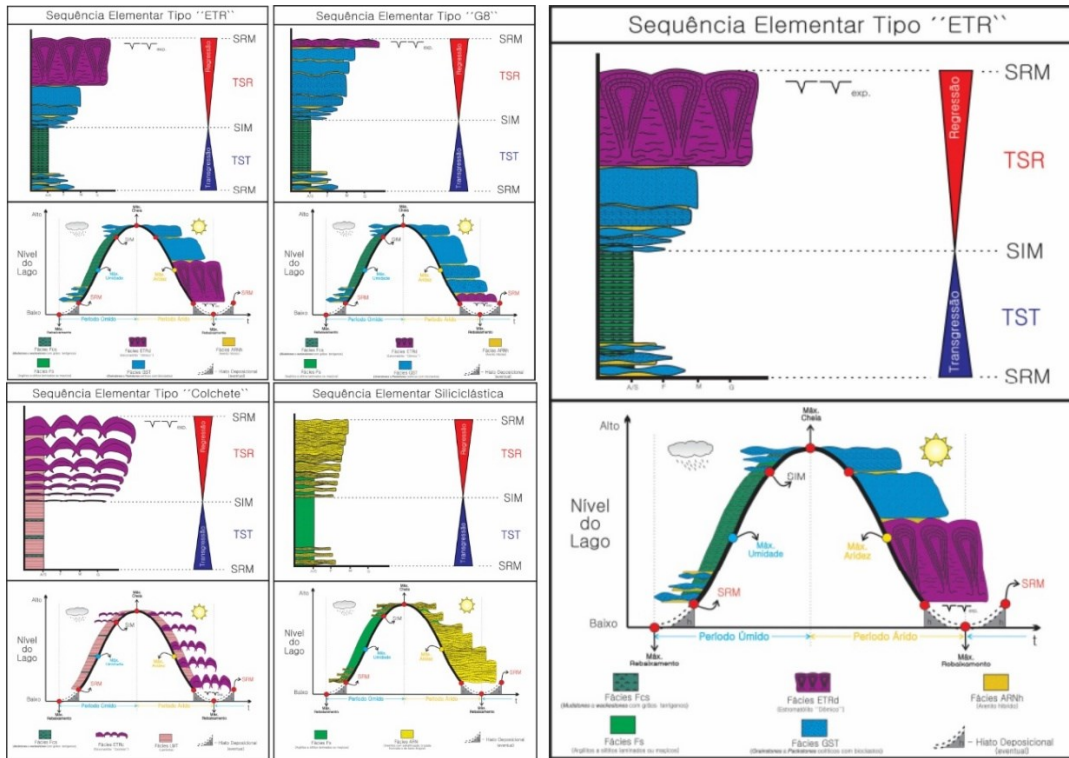


Figura 29: Ciclos elementares descritos para a sequência Balbuena II. Observe que os ciclos são diferenciados em função das fácies que os compõem, com todos ocorrendo em resposta às flutuações climáticas. Fonte: Pedrinha (2014).

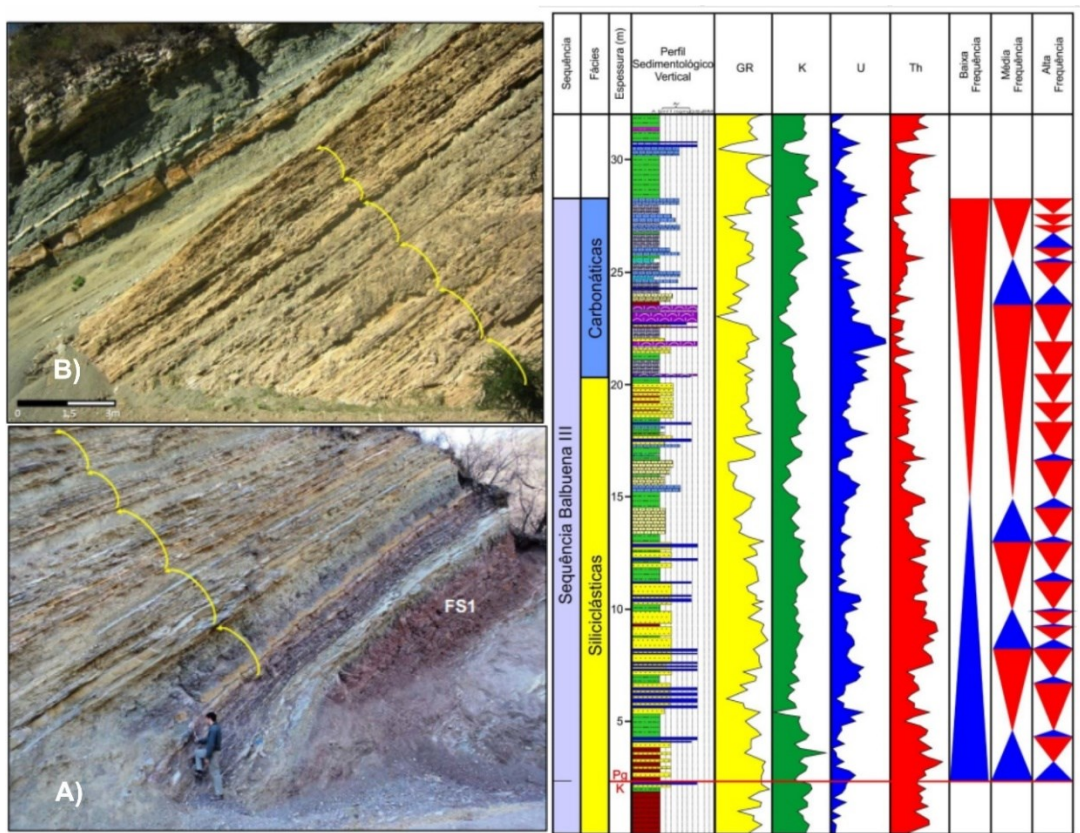


Figura 30: Padrão geral da sequência Balbuena III. Observar a ocorrência da ciclicidade tanto no pacote siliciclástico quanto no carbonático. A) Afloramento da seção siliciclástica. B) Afloramento da seção carbonática. Fonte: Roemers (2014).

Esses estudos ressaltam a construção do *framework* estratigráfico dentro de um padrão organizado, com os ciclos de alta frequência se agrupando para compor as médias frequências, que por sua vez se agrupam para formar as baixas frequências. A mapeabilidade aumenta à medida que os ciclos se agrupam para compor as hierarquias mais elevadas, representando grandes *trends* na sedimentação por toda a bacia (Magalhães *et al.* 2020; Fragoso *et al.* 2021, 2023). As frequências mais altas vão ter baixo potencial de correlação, porém têm forte impacto na heterogeneidade do reservatório, uma vez que suas geometrias se tornam mais complexas e não exibem mais a continuidade observada nas maiores hierarquias. Bunevich *et al.* (2017) mostram que a ciclicidade também está se refletindo na altíssima frequência (acima da 6ª ordem), ressaltando que as flutuações climáticas responsáveis pelos grandes *trends* de sedimentação, também podem ser observadas em microescala (Figura 31).

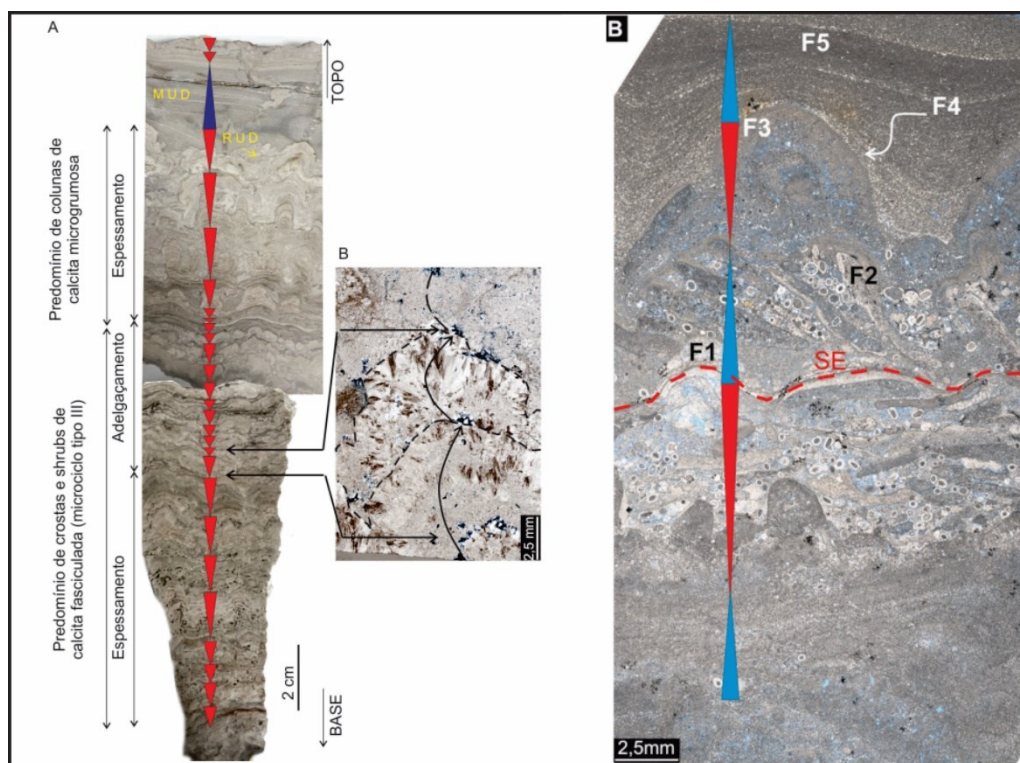


Figura 31: Delimitação de microciclos em escala de lâmina petrográfica, ressaltando que os condicionantes climáticos também influenciam na escala microscópica. Fonte: Bunevich *et al.* (2017).

Múltiplos processos alogênicos e autogênicos atuam em conjunto para gerar a ciclicidade no registro estratigráfico. As taxas desses processos podem variar com a idade estratigráfica e cenário geológico, tornando difícil de identificar e individualizar as contribuições de tais processos (Catuneanu, 2022). Com exceção dos forçantes orbitais, a periodicidade tende a ser bastante imprevisível. No entanto, a arquitetura

estratigráfica é controlada basicamente pelo balanço entre acomodação e sedimentação, os quais explicam a formação dos padrões de empilhamento estratal, independente do mecanismo de controle dominante (Catuneanu, 2022). A forte ciclicidade e recorrência encontrada na Formação Yacoraite podem ocorrer como produtos dos ciclos orbitais de Milankovitch (Berger, 1978), com ciclos de alta frequência resultantes dos ciclos precessão ou obliquidade (Bento-Freire, 2012; Pedrinha 2014) e os ciclos de média frequência relacionados aos ciclos de excentricidade (Deschamps *et al.* 2020).

#### 4. MÉTODOS ESPECTRAIS E *HIDDEN-MARKOV MODELS* APLICADOS À ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA

Os métodos espectrais têm sido amplamente utilizados na análise estratigráfica para estudar as variações de frequência e ciclicidade presentes nos registros sedimentares. Essas técnicas exploram os espectros de frequência em *proxies* geológicos, usualmente perfis de raios gama, isótopos, susceptibilidade magnética e variações de cores em dados de rocha (Sinnesael *et al.* 2019; Leandro *et al.* 2022; Martinez *et al.* 2023), para identificar padrões que podem ser relacionados a processos climáticos que influenciam nas oscilações do nível de base deposicional.

Dunn (1974) apresentou um dos primeiros trabalhos de análise espectral voltados para a estratigrafia, aplicando a transformada de Fourier e convertendo os dados no domínio do tempo para o domínio da frequência (Bachman *et al.* 2000). Dessa forma, foi possível identificar os componentes de frequência dominante no registro estratigráfico, revelando ciclos de sedimentação repetitivos. No entanto, a transformada de Fourier tem como suas principais limitações o fato de que ela só encontra frequências em *proxies* periódicos, o que nem sempre ocorre na geologia (Schwarzacher, 1993), como também se limita a posicionar as frequências encontradas em seu respectivo tempo (Figura 32).

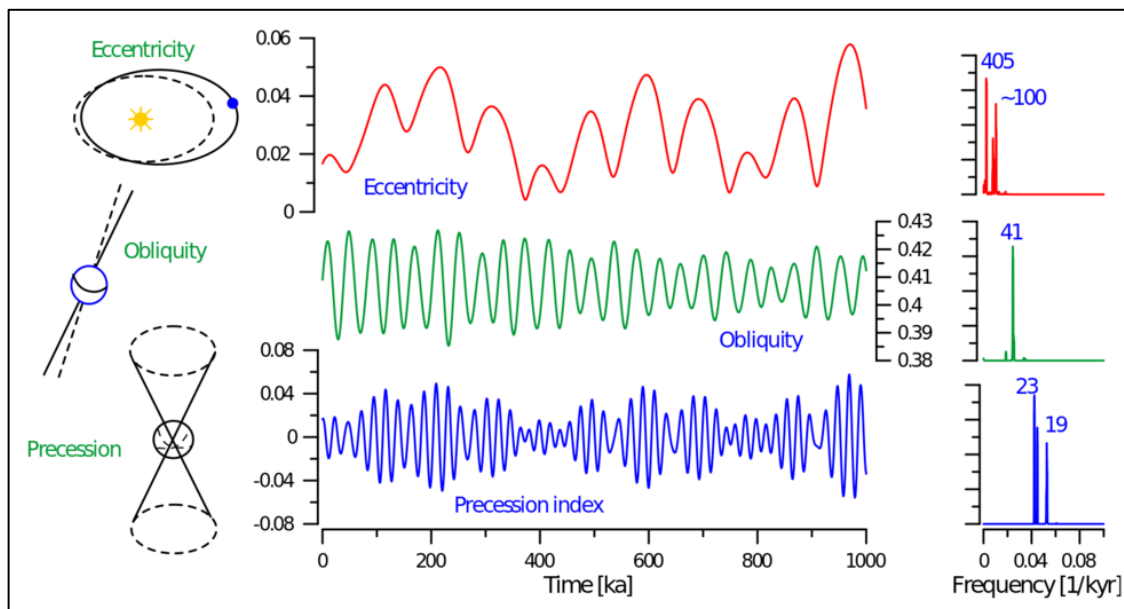


Figura 32: Exemplo *proxies* e seus respectivos conteúdos de frequência. Perceba que os periodogramas não apontam os locais onde cada pico domina dentro do sinal.

Nesse sentido, o conceito original da Transformada de Fourier foi adaptado para realizar análises de tempo-frequência, originando novos métodos que são mais

aplicáveis para a análise estratigráfica, como por exemplo a *Wavelet Transform* (Daubechies, 1992), *Fast Fourier Transform* (Hyland *et al.* 2009), *Multitaper Method* (Park *et al.* 1987), *Variational Mode Decomposition* (Melani *et al.* 2020), *Singular Spectrum Analysis* (Schoellhamer, 2001) entre outros. Esses métodos são utilizados para encontrar padrões cíclicos em dados estratigráficos, como também para obter medidas de taxas de deposição e para calibrações com ciclos orbitais. Para o desenvolvimento deste trabalho foi selecionada a transformada *Wavelet* e os métodos DTEL e INDTEL, focando na construção de um arcabouço estratigráfico em diferentes frequências.

#### 4.1 Continuous Wavelet Transform (CWT)

A CWT trata-se de uma integração matemática, onde os núcleos de investigação são realizados a partir de *wavelets*, que correspondem a pequenos pulsos de energia com dimensão espaço-temporal finita, e a amplitudes médias centradas no zero. Essas características permitem que as *wavelets* sejam localizadas tanto no domínio do tempo quando no da frequência, tendo liberdade para se ajustar a qualquer sinal, desde que sejam mantidos os requisitos acima citados (Daubechies, 1992). Dessa forma, formulações matemáticas que usam as *wavelets* como abordagem investigativa, se credenciam como uma excelente ferramenta de análises de sinais nos mais diversos campos de estudo.

Na geologia, a principal aplicação das *wavelets* é no campo da interpretação sísmica, especialmente no processo de amarração sísmica-poço, onde a partir da convolução de uma *wavelet* em perfis de poços, é possível homogeneizar dados que originalmente são de domínios diferentes (sísmica-tempo; poço-profundidade). No campo da estratigrafia, a *Continuous Wavelet Transform* tem ganhado destaque, uma vez que é própria para o estudo de processos multiescala não estacionários que ocorrem em domínios espaciais e temporais finitos, como registros de poços (Vega, 2003). Mais precisamente falando, a CWT consegue separar o sinal de interesse em várias partes e analisar cada uma delas separadamente, ou seja, usar as grandes escalas para mostrar características mais globais do sinal, e as pequenas escalas para mostrar os detalhes do mesmo (Protazio, 2002).

A equação abaixo apresenta a formulação matemática da CWT, onde  $x(t)$  é a série de dados a ser analisada,  $\psi$  ( $a, b$ ) descreve a função *wavelet* escolhida, e os

parâmetros **a** e **b** correspondem ao fator de deformação e ao parâmetro de translação que vai varrer o sinal a ser analisado, respectivamente.

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}(t) dt.$$

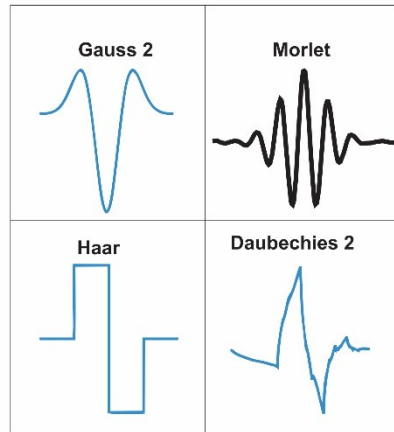
Um dos passos mais importantes para a análise a partir da CWT, é a certificação de que a *wavelet* escolhida tenha uma geometria compatível com o sinal a ser analisado (Chandrasekhar and Rao, 2012). Para o estudo aqui realizado, foi utilizada a *wavelet* Morlet (Morlet *et al.* 1982) porque seu formato sinusoidal é o mais situável para a identificação de ciclos sedimentares (Prokoph and Agterberg, 2000).

Dessa forma, resolvendo a equação de acordo com os parâmetros selecionados, são obtidos *outputs* que representam os diferentes componentes de frequência do sinal original. A Figura 33 mostra um *workflow* ilustrando o processo de análise do sinal realizado a partir da CTW.

## WORFLOW DA ANÁLISE DE SINAIS A PARTIR DA APLICAÇÃO DA CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM

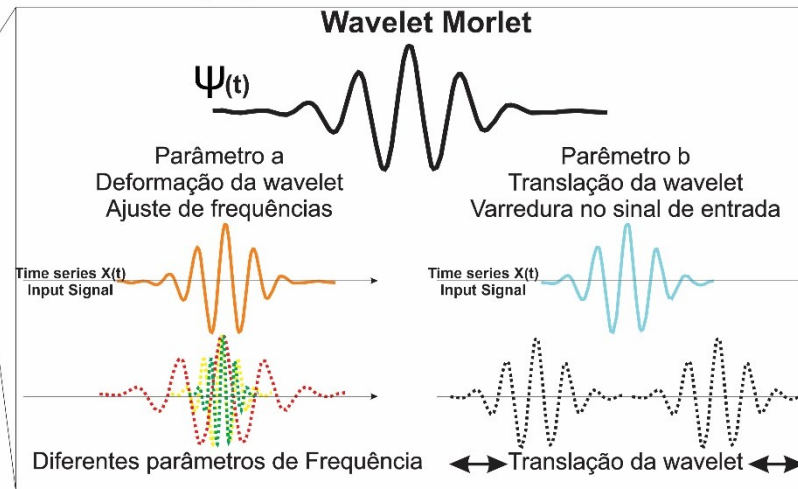
$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{a,b}(t)dt ,$$

### 1) Escolha da Wavelet - $\Psi(t)$



Exemplo de wavelets com diferentes morfologias

### 2) Ajustes dos parâmetros a e b



### 3) Aplicação no dado geológico

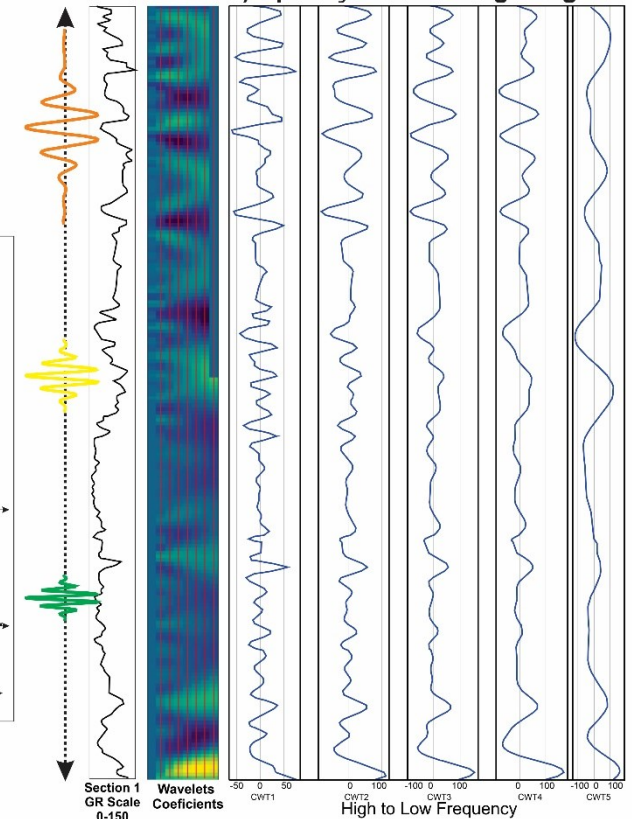


Figura 33: Processo de análise de sinal a partir do método da *Continuous Wavelets Transform*. 1) Seleção da *wavelet* que melhor se ajusta ao seu sinal de entrada. 2) Definição dos parâmetros a e b (deformação e janela de translação) para a varredura do sinal. 3) Aplicação no sinal geológico e obtenção dos diferentes componentes de frequências.

#### 4.2 Detrend Error Log (DTEL) e Integrating Detrend Error Log (INDTEL)

Esses métodos são propostos por Behdad (2019), e se baseiam em equações polinomiais que transformam o sinal original de modo a buscar tendências escondidas. Inicialmente é feito um ajuste polinomial no dado original (função *Error*), que é então normalizado pela função *Error* de modo a excluir grandes tendências que podem existir originalmente no dado de entrada, obtendo a curva DTEL. Após esse passo inicial, todos os pontos da curva DTEL são integradas e geram a curva INDTEL (Figura 34).

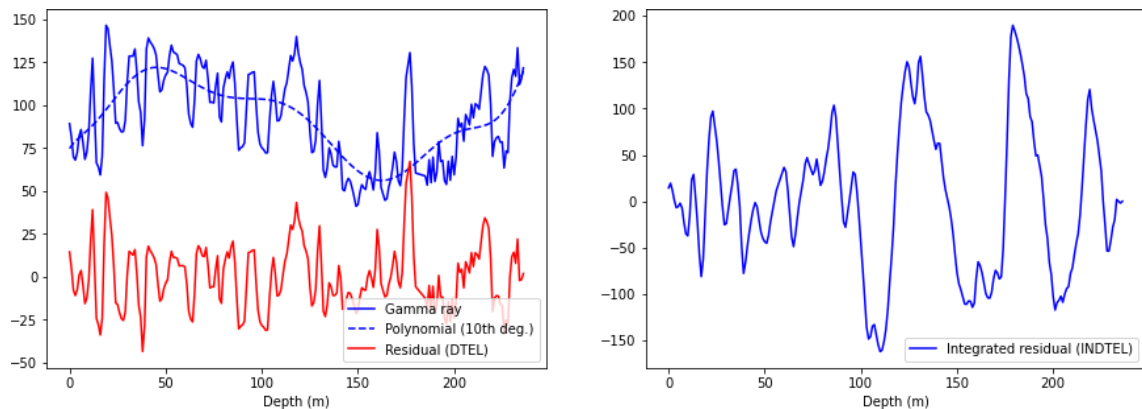


Figura 34: Procedimento para geração dos perfis DTEL e INDTEL. Note que o INDTEL apresenta um resultado com uma ciclicidade bem pronunciada. Adaptado de Behdad (2019).

De acordo com Behdad (2019), esses métodos apresentam melhorias em relação outros métodos semelhantes, nomeadamente o PEFA (Prediction Error Filter Analysis) e INPEFA (Integrating Prediction Error Filter Analysis) (Nio et al. 2005; De Jong et al. 2006). Tais abordagens associam as tendências encontradas com grandes *trends* deposicionais, que por sua vez, estariam relacionados aos *trends* regressivos ou transgressivos, aumentando a resolução dos ciclos e potencializando sua aplicação para o processo de correlação. Tais resultados se mostram ótimos para o desenvolvimento de procedimentos baseados em automatização de correlação.

### 4.3 Hidden-Markov Models (HMM)

Entender que ordem e ciclicidade estão presentes nos estratos sedimentares é de fundamental importância, porque tais estratos registram a história dos processos geológicos que governaram na superfície do planeta Terra, incluindo grandes mudanças climáticas (Burguess, 2016a). Na análise estratigráfica há uma longa história de tentativas de identificar estratos cíclicos com base em análise das sucessões de fácies ao longo das camadas (Miall, 2010). Dessa forma, o entendimento do empilhamento sedimentar cíclico também se torna importante como a base para a construção de modelos preditivos das heterogeneidades estratigráficas, extremamente úteis para a avaliação de reservas de hidrocarbonetos (Burguess, 2016a).

Na busca por ferramentas e métodos que auxiliem na análise estratigráfica, os métodos quantitativos têm desempenhado um papel importante. Eles permitem uma abordagem mais precisa e objetiva, fornecendo uma base sólida para a interpretação dos dados estratigráficos, destacando-se *Markov-Chain* e *Hidden-Markov Models* (Burguess, 2016 a, b; Dyer et al., 2018; Geyman et al. 2021).

No desenvolvimento deste trabalho foi aplicado o método *Hidden-Markov Model*, o qual busca identificar estados que não podem ser diretamente observados, mas que governam a ocorrência dos estados observáveis. Em termos estratigráficos, as transições de fácies são as variáveis observáveis, ocorrendo em função de processos ocultos. No caso aqui estudado, os processos não observáveis seriam os ciclos transgressivos ou regressivos, onde cada um deles possuem uma distribuição específica para as variáveis observáveis (Dyer et al. 2018; Geyman et al. 2021). *Stratigraphical forward models* mostram que as sequências de fácies normalmente caracterizam os processos que as formam (Paula-Faria et al. 2017; Ferreira et al. 2021; Geyman et al. 2021) e nesse sentido, ciclos transgressivos ou regressivos vão ter uma sucessão mais favorável a depender do processo que foi dominante na formação da sequência de fácies.

Um determinado Hidden-Markov Model  $M$  aplicado ao *dataset* de fácies  $F$  irá consistir de uma matrix de probabilidades de transições  $(p_{i,j})_{i,j \in \{R,T\}}$ , entre os ciclos regressivos e transgressivos, e dois vetores  $(p_j^R)_{j \in F}$  e  $(p_j^T)_{j \in F}$ , com as probabilidades de cada fácies em  $F$  sendo encontradas nos ciclos regressivos e transgressivos, respectivamente. A Figura 35 sintetiza a aplicação do modelo de Markov oculto.

Maiores detalhes da formulação matemática do método podem ser encontrados no artigo submetido, disponível na seção de resultados.

$$\log - \text{likelihood}(\text{Modelo}) := \log \mathbb{P}((f_k)_{k=0,\dots,n} | \text{Modelo})$$

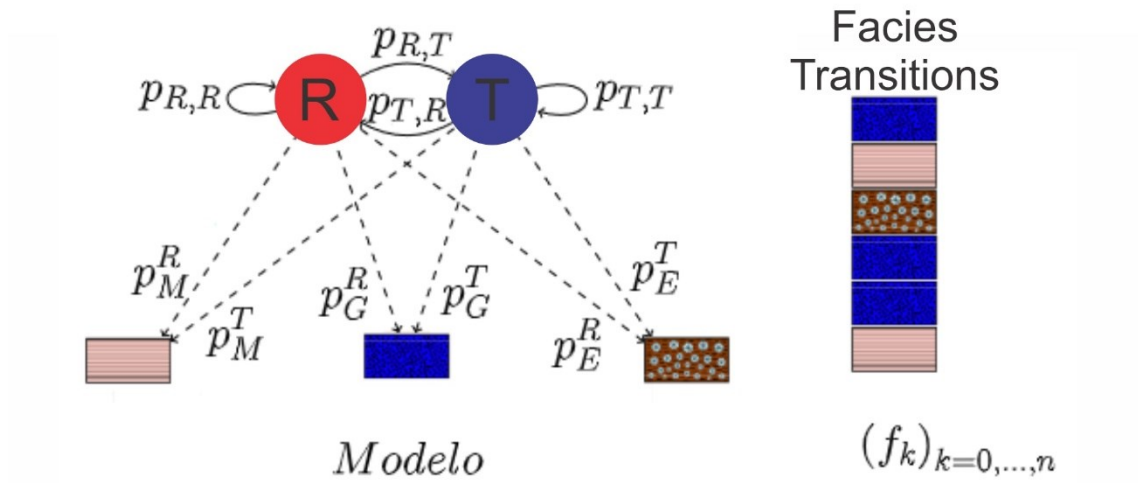


Figura 35: Síntese da detecção de ciclos T-R em função da transição de fácies.


## 5. RESULTADOS

Neste capítulo, é apresentado o manuscrito submetido inicialmente no periódico *Geoscience Frontiers* (ISSN: 1674-9871), e que posteriormente fora redirecionado para o periódico *Marine and Petroleum Geology* (ISSN: 1873-4073), tendo como título “Constructing high-resolution stratigraphic frameworks by the application of signal analysis techniques: A case study in the Balbuena IV Sequence from Yacoraite Formation, Salta Basin, Argentina”.

Neste artigo é apresentado a aplicação dos métodos mencionados nesta dissertação, e como quais os critérios utilizados para construção de modelos estratigráficos em diferentes frequências.

<b>Geoscience Frontiers</b> <b>Constructing high-resolution stratigraphic frameworks by the application of signal analysis techniques: Example of Balbuena IV Sequence, Yacoraite Formation, Salta Basin.</b> <b>--Manuscript Draft--</b>	
<b>Manuscript Number:</b>	GSF-D-23-00451
<b>Article Type:</b>	Research Paper
<b>Keywords:</b>	High-Resolution Stratigraphy, Continuous Wavelet Transform, DTEL, INDTEL, Hidden-Markov Models, Sedimentary Cycles
<b>Corresponding Author:</b>	José Arthur Oliveira Santos, Geologist Bachelor Federal University of Minas Gerais Belo Horizonte, Minas Gerais BRAZIL

Figura 36: Comprovante de submissão de manuscrito para a revista Geoscience Frontiers.



Transfer your manuscript

---

**Transfer Succeeded**

Your manuscript:

Constructing high-resolution stratigraphic frameworks by the application of signal analysis techniques: Example of Balbuena IV Sequence, Yacoraite Formation, Salta Basin.

Manuscript number: GSF-D-23-00451

Previously submitted to Geoscience Frontiers

Dear Mr. Oliveira Santos,

Your files have now been sent to Marine and Petroleum Geology, where we have started a new submission for you.

If you already have an account with Marine and Petroleum Geology, please sign in to find your new submission. If you do not already have an account, you will receive an email with instructions for signing in.

Figura 37: Transferência de submissão para a revista Marine and Petroleum Geology.

**Marine and Petroleum Geology**

**Constructing high-resolution stratigraphic frameworks by the application of signal analysis techniques: Example of Balbuena IV Sequence, Yacoraite Formation, Salta Basin.**

--Manuscript Draft--

<b>Manuscript Number:</b>	JMPG-D-23-00799
<b>Article Type:</b>	Full Length Article
<b>Keywords:</b>	High-Resolution Stratigraphy, Continuous Wavelet Transform, DTEL, INDTEL, Hidden-Markov Models, Sedimentary Cycles
<b>Corresponding Author:</b>	José Arthur Oliveira Santos, Geologist Bachelor Federal University of Minas Gerais aracaju se, SE BRAZIL

Figura 38: Submissão para a revista Marine and Petroleum Geology.

## Constructing high-resolution stratigraphic frameworks by the application of signal analysis techniques: A case study in the Balbuena IV Sequence from Yacoraite Formation, Salta Basin, Argentina.

José Arthur Oliveira Santos<sup>a\*</sup>; Alexandre Uhlein<sup>a,b</sup>; Márcio Dantas<sup>c</sup>; Gabriel de Moraes Coutinho<sup>d</sup>; Thomás Jung Spier<sup>d</sup>; Kaio Vieira<sup>d</sup>; Alan Prado<sup>d</sup>; Douglas Macharet<sup>d</sup>; Gabriel Jubé Uhlein<sup>a,b</sup>; Tiago Novo<sup>a,b</sup>; Humberto Reis<sup>d</sup>; Felipe Farias<sup>e</sup>; Ednilson Bento Freire<sup>e</sup>; Daniel Galvão Carnier Fragoso<sup>e,f</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Geologia, CPMTC-IGC, Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brazil

<sup>b</sup> Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil

<sup>c</sup> Universidade de Brasília, Brasília, Brazil

<sup>d</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Ciência da Computação - DCC, Campus Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brazil;

<sup>e</sup> Petrobras, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

<sup>f</sup> Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil

\* Corresponding author; Email address: [arthur.geol@hotmail.com](mailto:arthur.geol@hotmail.com)

### Abstract

One of the most essential and valuable applications of high-resolution sequence stratigraphy is reservoir zonation and characterization. Establishing a hierarchical chronostratigraphic framework comprising sequences at multiple scales is crucial to identify main reservoir heterogeneities that compartmentalize the fluid flow in the subsurface. In this context, this paper proposes a workflow that integrates different signal analysis techniques to identify sequences of multiple hierarchies from a series of stratigraphic data. The Continuous Wavelet Transform (CWT), Detrend Error Log (DTEL), and Integrated Detrend Error Log (INDTEL) techniques are utilized to process gamma-ray data obtained from outcrops of the Yacoraite Formation, which are conventionally employed as analogs for reservoir characterization. Our results suggest that CWT fits better with higher frequency cycles, while INDTEL shows a good fit with medium frequency cycles. In addition to these techniques, Hidden Markov Models were also applied, predicting T-R cycles as hidden states from the facies transition matrix and possible occurrence of missed beats. All these methods were scripted in the Python programming language, enabling the generation of fast and interactive outputs. This approach brings parameters that can guide the construction of stratigraphic models by automated processes.

**keywords:** High-Resolution Stratigraphy, Continuous Wavelet Transform, DTEL, INDTEL, Hidden-Markov Models, Sedimentary Cycles.

## 1. Introduction

Performing high-resolution sequence stratigraphy analysis is a crucial step in reservoir characterization workflow. Reservoir quality is strongly associated with transgressive-regressive cycles and trends, and its significant time-stratigraphic bounding surfaces generally coincide with critical petrophysical boundaries that compartmentalize subsurface fluid flow. (e.g., Zechin & Catuneanu, 2013; Melo et al. 2021; Magalhães et al. 2020, 2021; Fragoso et al. 2023). However, obtaining high-resolution information from subsurface can be challenging due to the high costs of obtaining well cores. Often, stratigraphic analysis is made by punctual side samples and thin-sections, supplemented by indirect data from well logs. In this sense, one of the most common ways to perform stratigraphical analysis is through gamma-ray logs due to its high interpretative potential in terms of identification of clean and argillaceous intervals, that in turn, are directly associated to transgressive-regressive trends (Adams & Weaver, 1958; Aigner *et al.* 1995; Bristol & Williamson, 1998; Ehrenberg & Svana, 2001).

In recent years, there has been an increasing trend of using signal analysis from geological proxies to construct sequence stratigraphy frameworks. Techniques including Fourier Analysis (Herbert and Fischer, 1986; Schwarzacher, 1993), Singular Spectrum Analysis (Vautard & Ghil, 1989; Ghil *et al.* 2002; Hinnov *et al.* 2002), Hilbert Transform (Huang *et al.* 2009) and Integrated Prediction Error Analysis – INPEFA (Nio et al. 2005; De Jong et al. 2009; Yuan et al. 2018; Wang et al. 2022; Abdolahi et al. 2023; Wei Li et al. 2023) have been applied to construct stratigraphic models through signal decomposition across various frequency ranges.

We applied the Continuous Wavelet Transform (Carmona *et al.* 1998; Daubechies, 1992), Detrended Error Log (DTEL), and Integrated Detrended Error Log (INDTEL) (Behdad, 2019) to process gamma-ray curves from the Balbuena IV sequence (Bento-Freire, 2012) of the Yacoraite Formation, in the Salta Basin, Argentina. Outcrops attributed to the Yacoraite Formation are traditionally used as analogs for reservoir characterization (e.g., Magalhães et al. 2020; Mutti et al. 2023). The Balbuena IV sequence offers an excellent section to test signal analysis methods due to the extensive knowledge about its stratigraphic characterization, particularly in the southernmost Metán-Alemán sub-basin. It is characterized by a pronounced

cyclicality that compounds transgressive-regressive cycles in multiple frequencies, resulting from the recurrent stacking of the carbonate and fine siliciclastics facies in response to oscillations between the arid and humid climate, respectively (e.g., Bento-Freire, 2012; Bunevich *et al.* 2017; Rohais *et al.* 2019; Deschamps *et al.* 2020; Gomes *et al.* 2020). Integrating to the signal outputs, Hidden-Markov Models (Jeong *et al.* 2014; Dyer *et al.* 2018; Tian *et al.* 2021; Geyman *et al.* 2021) based on facies transitions, were used to define high-resolution T-R cycles and in recognition of missed-beats (Steinhauff & Walker, 1995).

The mathematical formulation of the methods mentioned above was scripted in Python. An interactive interface for data visualization and management was created for use in the Jupyter Notebook web-based environment. This approach has the advantage of producing fast outputs at low computational cost and enables testing of different adjustment parameters.

## **2. Geological Settings**

The Salta Basin is located in the southernmost Andean Basin sector, which spans Peru, Bolivia, and northern Argentina (Gianni *et al.* 2015). This basin is interpreted as an intracontinental rift resulting from the Gondwana break-up, spanning from Cretaceous to Paleogene (e.g., Gianni *et al.* 2015; Marquillas *et al.* 2011). It is subdivided by four main depocenters, separated by the Salta-Jujuy volcanic high. The present study utilized data sourced from the outcrops of the southern sub-basin, known as Metán-Alemánia (Figure 1).

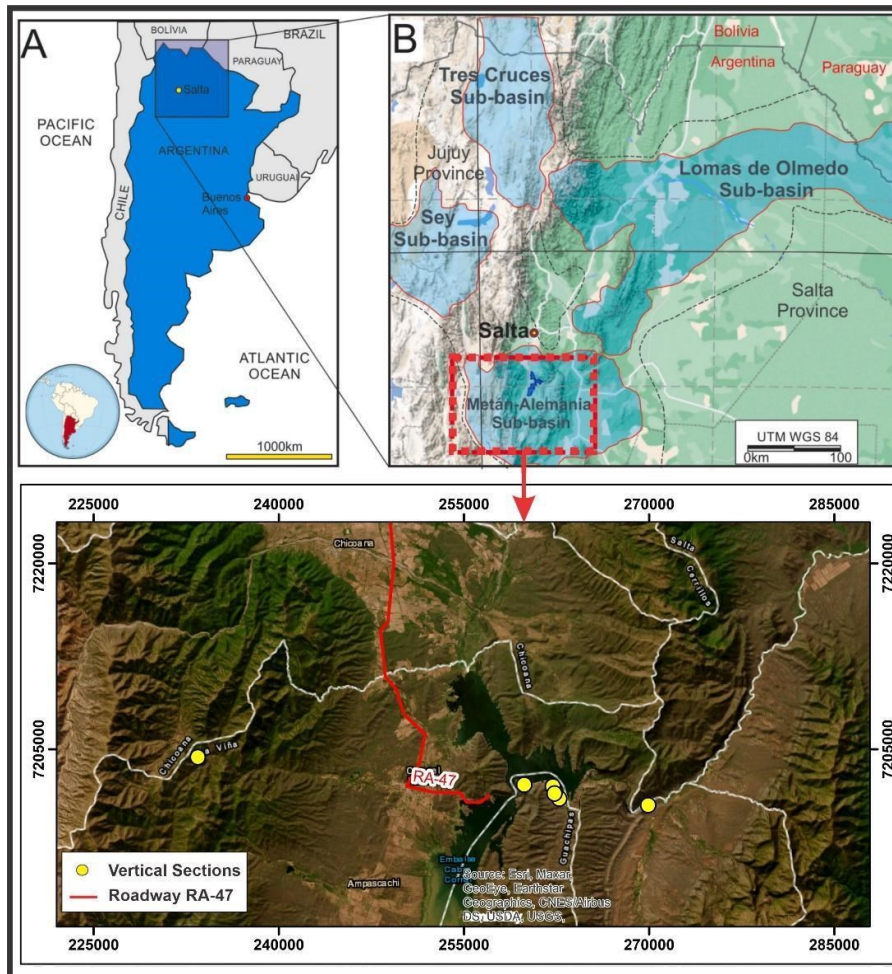


Figure 1: Location of the Salta Basin, north of Argentina. B) Salta basin paleomorphology at the time of the Yacoraite Formation deposition. C) Location of the outcrops sections used in this study. Adapted from Ceolin et al. (2022).

During the Cretaceous to Paleogene, tectonic conditions along the Salta Basin led to the extension and thinning of the basement, resulting in the deposition of the Salta Group, which encompasses the rift and post-rift stages (Salfity & Marquillas, 1994; Gomez Omil and Boll, 1999; Hernández *et al.* 1999; Marquillas et al. 2005; Hernández *et al.* 2019) (Figure 2). The Pirgua Subgroup characterizes the basal stage, it is marked by the high generation of the accommodation space along the rift and its following filling by alluvial fans and aeolian-fluvial sediments (e.g., Ramos, 1999). During the post-rift phase a vast marine and lacustrine carbonate sedimentation developed under quieter tectonic conditions, forming the rocks that make up the Yacoraite Formation (e.g., Hernández *et al.* 1999).

Time (Ma)	Period	Age	Lithostratigraphy			Depositional Environment	Tectonic Stages
			Group	Sub-Group	Formation		
66.0	P	Danian	SALTA	Balbuena	Yacoraite	Lacustrine	Pos-Rift Sag
72.1	Cretaceous	Maastrichtian			Lecho	Fluval/Aeolian	
83.6		Campanian		Pirgua	Los Blancos Las Curtiembres	Lacustrine	Rift
					La Yesera		

Figure 2: Stratigraphic chart for the Rift Phase of Salta Basin, highlighting the SAG Yacoraite Formation Interval. Adapted from Magalhães *et al.* (2020).

Yacoraite Fm. has been the subject of research for developing the High-Resolution Sequence Stratigraphy methodology applied to reservoir zonation and characterization (e.g., Magalhães *et al.* 2020; Mutti *et al.* 2023). High-resolution sequence stratigraphy aims to characterize cyclic units in a multiscale chronostratigraphic framework, where at each observation level, such cycles are building blocks represented by sequences from different hierarchical levels (e.g., Catuneanu, 2019; Fragoso *et al.* 2021). In the Yacoraite formation, these cycles are recognized as the result of climatic fluctuations between humid and arid conditions. Fine siliciclastic facies are related to the humid phase, and carbonates such as grainstones, stromatolites and microbial laminites, with dryer conditions. These fluctuations mark trends of transgressive and regressive stacking patterns as result of rising and falling of the base level, respectively (e.g., Bento-Freire, 2012; Pedrinha *et al.* 2015; Roemers-Oliveira *et al.* 2015; Bunevich *et al.* 2017; Gomes *et al.* 2020) (Figure 3).



Figure 3: Cyclical pattern observed at Gauchito Gil section. Note that the cycle's thickness is variable along the section. The concepts presented are adaptation from Bento-Freire (2012) and Gomes et al. (2020) for climatic fluctuation explaining the facies stacking and T-R trends. Image modified from Google Earth Street View 2023

Eventually, volcanic ashes from the Andean Ridge Mountain reached the depositional environment, forming excellent markers for correlation and absolute dating. U/Pb data in zircon crystals from tuffs along the Yacoraite Formation are important ages to calibration (Marquillas et al. 2011; Rohais *et al.* 2019; Montano *et al.* 2022). Besides U/Pb dating on zircon crystals, Montano *et al.* (2022) also presents a depositional age model estimated from U/Pb on the carbonates from Yacoraite Fm. They obtained a time interval of 5.7 (zircon age) and 6.0 Ma (carbonate age) for the deposition of the Yacoraite Formation. They estimated that the Balbuena IV sequence was deposited between  $64.5\text{Ma} \pm 0.9$  and  $62.3 \pm 0.5$  (zircon age), or between  $64 \pm 1.6\text{Ma}$  and  $61.9 \pm$  (carbonate age).

### 3. Materials and Methods

#### 3.1. Geological Dataset

The data provided by Bento-Freire (2012) describes six outcrop sections around the Cabra Coral Dyke region (Fig. 1), which contains facies classification and gamma-ray measurements. Gamma-ray was acquired by a portable gamma-spectrometer, model RS-Super-Spec®, from Radiation Solutions, Inc. The data were collected by a regular stepping of 20 cm between each sample, recording the gamma-ray and its content of K (%), U (ppm), and Th (ppm). The details of the sedimentary facies and the main related depositional processes are described in Bento-Freire (2012) and Gomes

et al. (2020). In summary, facies were clustered in four Facies Associations (FA) formed in response to arid conditions, and one FA formed under a humid regime (Figure 4). Microbial laminites, stromatolites, grainstones (grainstones and rudstones), and carbonates with matrix (wackestones, packstone, and mudstones) represent the distribution along the proximal-distal depositional environment controlled by arid conditions. Fine-siliciclastics facies from the humid stage overlap the facies belt previously deposited (Bento-Freire, 2012; Roemers *et al.* 2015; Gomes *et al.* 2020), completing an entire regressive-transgressive cycle. Field descriptions of facies associations were adapted to .las format and imported as pseudo wells geographically oriented in SKUA-GOCAD software (Figure 5).

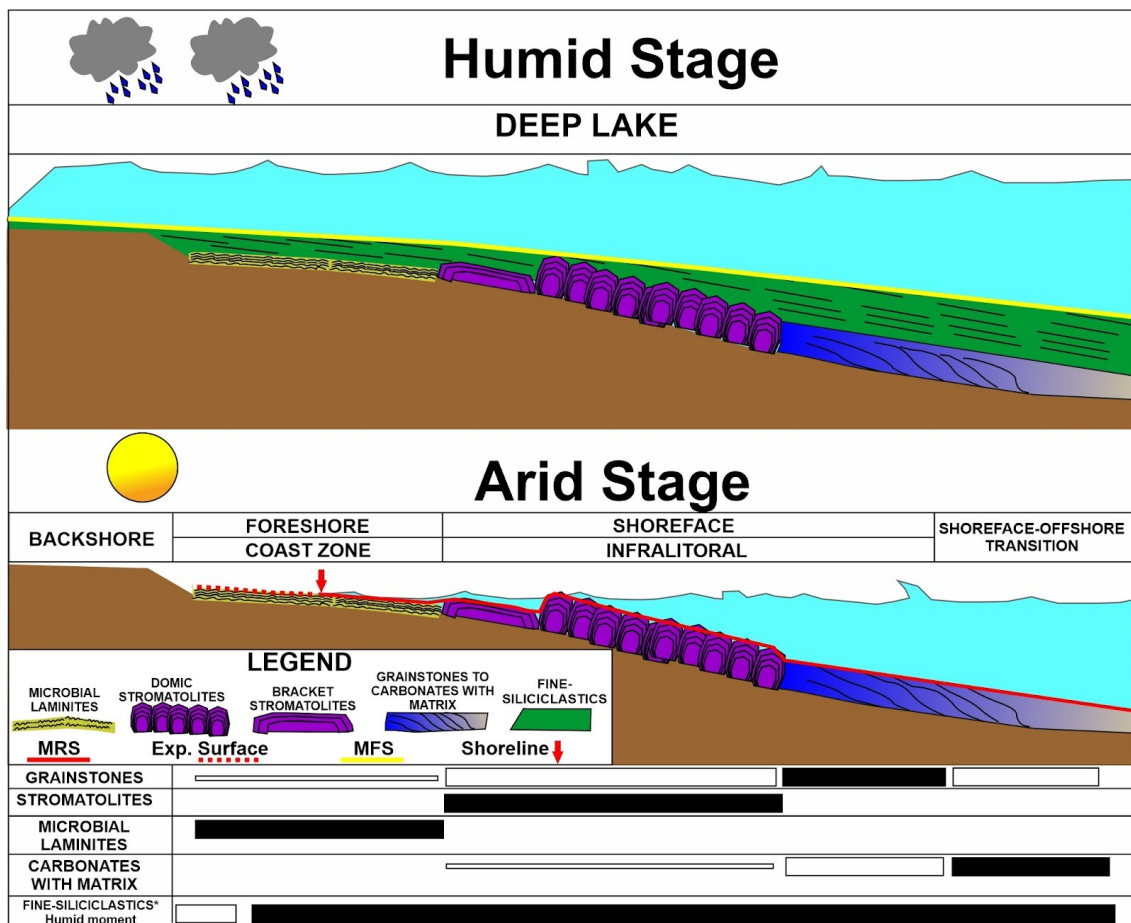


Figure 4: Facies distribution within the lake system under arid and humid stages. Black bars indicate preferential places to facies occurrence. Thick and thin white bars indicate minors chances of occurrences of each facies.

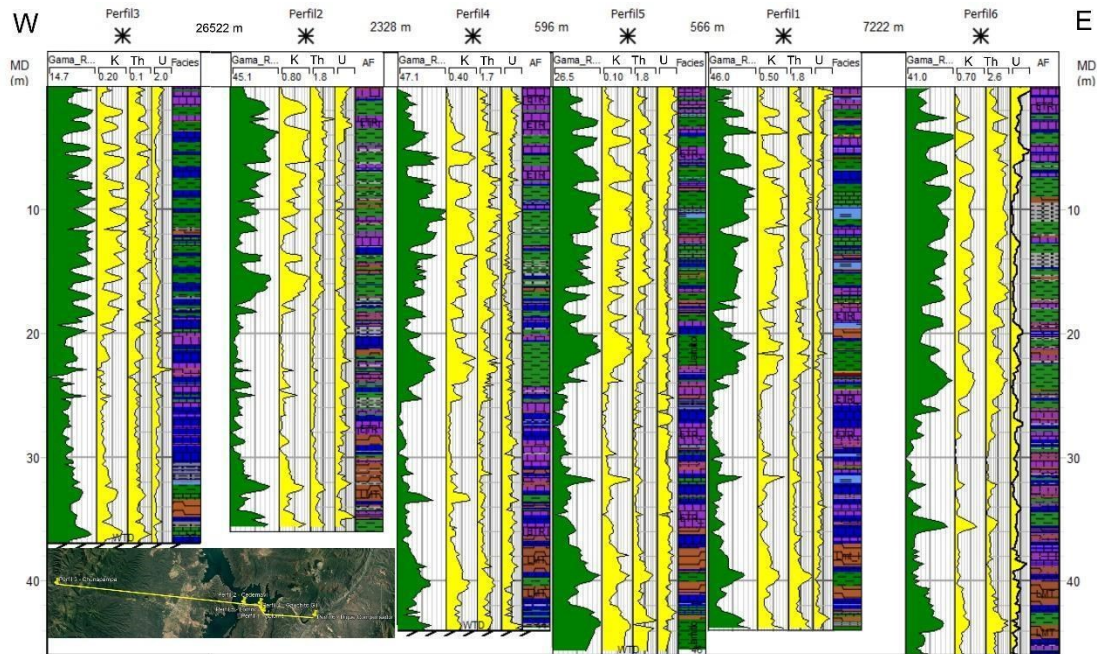


Figure 5: Outcrop sections with facies and gamma-ray (green logs) and K, Th and U contents (Yellow logs).

### 3.2. Continuous Wavelet Transform

Spectral decomposition of the gamma-ray signal was made by Continuous Wavelet Transform (CWT) application. The wavelet transform is an analysis tool well suited to studying multiscale, nonstationary processes occurring over finite spatial and temporal domains, such as well logs (Vega, 2003). It occurs through a mother wavelet being used for sweeping and convolving the input time-series, a power spectrum map highlighting several frequency components that make the original signal (Daubechies, 1992). The mathematical expression is given by the eq. (1), where  $x(t)$  is a time-series to be analyzed, and  $(a,b)$  is the expression that defines the wavelet applied, being a crucial step for the precise analysis of the frequency of well logs (Chandrashekar and Rao, 2012). The parameter  $a$  corresponds to the scale factor – or wavelet stretching – and  $b$  is the translation applied to the mother wavelet.

Eq. (1)

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}(t) dt$$

We chose the Morlet wavelet (Morlet *et al.* 1982) because its sinusoidal shape is the most suitable for identifying sedimentary cycles (Prokoph and Agterberg, 2000).

The output represented by the matrix wavelet coefficient  $C$  is a representation of  $x(t)$  in the time-frequency domain, that is, for each value of the signal  $x(t)$  in time,  $C$  has entries corresponding to various frequency scales. Figure 6 summarizes how a wavelet stretches and translates around a time/depth series to detect multiple frequencies at different times or spaces.

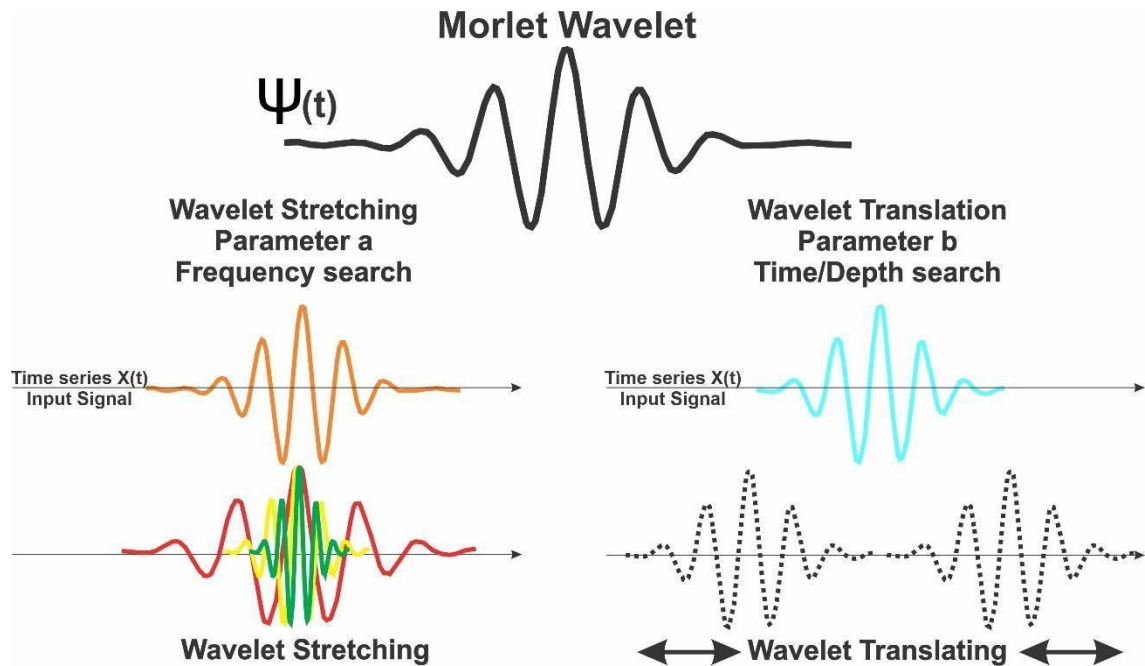


Figure 6: Example of the Morlet Wavelet stretching and translating around an input time series in order to sweep different frequencies. Adapted from Li et al. (2023).

### 3.3. DTEL and INDTEL

Detrend Error Log (DTEL) and Integrated Detrend Error Log (INDTEL) are methods described by Behdad (2019) in order to obtain a better accuracy of well-log data by reducing the impact of errors and noise in the measurements. These methods improve the accuracy and reliability of well log data by removing trends and noise, which can obscure smaller-scale variations in the data. DTEL is based on a tenth-degree polynomial equation that describes the long term trend – or Error Log – in the input time series, so that when the polynomial trend subtracts the input signal, the original data is normalized. INDTEL is the integration of each DTEL sample and shows all the hidden trends of the DTEL log (Behdad, 2019) (Figure 7). This author highlights that these methods are better than the previous trends analysis, such as PEFA and INPEFA (De Jong *et al.* 2006, 2007, 2009), due to their flexibility, ability to capture dynamic changes in the data, accuracy in results, and transparency in interpretation.

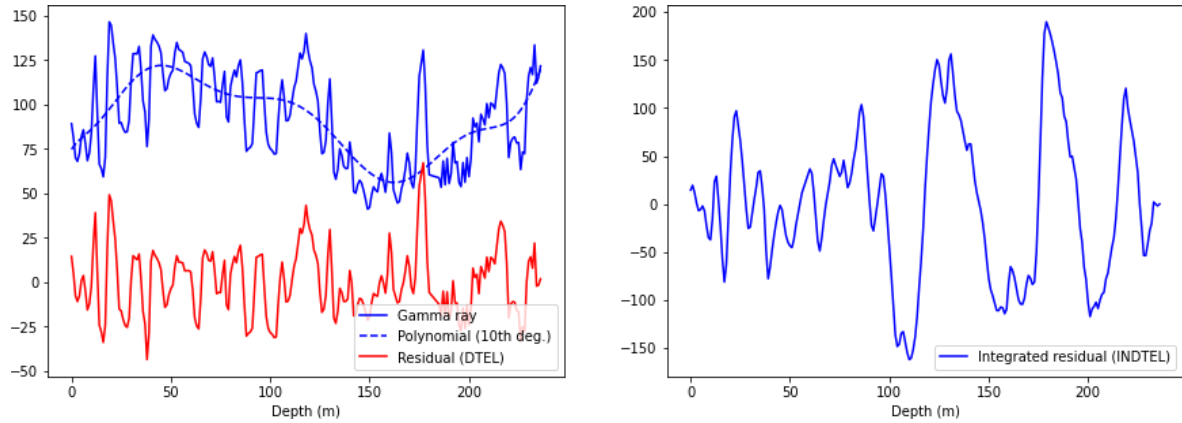


Figure 7: Examples of DTEL and INDTEL outputs. Adapted from Behdad (2019).

Furthermore, to compare cycles of different methods, we also applied the method of Hidden Markov Models (HMMs) to the facies sequences, which returns the transgressive and regressive cycles as the hidden states.

### 3.4. Hidden Markov Models

A Hidden Markov Model (HMM) consists of a Markov chain of hidden states and other observable states, where for each hidden state there is a distribution over the observable states (Dyer et al. 2018; Geyman et al. 2021). In the context of stratigraphy, the cycles of different scales are the hidden states of the Markov chain and the facies are the observed states. For each cycle, some facies are more probable than others, then, the objective is to determine stratigraphic cycles from the facies sequence (Geyman et al. 2021). In the theory of HMM, there are several algorithms to build the models and also to obtain estimates of the hidden sequence of states from the sequence of observed states (Harder, 2017).

A Hidden Markov Model  $M$  on the facies set  $F$  consists of a matrix of transition probabilities,  $(p_{i,j})_{i,j \in \{R,T\}}$ , between the regressive and transgressive cycles, and two vectors  $(p_j^R)_{j \in F}$  and  $(p_j^T)_{j \in F}$  with the probabilities of each facies in  $F$  being found in regressive and transgressive cycles, respectively. We can determine what is the probability of obtaining the sequence of facies  $(f_k)_{k=0,\dots,n}$ , given the HMM  $M$ . This is accomplished by the *log-likelihood* function, which precisely returns the logarithm of this probability. We work with the logarithm of the probability, as the probability itself tends to be on the order of  $2^{-n}$ . The *log-likelihood* provides a measure of how likely the sequence of facies is given the Hidden Markov Model  $M$ .

We only have the facies sequence and no information (or just an estimate) about a HMM  $M$  that fits the facies sequence. The measure of how compatible are the HMM  $M$  and the sequence of facies is the *log-likelihood* of the  $(f_k)_{k=0,\dots,n}$ , given  $M$ . In practice, we have the inverse problem of determining the parameters of a HMM  $M$  that maximizes the *log-likelihood* of the  $(f_k)_{k=0,\dots,n}$ . The Figure 8 shows an example of a Hidden Markov Model and this inverse problem in our context.

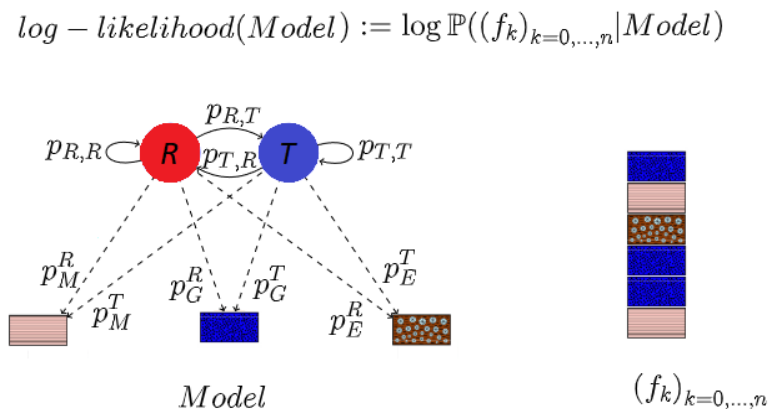


Figure 8: On the left, we have the representation of a HMM. The hidden Markov chain consists of hidden states  $R$  and  $T$ , representing regressive and transgressive cycles, and transition probabilities represented by weighted arrows  $(p_{i,j})_{i,j \in \{R,T\}}$ . The observable states are the three types of facies and the weights on the dotted arrows indicate the probability of each of the facies being observed in each of the cycles. On the right, we have an observed facies sequence. The objective is to adjust the model probabilities in order to maximize the log-likelihood. Adapted from Geyman et al. (2021).

Traditionally, this problem is solved by initializing random values in the parameters of the HMM  $M$  (sampling matrices and probability vectors with the uniform distribution) and then applying the Baum-Welch algorithm (Baum et al. 1970), which changes the parameters in order to increase the *log-likelihood* of the sequence  $(f_k)_{k=0,\dots,n}$ . This algorithm is a particular case in the context of HMMs of the more general expectation maximization algorithm.

Finally, once we have a HMM  $M$  that maximizes the *log-likelihood* of the sequence  $(f_k)_{k=0,\dots,n}$ , we apply the Viterbi decoding algorithm (Viterbi, 1967) to obtain the sequence of regressive and transgressive cycles, i.e.  $(c_k)_{k=0,\dots,n}$ , in  $\{R, T\}$ , most likely.

In summary, given the sequence of facies  $(f_k)_{k=0,\dots,n}$ , the suggestion of regressive and transgressive cycles is done in two steps. First, a random HMM  $M$  is initialized which has its parameters optimized to maximize the *log-likelihood* of

$(f_k)_{k=0,\dots,n}$ . Then, the Viterbi algorithm is applied using the sequence  $(f_k)_{k=0,\dots,n}$ , and the model M to obtain the most probable sequence of cycles  $(c)_{k=0,\dots,n}$ . The HMM does not have any information about the cycles and therefore it may happen that the suggested sequence of cycles is inverted. This is easily solved by inverting the entries of the input sequence.

All sedimentary cycles identified by the different methods cited above are limited by stratigraphic key surfaces that bound a complete oscillation in base level or sediment supply (Catuneanu *et al.* 2010, 2011). The progradational trend is bounded by the Maximum Retraction Surface (MRS) and the retrogradational trend is bounded by the Maximum Expansion Surface (MES) (Fragoso *et al.* 2023).

All methods cited above were implemented in a Jupyter Notebook environment through the application of Python programming language.

## 4. Results

### 4.1. Wavelet Analysis

Considering the results obtained in tests with wavelet analysis, the ideal value for the stretching factor was a scale of up to 32, in order to sweep the different frequencies content and output the higher and the lower frequency of the studied sections (Figure 9). It is possible to see that the results of CWT1, CWT2, and CWT3 are very similar, highlighting higher frequencies, while CWT4 and CWT5 show larger trends of lower frequencies, especially on CWT5.

From the maximum and minimum amplitudes on the highest frequency signal, horizontal markers were delimited as potential candidates to be boundaries of higher frequency cycles. Then, the markers were evaluated concerning facies to see if these turning points coincide with the transgressive or regressive facies trend (Figure 10) and then would represent Maximum Expansion Surfaces (MES) or Maximum Retraction Surface (MRS), respectively.

Regressive trends are formed when the accommodation space is progressively consumed due to increased evaporation rates, creating ideal conditions to form carbonate facies. The progressive falling of the base level triggers the shoreline regression, and the carbonate facies belt prograde towards deeper portions of the lake to maintain itself within the water table. The development of exposure surfaces at the top of the shallower facies commonly marks the top of the regressive cycles (e.g.,

Magalhães *et al.* 2020). Negative amplitude peaks from wavelets match with grainstones, stromatolites, or microbial laminites, which are facies that occur in response to an arid climate and delimit high-frequency MRS.

On the other hand, transgressive trends reflect the increase of accommodation space due to the higher precipitation rates in the depositional environment. Bento-Freire (2012) related the highest K and Th values with the Maximum Humidity Surface (MHS), the moment of highest input of fine-siliciclastics sediments to the basin. This is not a physical surface and occurs typically in the middle of siliciclastics layers. After this point, the base level continues to rise but at lower rates until the deposition of the last fine-grained layer at the Maximum Expansion Surface (MES), marking the turning point from the transgressive to the regressive high-frequency trend. Positive amplitude peaks match with fine-siliciclastic facies.

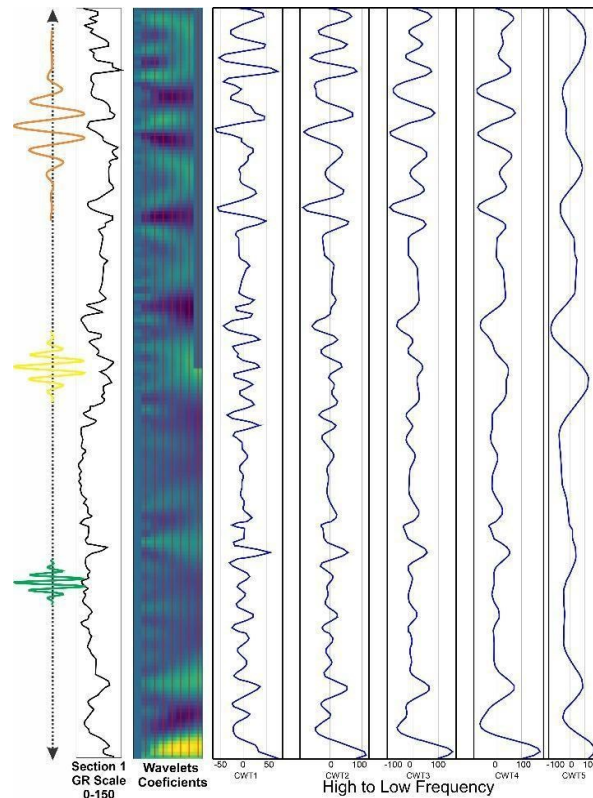


Figure 9: Scheme of the Morlet Wavelet searching the gamma-ray proxies and outputting multi-frequency curves. Adapted from Wei Li *et al.* (2023).

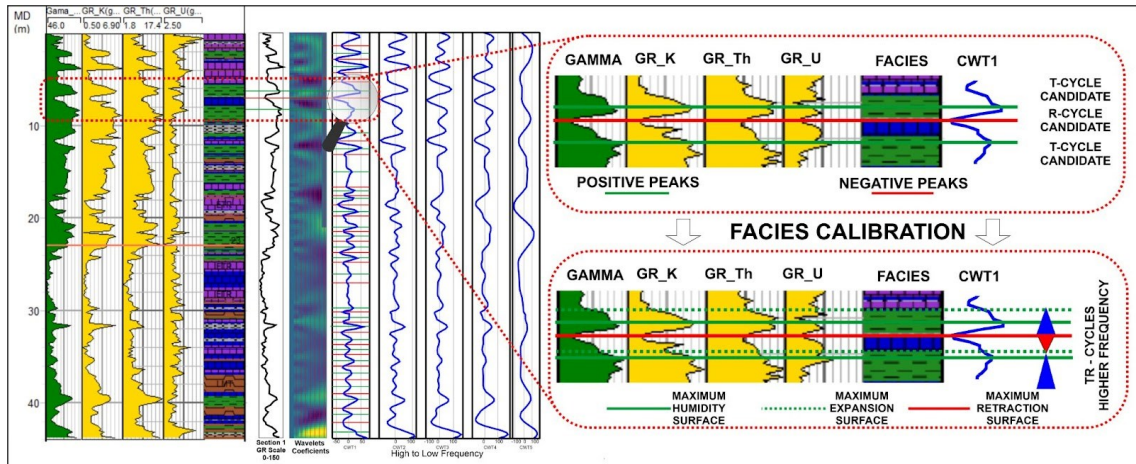


Figure 10: Example of calibration between the high-frequency output (CWT1) with facies occurrence in order to map the transgressive-regressive cycles.

After scanning the data, it was possible to delimit high-frequencies T-R cycles. The cycles have different anatomies based on their position in the section, with a predominantly asymmetrical geometry and prominence of the regressive component at the lower section. At the top, the cycles are more symmetrical, with better preservation of the fine-siliciclastics from a transgressive component (Figure 11). The turning point for changes in the cycle's anatomy is the presence of a thick fine-siliciclastic layer around the middle of all sections. This point represents a MRS that bound a basal long-term regressive cycle and starts a long-term transgressive cycle toward the top of the section.

Notably, the basal cycles frequently exhibit missed-beats (Goldhammer et al. 1990) related to the non-preservation of transgressive components, generating a successive stacking of regressive hemicycles. In terms of signal, it is represented by low amplitudes, nearly constant around zero, as will be discussed later.

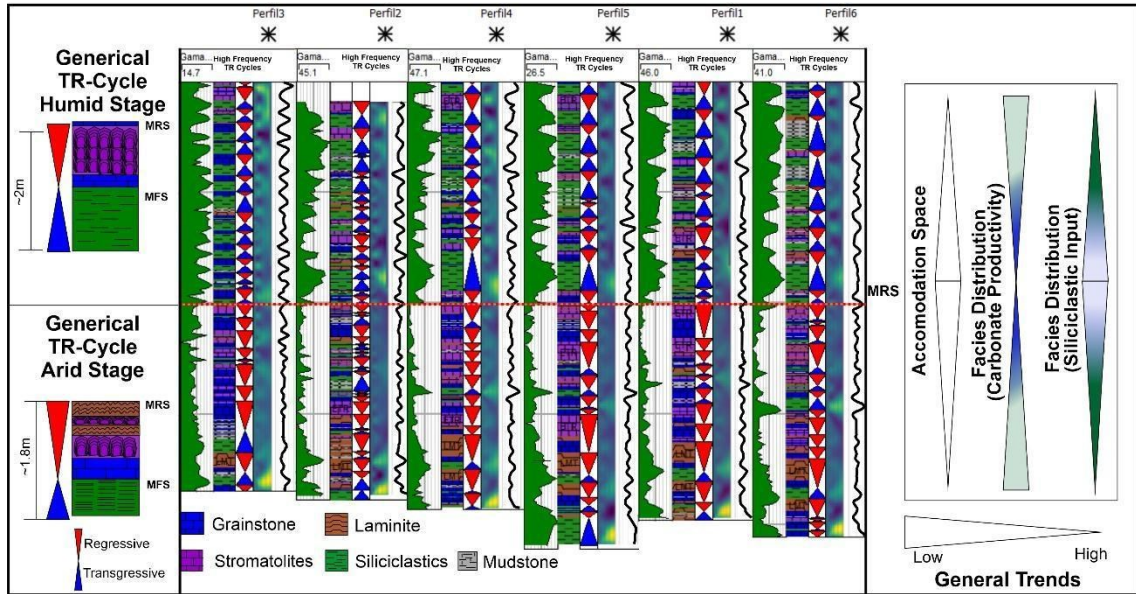


Figure 11: High-frequency transgressive-regressive cycles identified for all sections, and the main trends that are responsible for the carbonatic or fine-siliciclastic occurrence. Note that the MRS is a turning point from a basal section dominantly carbonatic to an upper section with massive presence of fine-siliciclastic.

#### 4.2. DTEL and INDTEL Analysis

DTEL and INDTEL results show well-marked trends, highlighting larger oscillatory cycles once INDTEL integrates and accumulates all samples of the DTEL signal. It has a response that could be compared with a medium-frequency stratigraphic framework, so we tested by comparing this output with a conventional interpretation, building a medium-frequency scale from the high-frequency cycles obtained from the CWT, according with the methodology described in Magalhães *et al.* (2020) and Fragozo *et al.* (2021) (Figure 12A). Then we compare these results with the cycles obtained from INDTEL to see if there is a match between the geological interpretation and the trends of signal output. Figure 12B shows a good correlation between the interpreted medium-frequency cycles and the INDTEL curve output trends. This method also shows a high potential for correlation from finding similar patterns on different well datasets.

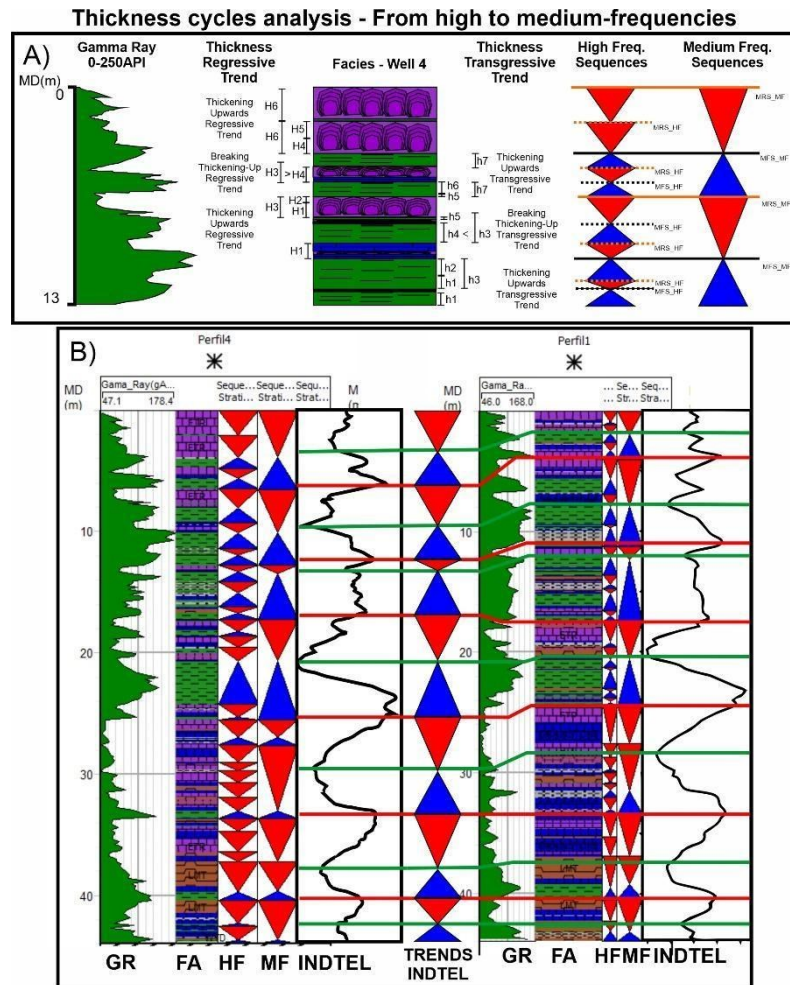


Figure 12: A) Traditional scale-up approach from the high to medium frequency cycles (Magalhães et al. 2020; Fragoso et al. 2021). B) Example of a good correlation between the traditional approach to the INDTEL output. (GR – Gamma Ray; FA – Facies associations; HF – High Frequency Cycles; MF – Medium Frequency Cycles).

#### 4.3. Hidden-Markov-Models

As previously discussed, the Hidden-Markov Model is a statistical framework designed to uncover hidden states that can not be observed directly (e.g., transgressive or regressive trends), but controls the occurrence of the observable variables, such as a sequence of facies in a vertical section (Rabiner and Juang, 1986; Geyman *et al.* 2021).

Our HMM results shows a highly cyclical pattern that can be related to T-R cycles of higher-frequencies (Figure 13), similar to the output found by the CWT method, especially at the upper part of the studied section, where the cycles are on the same pace in relation to facies transitions. The HMM method also provided some divergent outputs, mainly in the basal part of the section where the dominance of successive stacking of regressive cycles is expected. This can be occurring because

the matrix of facies transition is imposing the identification of a hidden cycle purely based purely on probabilities, as will be discussed later.

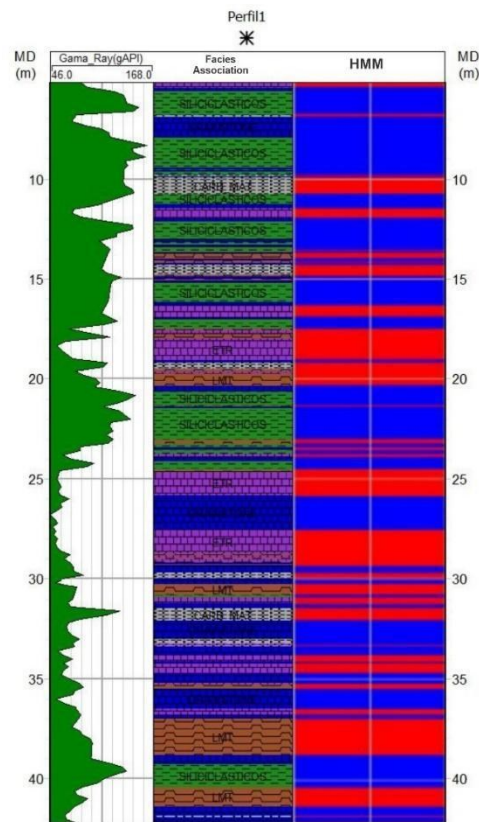


Figure 13: Output from Hidden Markov Model showing a good pace with input of facies. Red and blue bars are regressive and transgressive cycles, respectively.

## 5. Discussion

### 5.1. Multi-frequency modulation and stratigraphic record

Understanding how sequences are formed and preserved during periods of oscillating lake levels is crucial for reconstructing past environment changes. In this context, the modulation of different frequencies in the sedimentary record becomes a key factor to consider. During long-term lake level falling, the accommodation space for sediments is significantly reduced, contributing to the modulation and attenuation of the higher-frequencies signals through the imposition of the long-term over the short-term trends (Goldhamer et al. 1993, 1994). In this context, only high-frequency fluctuations with large amplitudes are able to form complete sedimentary sequences, but even these high amplitude oscillations may have a limited preservation potential if the overall declining trend attenuates the high-frequency rise of lake level (Pedrinha et

al. 2015). This process can potentialize the generation of missed-beats in the sedimentary record (Goldhamer et al. 1990).

Our high-frequency signal analysis reveals a distinctive pattern between the lower and the upper sections, with a dominance of an homogeneous low amplitude signal at the base, becoming a signal with high amplitude towards the top of the section (Figure 14). The signal pattern of each section is reflected in different geometries and facies stacking patterns, characterizing typical cycles for arid and humid long-term trends (see Figure 11), as previously interpreted by Bento-Freire (2012).

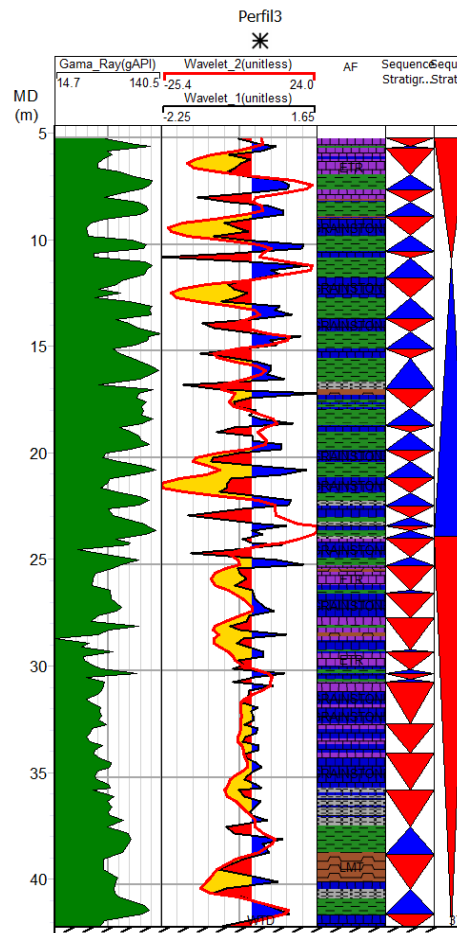


Figure 14: Main differences between upper and lower sections. Note the low amplitude signal in wavelet1 curve in the lower section, dominated by successive carbonate stacking. On the upper section there is a dominance high-amplitude signal due to the better preservation of fine-siliciclastics facies. Lower and Upper large trends are interpreted as long-term arid and humid trends (Bento-Freire, 2012; Gomes et al. 2020).

The signature at the basal section can be a result of an attenuation and modulation process that hinders the strength of the original high-frequency oscillatory

signal in response to the dynamic of the depositional environment. Bento-Freire (2012) shows a conceptual model of multifrequency curves superposition to explain facies stacking, arguing that a long-term arid trend has influenced a regional shallowing creating favorable conditions for the development of carbonate facies in a regressive trend (Figure 15). On the shallower conditions, there is the dominance of bracket-shape stromatolites and microbial laminites, often exhibiting structures indicative of subaerial exposure (Bento-Freire, 2012; Deschamps *et al.* 2020).

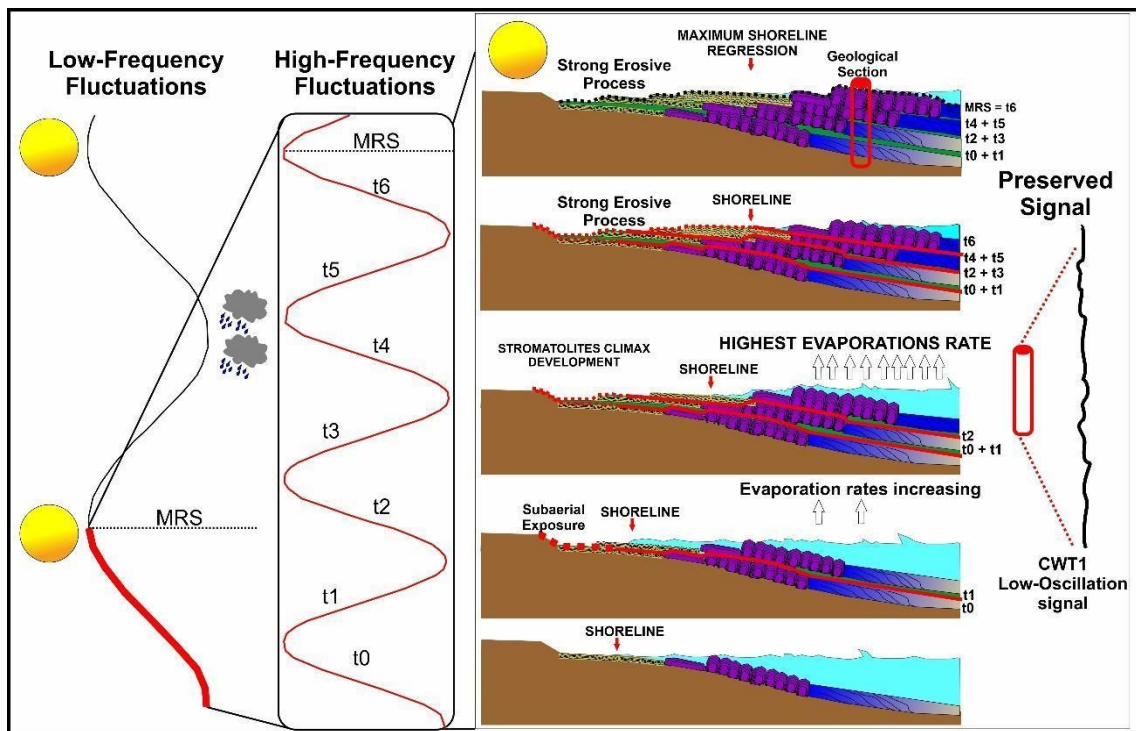


Figure 15: Model of a longitudinal profile of the depositional lake showing the facies belt evolution under a long-term arid trend. Arid and humid high-frequency cycles are still occurring within a long-term trend. However, the increased aridity conditions led to a progressively lowering of the base level, which makes it difficult to preserve the fine-siliciclastic facies formed during humid climates. This sedimentary stacking forms the signal with low amplitude oscillations. Adapted from Bento-Freire (2012).

During long-term trends of lake level falling, the preservation of the fine-siliciclastic facies is difficult, due to both low sediment supply and accommodation, as well as erosive processes during shoreline regression. Under such conditions, elementary sequences may appear condensed or even be lost in proximal settings. Only high-frequency superimposed fluctuations with large amplitudes are favorable for preserving transgressive cycles (Pedrinha *et al.* 2015), as can be attested through the minor occurrence of transgressive facies in the basal section reflecting a high-amplitude signal pulse (Figure 16). It may be occurring as a response to a sudden

subsidence pulse that creates accommodation within an upward trend of space consumption by climatic imposition (Schlager, 2005; Muniz and Bosence, 2015).

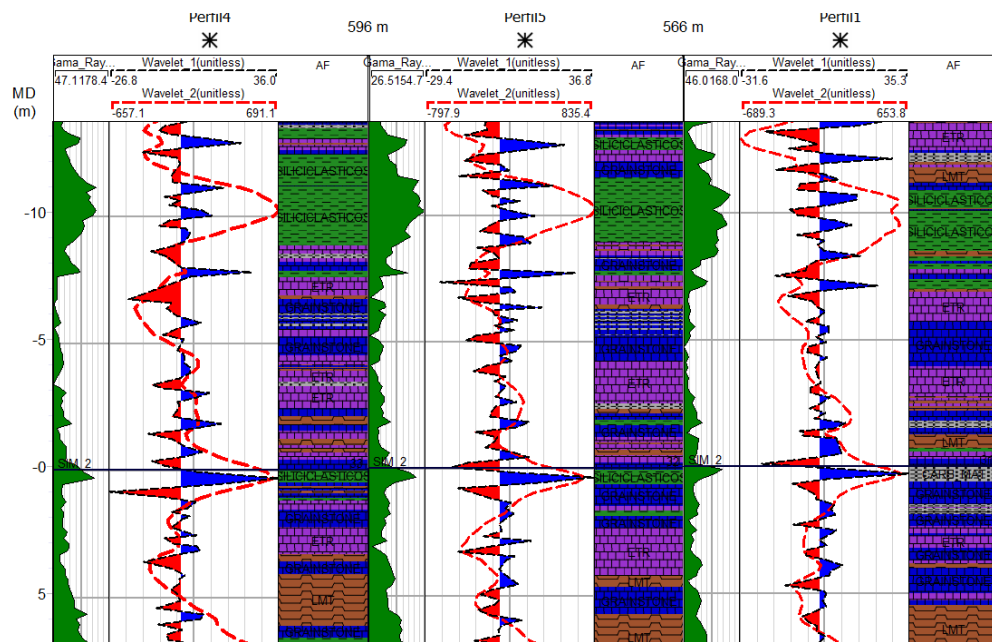


Figure 16: Carbonate-dominated section with isolated occurrence of transgressive facies. Note in the high-frequency curve that amplitude reaches its maximum at the point where the transgressive facies is preserved (marker at zero depth).

The overall low amplitude signal of this section is reflected at the outcrop scale through the homogeneous stacking of carbonates, being difficult to identify the key surfaces that bound the cycles (Gomes et al. 2020). The outputs from the high-frequency wavelets analysis can be a useful tool for cases where the cycle boundary identification is more complex, once our results have demonstrated a good correlation between the regressive boundaries (MRS) and negative amplitude peaks from wavelets signal.

Large amplitude oscillations dominate in the upper part of the section. Bento-Freire (2012) argues that the upper portion is influenced by long-term humid climate, with higher precipitation rates influencing the creation of an accommodation space larger than the basal section. It favours the end-members preservation of both arid and humid moments, resulting in abrupt transitions between fine-siliciclastic and carbonates. Our signal data shows that the higher accommodation can be viewed as the result of an in-phase superposition between the high and lower-frequency signals, reflecting the overall space created in such conditions. Moreover, this greater accommodation contributes to the development of domical-shape stromatolites

(Bento-Freire, 2012; Gomes *et al.* 2020) growing up in a “catch-up-like” mechanism (Neumann and Macintyre, 1985). Deschamps *et al.* (2020) emphasize that the main cause of the abrupt facies transition was a progressive physiographic change in the lake. They believe that the lake’s flattening contributed for high-amplitude shoreline shifts and rapid stacking facies from proximal to distal environments as high-frequency oscillations occurred.

The higher preservation in the upper section may be an expression of what Fragoso *et al.* (2021) called the “accordion effect”. This term refers to the way that sedimentary cycles can be compressed or expanded in different parts of a depositional basin due to variations in the accommodation space. In areas with high creation of accommodation space, sedimentary cycles expand and become thicker, while in areas of low accommodation space, cycles can be compressed (or eroded) becoming thinner.

## 5.2. Hidden-Markov Models, multi-frequency modulation and missed beats

As we have seen, the lower part of the studied section is dominated by consecutive stacking of carbonate facies, interpreted as successive regressive cycles stacked formed under an arid climate (Bento-Freire, 2012; Gomes *et al.* 2020). However, the output from the HMM has given some divergent results, placing thin transgressive cycles in the middle of the stacked carbonates. The inconsistency in some outputs can be a result of a pure probabilistic approach of the HMM. Taking as an example the depth 37m of the section displayed in Figure 13, there is a transgressive cycle indication as a result of the transition from the laminite to grainstone, but it is not correct, once a transgression is characterized by a flooding event associated to the fine-siliciclastic facies deposition. Stromatolite facies is the most likely to succeed the laminite, occurring in 52% of the time, which means that this transition is the dominant and governed by the same hidden mechanism, while the rest of the transitions are governed by other processes. The typical cycles that dominate in this section are characterized by the absence of the transgressive components (Bento-Freire, 2012; Gomes *et al.* 2020), then, when we figure out some of these “transgressive cycles” from HMM output, it suggests the actuation of a new mechanism, such as missed-beats (Goldhammer *et al.* 1990).

Missed-beats refers to gaps or missing intervals in the sedimentary record caused by erosion, non-deposition or tectonic activity (Steinhauff & Walker, 1995). The presence of missed-beats can contribute to an increase in secondary porosity in carbonates, once they often occur in association with exposure surfaces and become susceptible to the meteoric fluids that alter and dissolve the existing carbonate fabric. This can enhance the reservoir potential of the rocks that undergo this process. (Moss & Tucker, 1995; Tucker, 1993; Evans et al. 1994; Fluguel, 2010; Morad et al. 2013; Magalhães et al. 2021). Therefore, recognizing these events is important for reservoir characterization and zonation.

As we have seen in the topic *Multi-frequency modulation and stratigraphic record*, the conceptual model proposed by Bento-Freire (2012) is used to explain the development of successive carbonate stacking in the lower part as a product of a multi-frequency signal modulation. We examined the impact of geological signals on the preservation of the sedimentary records by analyzing the high and low frequency signals from our dataset, to identify signals with opposite trends that align with the transgressive cycles from HMM, assuming that these areas are highly likely to contain missed-beats.

We calibrated this approach at the top of the laminite facies that occurs at the bottom of all sections, which shows exposure surfaces marked by desiccation cracks at its top (Bento-Freire, 2012; Deschamps *et al.* 2020) (Figure 17). Then, this place can be a physical evidence of sedimentation break or erosive process, being a probable place of the missed-beats. Following this approach, we identified some possible missed-beats along the entire section (Figure 18).

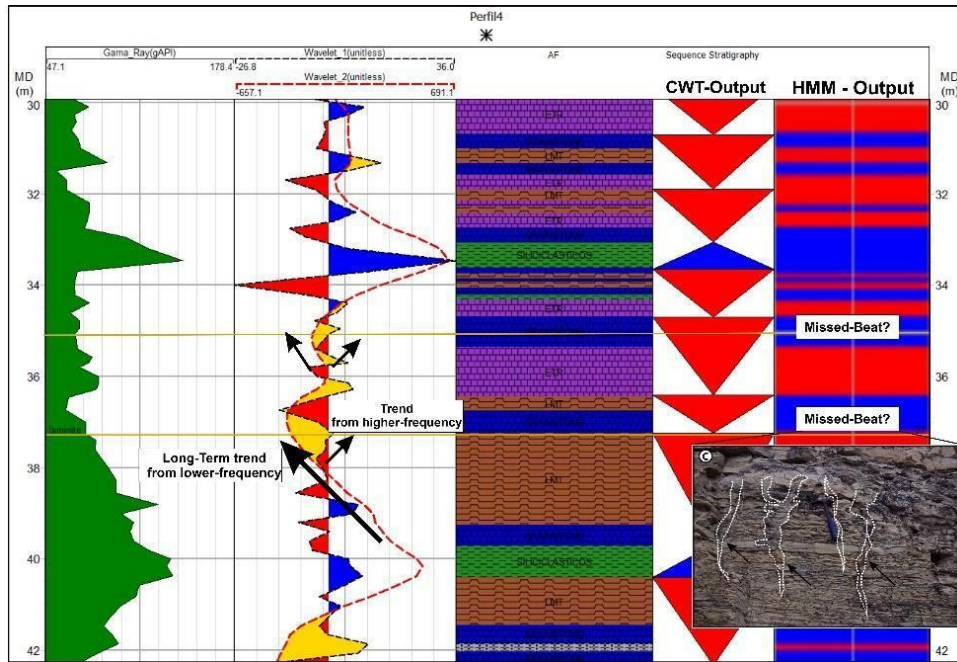


Figure 17: Model for missed-beats identification. When the lower-frequency is in a aridity trend, towards to the minimum amplitude peaks, and the high-frequency curve is in transgressive trend, the accommodation space is too low precluding the preservation of the fine facies, enhancing the possibility of the missed-beats occurrence. Observe the desiccation cracks at the top of the laminite facies (photo available in Deschamps et al. 2020).

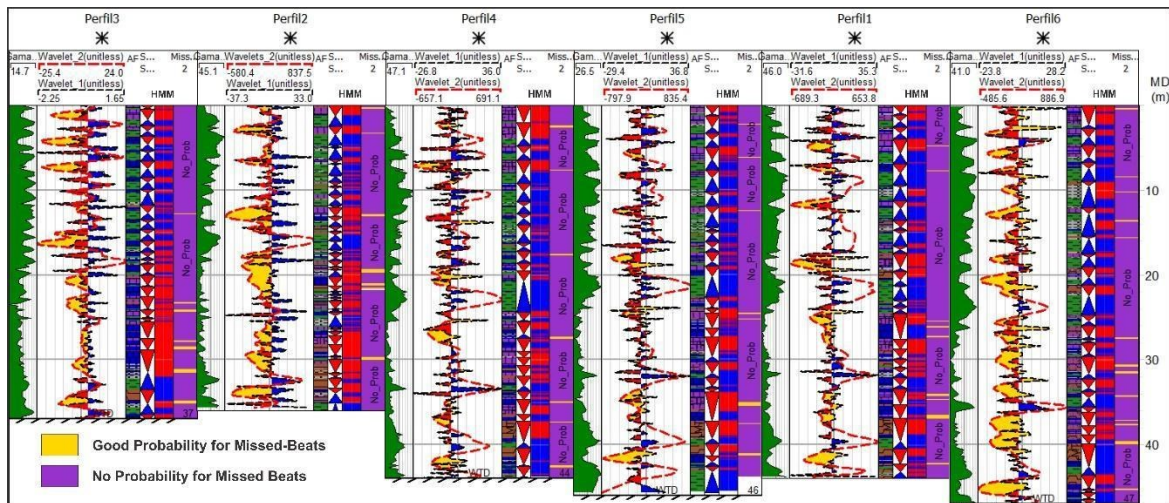


Figure 18: Potential chances of missed-beats occurrence on the sections. Note that there is a higher concentration on the lower part of the section as result of a higher aridity influence.

The identified missed-beats are located mainly in the basal section, as expected, but some can also be found in the upper section. Under long-term arid trends, the preservation of transgressive cycles becomes more challenging as the overall base level lowers. Consequently, when a high-frequency transgressive cycle is deposited, it is more susceptible to subsequent erosion by the imposition of a long-term arid trend (Schlager, 2005).

On the other hand, transgressive cycles tend to be better preserved when the signals of different frequencies are in phase. High-frequency transgressive cycles under long-term humid trends create the best conditions for preserving fine-siliciclastic facies, due to the high accommodation space created in response to elevated precipitation rates (Bento-Freire, 2012). The fine-siliciclastic facies preserved in all sections follow this pattern, even when they appear in the lower section (Figure 19).

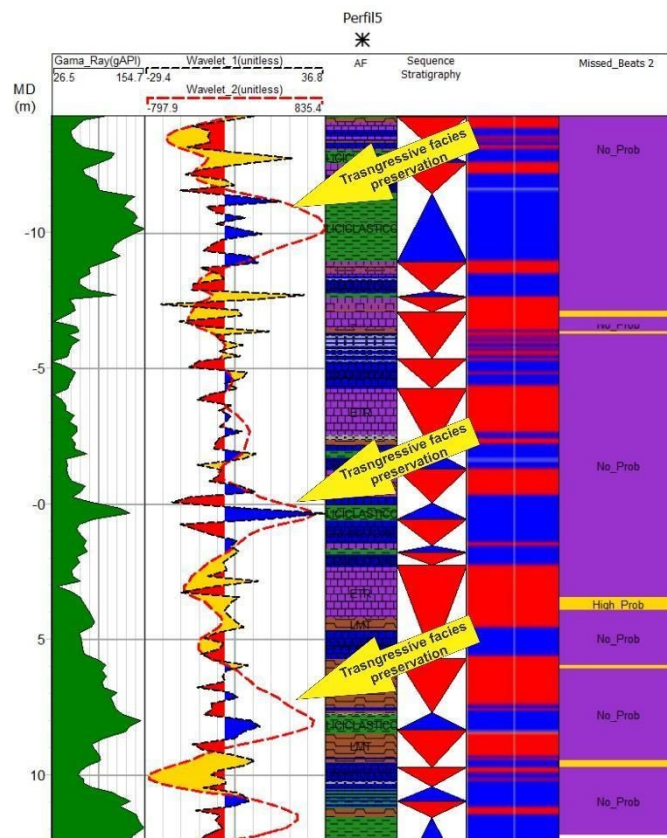


Figure 19: Fine-siliciclastic facies will be more preserved when there is a convergent trend from the lower and higher frequencies towards the maximum amplitudes. The layers which have the higher thickness are matching with this pattern.

### 5.3. INDTEL Correlation and multiscale stratigraphic framework

As previously mentioned, the geological signal can undergo transformations which, in turns, can influence the stratigraphic correlation. Frago et al. (2021, 2023) emphasize the importance of understanding the anatomy of sedimentary cycles and the hierarchical stratigraphic framework to facilitate the correlation by analyzing the frequency and mappability of cycles. Higher-frequency cycles have lower correlation potential, while lower-frequency cycles are more mappable. Therefore, identifying

upward trends in higher-frequency cycles can help in the construction of stacking patterns of the immediately higher-order cycles, increasing their correlation potential (Turner *et al.* 2012; Romers, 2014; Pedrinha *et al.* 2015). Methods such as INPEFA (De Jong *et al.* 2009; Wei Li *et al.* 2023) and INDTEL (Behdad, 2019) can be used to highlight remarkable trends and turning points in depositional trends. The trends found from the INDTEL are indicated for sequence correlation as it shows oscillations in the same magnitude order that medium-frequency interpreted by methods based on hierarchical approach (Magalhães *et al.* 2020; Fragoso *et al.* 2021) (see Figure 12).

The correlation results (

Figure 20) suggest high mappability potential across the studied region, indicating an organized pattern that provides evidence of allogenic controls in response to climate oscillations. Allogenic cycles are characterized by high mappability potential (Schwarzacher, 1993; Martins-Neto & Catuneanu, 2010) and can be the result of external forcing, such as the Milankovitch cycles. Previous studies on the Yacoraite Formation have proposed that high-frequency cycles may result from precession or obliquity (Bento-Freire, 2012 Pedrinha *et al.* 2015), while medium-frequency cycles may result from eccentricity forcing (Deschamps *et al.* 2020). However, these hypotheses have not been calibrated with orbital time series, and further investigation needs to be conducted.

Based on the identified trends of high and medium frequency cycles, a complete low-frequency regressive-transgressive cycle and an additional regressive cycle bounding the Balbuena IV were interpreted (Figure 21). The lower section regressive boundary indicates the maximum shoreline retraction and the lowest lake level for the Balbuena IV sequence. On the other hand, the transgressive cycle marks the maximum transgression of the shoreline and represents the maximum expansion of the lake. At the top of the section, a new regressive cycle signifies a shift from a prevailing humid period to a new phase under arid conditions.

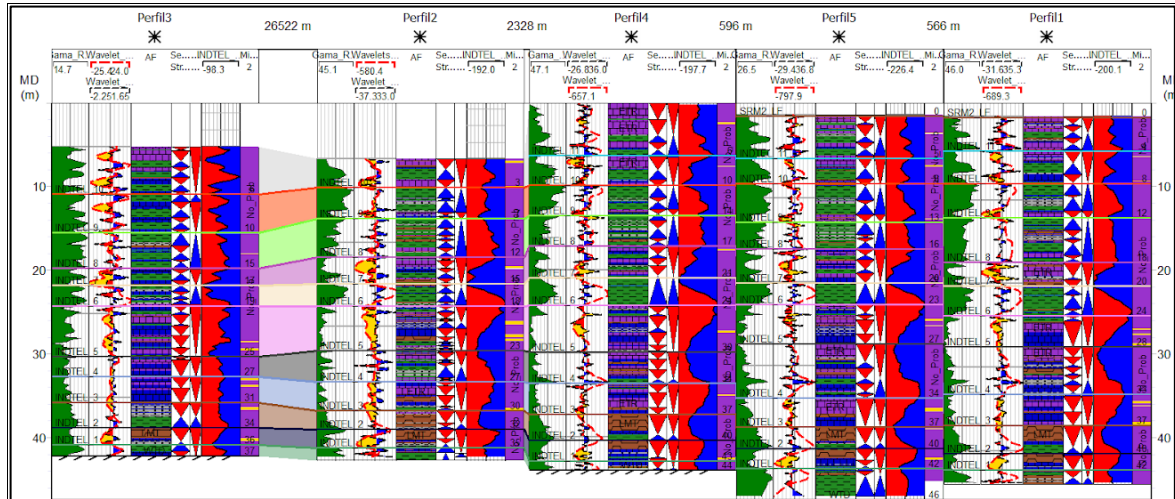


Figure 20: Medium-frequencies correlation obtained from the INDTEL trends. Note that the transgressive-regressive cycles show a high lateral mappability with a thickness regularity.

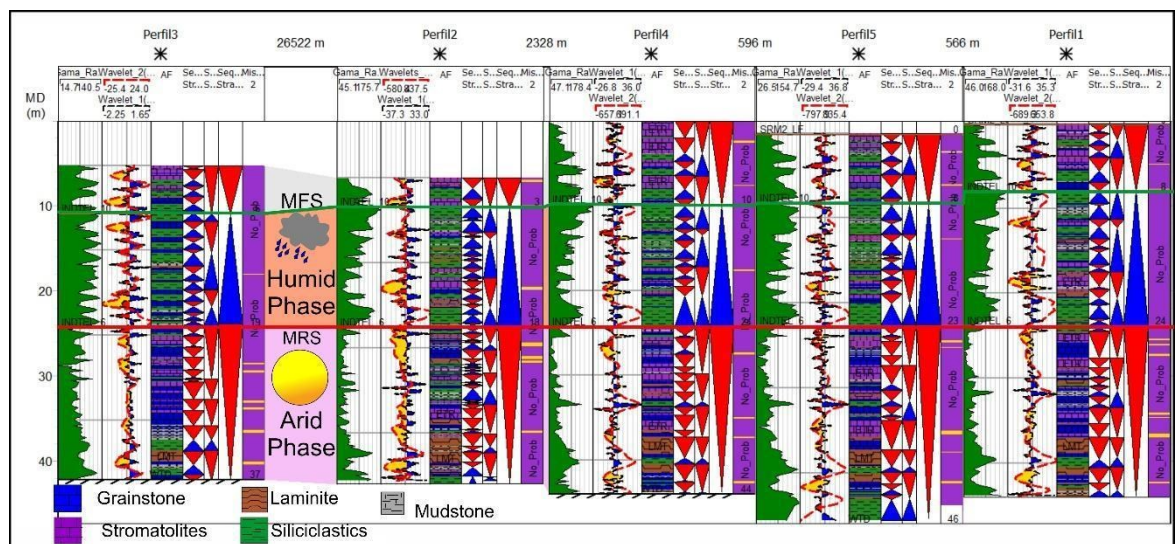


Figure 21: Larger climatic trends forming the low-frequency cycles. Note that the Maximum Regressive Surface of the lower frequency represents a turning point in the sedimentation, where below it, there is a highly stacked carbonate facies, while above it the section is dominated by abrupt transitions between grainstones and fine-siliciclastic facies.

## 6. Conclusions

The Balbuena IV sequence of the Yacoraite Formation exhibits a highly cyclical pattern related to the climatic fluctuations between arid and humid stages. Continuous Wavelet Transform (CWT) was applied and its highest frequency output showed a good fit with facies occurrence, where negative and positive amplitude peaks are matching with carbonates and fine-siliciclastic facies, respectively.

We have observed two distinct signal patterns in the lower and upper section as response to the signal modulation in different frequencies. The basal section exhibits

low-amplitude oscillations due to the highly stacked cycles of carbonates, while the upper section is characterized by high-amplitude oscillations resulting from abrupt transitions between grainstones and fine-siliciclastics facies.

The Hidden-Markov Model provides high-resolution T-R cycles as hidden states from the facies transitions, and when it is observed together with multi-frequencies curves from CWT, it can suggest missed-beats occurrence. Missed-beats are most likely to occur at the basal section, mainly when the lower-frequency curve shows a long-term arid trend, and the high-frequency curve is in an opposite trend. This approach can be a useful tool for identifying surfaces with potential porosity enhancement by meteoric fluid flows in reservoir zones.

The DTEL and INDTEL methods identified medium-frequency cycles by revealing signal-hidden trends, being a useful tool for stratigraphic correlations. These cycles show a good mappability potential, probably occurring in response to external forcing, such as the Milankovitch cycles. Future approaches can be directed toward studies that investigate if the Balbuena IV sequence can be tuned with orbital cycles of eccentricity, obliquity, or precession.

This study aimed to streamline the process of geological interpretation through a pragmatic approach based on signal analysis for stratigraphic interpretation. The results demonstrate the effectiveness of this methodology in constructing robust and hierarchically consistent stratigraphic models, validating it as a viable alternative to conventional interpretive methods. Furthermore, it is hoped that this approach can be applied to automate the detection of sedimentary cycles and stratigraphic model building, further optimizing the process of geological interpretation.

## **Acknowledgments**

We would like to thank Petrobras for providing the data used in the development of this research, as well as for funding scholarships within the RDI project "Artificial Intelligence applied to oil exploration and production in the pre-salt layer", developed by the UFMG.

## References

- Abdolahi, A., Bahrehvar, M., Chehrazi, A., Kadkhodaie, A., & Wood, D. A., 2023. Integration of geoscience data to delineate quality of the Asmari reservoir, Iranian part of the Persian Gulf basin. *Marine and Petroleum Geology* 152, 106229. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106229>.
- Adams, J.A.S. and Weaver, C.E., 1958. Thorium-to-uranium ratios as indicators of sedimentary processes: Example of concept of geochemical facies. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 42(2), 387-430. <https://doi.org/10.1306/0BDA5A89-16BD-11D7-8645000102C1865D>.
- Aigner, T., Schauer, M., Junghans, W.-D., Reinhardt, L. 1995. Outcrop gamma-ray logging and its applications: examples from the German Triassic. *Sedimentary Geology* 100(1), 47-61. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(95\)00102-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(95)00102-6).
- Baum, L. E., Petrie, T., Soules, George & Weiss, N. 1970. A maximization technique occurring in the statistical analysis of probabilistic functions of markov chains. *The annals of mathematical statistics* 41 (1), 164–171. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177697196>.
- Behdad, A. 2019. A step toward the practical stratigraphic automatic correlation of well logs using continuous wavelet transform and dynamic time warping technique. *Journal of Applied Geophysics* 167, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.05.007>.
- Bento-Freire, E., 2012. High Resolution Sequence Stratigraphic characterization of microbial carbonate from Palaeocene interval of Yacoraite Formation – Argentine. Master Thesis, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (in Portuguese with English abstract), 243 pp.
- Bristow, C.S., Williamson, B.J. 1998. Spectral gamma ray logs: core to log calibration, facies analysis and correlation problems in the Southern North Sea. *Geological Society, London, Special Publications* 136(1), 1-7. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.136.01.01>.
- Bunevich R.B., Borghi L., Raja Gabaglia G.P., Terra G.J.S., Bento Freire E., Lykawka R., Fragoso D.G.C., 2017. Microbialitos da Sequência Balbuena IV (Daniano), Bacia de Salta, Argentina: caracterização de intrabioarquitecturas e de microciclos. *Pesquisas em Geociências*, 44(2):177. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78270>.
- Carmona, R., Hwang, W.-L., & Torresani, B., 1998. *Practical Time-Frequency Analysis: Gabor and wavelet transforms, with an implementation in S*. First Edition, Academic Press. New Jersey, 490 pp.
- Catuneanu, O., Bhattacharya, J.P., Blum, M.D., Dalrymple, R.W., Eriksson, P.G., Fielding, C.R., Fisher, W.L., Galloway, W.E., Gianolla, P., Gibling, M.R., and others., 2010. Thematic Set: Sequence stratigraphy: Common ground after three decades of development. *First break*, 28(1). <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2010002>.

Catuneanu, O., Galloway, W. E., Kendall, C. G. St. C., Miall, A. D., Posamentier, H. W., Strasser, A., & Tucker, M. E., 2011. Sequence Stratigraphy: Methodology and Nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy*, 44(3), 173-245. <https://doi.org/10.1127/0078-0421/2011/0011>

Catuneanu, O., 2019. Model-independent sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 188, 312–388. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.09.017>.

Ceolin, D., dos Santos Filho, M. A. B., Terra, G. J. S., Fragoso, D. G. C., Bunevich, R. B., Fauth, G., Hernández, J. I., & Hernández, R. M., 2022. Ostracods from upper Yacoraite Formation (Danian), Salta Basin, Western Argentina: Taxonomy and paleoenvironmental indicators of climatic signals in lacustrine deposits. *Journal of South American Earth Sciences*, 116, 103836. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103836>.

Chandrasekhar, E. and E. Rao, V., 2012. Wavelet analysis of geophysical well-log data of Bombay offshore basin, India. *Mathematical Geosciences*, 44, 901–928. <https://doi.org/10.1007/s11004-012-9423-4>

Daubechies, I., 1992. Ten lectures on wavelets. Society for Industrial and Applied Mathematics, 357 pp. <https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/1.9781611970104>.

De Jong, M., Smith, D., Nio, S.D. and Hardy, N., 2006. Subsurface correlation of the Triassic of the UK southern Central Graben: new look at an old problem. *First Break*, 24, 103–109. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.24.1096.26993>.

De Jong, M.G.G., Nio, S.D., Smith, D.G. and Bohm, A.R., 2007. Subsurface correlation in the Upper Carboniferous (Westphalian) of the Anglo-Dutch Basin using the climate-stratigraphic approach. *First Break*, 25, December 2007, 49–59. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2007029>.

De Jong, M. G. G., Nio, D. S., Böhm, A. R., Seijmonsbergen, H. C., & De Graaff, L. W. S. 2009. Resolving climate change in the period 15–23 ka in Greenland ice cores: a new application of spectral trend analysis. *Terra Nova*, 21(2), 137-143. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00866.x>.

Deschamps, R., Rohais, S., Hamon, Y., & Gasparrini, M., 2020. Dynamic of a lacustrine sedimentary system during late rifting at the Cretaceous-Palaeocene transition: Example of the Yacoraite Formation, Salta Basin, Argentina. *The Depositional Record*, 6(3), 490-523. <https://doi.org/10.1002/dep2.116>.

Dyer, B., Maloof, A. C., Purkis, S. J., & Harris, P. M., 2018. Quantifying the relationship between water depth and carbonate facies. *Sedimentary Geology*, 373, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.05.011>.

Ehrenberg, S. N., & Svana, T. A., 2001. Use of spectral gamma-ray signature to interpret stratigraphic surfaces in carbonate strata: An example from the Finnmark Carbonate Platform (Carboniferous-Permian), Barents Sea. *Brazilian Journal of Geology*, 31(2), 295-308. <https://doi.org/10.1306/8626C7C1-173B-11D7-8645000102C1865D>.

Evans, M. W., Snyder, S. W., & Hine, A. C., 1994. High-resolution seismic expression of karst evolution within the Upper Floridan aquifer system; Crooked Lake, Polk County, Florida. *Journal of Sedimentary Research*, 64(2b), 232-244. SEPM Society for Sedimentary Geology. <https://doi.org/10.1306/D4267F9B-2B26-11D7-8648000102C1865D>.

Flügel, E., 2010. *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application*. Second Edition, Springer, 984 pp.

Fragoso, D.G.C., de Melo, A.H., Gonçalves, L.A., Bunevich, R.B., Araujo, J.A.M., da Costa, T.C., Pedrosa, C.A., Scherer, C.M.S., 2023. High-resolution sequence stratigraphy applied to reservoir characterization of the Brazilian Cretaceous pre-salt section, Campos Basin: Guidelines for geological modeling and reservoir management. *Brazilian Journal of Geology*, 51, e2023181. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202320210181>.

Fragoso, D.G.C., Gabaglia, G.P.R., Magalhães, A.J.C., & Scherer, C.M.S., 2021. Cyclicity and hierarchy in sequence stratigraphy: an integrated approach. *Brazilian Journal of Geology*, 51. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202120210009>.

Geyman, E. C., Maloof, A. C., & Dyer, B., 2021. How is sea level change encoded in carbonate stratigraphy?. *Earth and Planetary Science Letters*, 560, 116790. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116790>.

Ghil, M., Allen, M. R., Dettinger, M. D., Ide, K., Kondrashov, D., Mann, M. E., Robertson, A. W., Saunders, A., Tian, Y., Varadi, F., & Yiou, P., 2002. Advanced spectral methods for climatic time series. *Reviews of Geophysics*, 40(1), 3-1-3-41. <https://doi.org/10.1029/2000RG000092>.

Gianni, G. M., Navarrete, C. G., & Folguera, A., 2015. Synorogenic foreland rifts and transtensional basins: A review of Andean imprints on the evolution of the San Jorge Gulf, Salta Group and Taubaté Basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 64, 288-306. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.08.004>.

Goldhammer, R. K., Dunn, P. A., & Hardie, L. A., 1990. Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing: examples from Alpine Triassic platform carbonates. *Geological Society of America Bulletin*, 102(5), 535-562. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1990\)102%3C0535:DCCSLC%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1990)102%3C0535:DCCSLC%3E2.3.CO;2).

Goldhammer, R. K., Lehmann, P. J., Dunn, P. A., 1993. The origin of high-frequency platform carbonate cycles and third-order sequences (Lower Ordovician El Paso Gp, west Texas) constraints from outcrop data and stratigraphic modeling. *Journal of Sedimentary Research*. 63(3): 318-359. <https://doi.org/10.1306/D4267AFA-2B26-11D7-8648000102C1865D>.

Goldhammer, R. K., Oswald E. J., Dunn, P. A. 1994. High-Frequency, glacio-eustatic cyclicity in the Middle Pennsylvanian of the Paradox Basin: an evaluation of Milankovitch forcing. In: P. L. De Boer and D. G. Smith (Eds.), *Orbital Forcing and Cyclic Sequences*. Blackwell Scientific Publications, London, pp. 243-283.

Gomes, J.P.B., Bunevich, R.B., Tonietto, S.N., Alves, D.B., Santos, J.F., & Whitaker, F.F., 2020. Climatic signals in lacustrine deposits of the Upper Yacoraite Formation, Western Argentina: evidence from clay minerals, analcime, dolomite and fibrous calcite. *Sedimentology*, 67(5), 2282-2309. <https://doi.org/10.1111/sed.12746>.

Gomez Omil, R.J., Boll, A., 1999. Sistema petrolero de la cuenca cretácica del noroeste argentino. In: Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, 4. Anais. Mar del Plata. vol. 1. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, pp. 101–112.

Harder, A. L. D. P., 2017. Extendendo Modelos Markovianos usando descida gradiente. Master dissertation - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 130 pp.

Herbert, T.D., Fischer, A.G., 1986. Milankovitch climatic origin of mid-Cretaceous black shale rhythms in central Italy. *Nature* 321, 739-743. <https://doi.org/10.1038/321739a0>.

Hernández, R.M., Disalvo, A., Boll, A., Gomez Omil, R. 1999. Estratigrafía secuencial del Grupo Salta, con énfasis en las cuencas de Metán-Alemania, noroeste argentino. En: González Bonorino, G., Omarini, R., Viramonte, J. (Eds.), *Geología del Noroeste Argentino*, 14 Congreso Geológico Argentino, Relatorio vol. 1, 263–283.

Hernández, R.M., Hernández, J.I., Raja Gabaglia, G., Bento Freire, E., Lykawka, R., Terra, G., Borges Rodrigues, E., Dalenz Farjat, A., Ga-llo, L. and Tomezzoli, R.N., 2019. Análisis secuencial de alta frecuencia en el límite Cretácico-Paleógeno del Grupo Salta, Subcuenca de Metán, Noroeste Argentino: estado actual y perspectivas futuras. *Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA*, pp.1046-1079. [Online] <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85089122791&partnerID=40&md5=52c8b99250f05e711d6072966825cd50> (Accessed: 6 Apr 2023).

Hinnov, L. A., Schulz, M., & Yiou, P., 2002. Interhemispheric space–time attributes of the Dansgaard–Oeschger oscillations between 100 and 0 ka. *Quaternary Science Reviews*, 21(10), 1213-1228. Decadal-to-Millennial-Scale Climate Variability. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00140-8](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00140-8).

Huang, N. E., Wu, Z., Long, S. R., Arnold, K. C., Chen, X., & Blank, K., 2009. On instantaneous frequency. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1(2), 177-229. <https://doi.org/10.1142/S1793536909000096>.

Jeong, J., Park, E., Han, W., & Kim, K., 2014. A novel data assimilation methodology for predicting lithology based on sequence labeling algorithms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(10), 7503-7520. <https://doi.org/10.1002/2014JB011279>.

Magalhães, A.J.C., Gabaglia, G.P.R., Fragoso, D.G.C., Bento Freire, E., Lykawka, R., Arregui, C.D., Silveira, M.M.L., Carpio, K.M.T., De Gasperi, A., Pedrinha, S. et al. 2020., High-resolution sequence stratigraphy applied to reservoir zonation and characterisation, and its impact on production performance-shallow marine, fluvial downstream, and lacustrine carbonate settings. *Earth-Science Reviews*, 210, 103325. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103325>.

Magalhães, A. J. C., Fragoso, D. G. C., Gabaglia, G. P. R., Terra, G. J. S., Melo, A. H., Andrade, P. R. O., Guadagnin, F., & Lima-Filho, F. P., 2021. Sequence stratigraphy of clastic and carbonate successions: applications for exploration and production of natural resources. *Brazilian Journal of Geology*, 51(4), 1-34. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202120210014>.

Marquillas, R. A., Del Papa, C., and Sabino, I. F., 2005. Sedimentary aspects and paleoenvironmental evolution of a rift basin: Salta Group (Cretaceous--Paleogene), northwestern Argentina. *International Journal of Earth Sciences*, 94, 94-113. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0443-2>.

Marquillas, R.A., Salfity J.A., Matthews S.J, Matteini M and Dantas E., 2011. U–Pb zircon age of the Yacoraite Formation and its significance to the Cretaceous–Tertiary boundary in the Salta Basin, Argentina. *Cenozoic Geology of the Central Andes of Argentina* 227–246.

Martins-Neto, M. A., & Catuneanu, O., 2010. Rift sequence stratigraphy. *Marine and Petroleum Geology*, 27(1), 247-253. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.08.001>.

Melo, A.H., Magalhães, A.J.C., Menegazzo, M.C., Fragoso, D.G.C., Florencio, C.P. and Lima-Filho, F.P., 2021. High-resolution sequence stratigraphy applied for the improvement of hydrocarbon production and reserves: A case study in Cretaceous fluvial deposits of the Potiguar basin, northeast Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 130, 105124. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105124>.

Montano, D., Gasparini, M., Rohais, S., Albert, R., & Gerdes, A., 2022. Depositional age models in lacustrine systems from zircon and carbonate U-Pb geochronology. *Sedimentology*, 69(6), 2507-2534. <https://doi.org/10.1111/sed.13000>.

Morad, S., Ketzer, J. M., & De Ros, L. F., 2013. Linking diagenesis to sequence stratigraphy: an integrated tool for understanding and predicting reservoir quality distribution. In Morad, S., Ketzer, J. M., & De Ros, L. F. (Eds.), *Linking Diagenesis to Sequence Stratigraphy*. Wiley Online Library, pp. 1-36. <https://doi.org/10.1002/9781118485347.ch1.0>

Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., & Glard, D., 1982. Wave propagation and sampling theory—Part I: Complex signal and scattering in multilayered media. *Geophysics*, 47(2), 203-221. <https://doi.org/10.1190/1.1441328>.

Moss, S., & Tucker, M. E., 1995. Diagenesis of Barremian-Aptian platform carbonates (the Urgonian Limestone Formation of SE France): near-surface and shallow-burial diagenesis. *Sedimentology*, 42(6), 853-874. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1995.tb00414.x>.

Muniz, M. C., & Bosence, D. W. J., 2015. Pre-salt microbialites from the Campos Basin (offshore Brazil): image log facies, facies model and cyclicity in lacustrine carbonates. *Geological Society, London, Special Publications*, 418(1), 221-242. <https://www.lyellcollection.org/doi/abs/10.1144/SP418.10>.

Mutti, M., Vallati, M., Tomás, S., Galli, C., Bahniuk Rumbelsperger, A. M., Maerz, S., & Coira, B., 2023. Constraining depositional evolution and reservoir compartmentalization in a mixed carbonate-siliciclastic lacustrine system: The Yacoraite formation, Salta Group, NW Argentina. *Marine and Petroleum Geology*, 149, 106049. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.106049>.

Nio, S.D., Brouwer, J., Smith, D., Jonh, M., Bhm, A., 2005. Spectral trend attribute analysis: applications in the stratigraphic analysis of wireline logs. *First Break* 23, 71–75.

Neumann, A. C., And Macintyre, I., 1985. Reef response to sea level rise: keep-up, catch-up or give-up: 5th International Coral Reef Congress Tahiti, Proceedings v.3, p. 105-110.

Pedrinha, S., Gabaglia, G.P.R., Lykawka, R., Brito, D., 2015. Rastreabilidade de sequências de alta resolução ao longo da Sub-bacia de Méta n-Alemania (Maastrichtiano da Bacia de Salta-Argentina): anatomia estratigráfica detalhada de um sistema lacustre sob influência de processos microbiais. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 23(1-2).

Prokoph, A., Agtemberg, F.P., 2000. Wavelet analysis off well-logging data from oil source rock, Egret Member, Offshore eastern Canada, *AAPG Bulletin*, vol. 84, no. 10, 1617 – 1632. <https://doi.org/10.1306/8626BF15-173B-11D7-8645000102C1865D>.

Rabiner, L., & Juang, B., 1986. An introduction to hidden Markov models. *ieee assp magazine*, 3(1), 4-16. <https://doi.org/10.1109/MASSP.1986.1165342>.

Ramos, V.A., 1999. Rasgos estructurales del territorio argentino. In R. Caminos (Ed.), *Geología de la República Argentina* (pp. 19-29). *Anales* (Vol. 29, No. 19). Buenos Aires: Instituto de Geología y Recursos Minerales.

Roemers-Oliveira, E., 2014. Contexto deposicional da Sequência Balbuena III (Maastrichtiano/Daniano) da Formação Yacoraite na Sub-bacia Metán-Alemania, na região de Salta, Argentina. *Masters Dissertation*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 181 pp.

Roemers-Oliveira, E., Fernandes, L. A., Freire, E. B., & Simões, L. S. A., 2015. Microbial filaments in stromatolites and laminites of Balbuena III Sequence (Maastrichtian/Danian) of Yacoraite Formation in Metán-Alemania Sub-basin, Salta region, Argentina, and its palaeoenvironmental significance. *Brazilian Journal of Geology*, 45(3), 399-413. <https://doi.org/10.1590/2317-488920150030255>.

Rohais, S., Hamon, Y., Deschamps, R., Beaumont, V., Gasparrini, M., Pillot, D., & Romero-Sarmiento, M., 2019. Patterns of organic carbon enrichment in a lacustrine system across the K-T boundary: Insight from a multi-proxy analysis of the Yacoraite Formation, Salta rift basin, Argentina. *International Journal of Coal Geology*, 210, 103208. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.05.015>.

Salfity, J.A.; Marquillas, R.A., 1994. Tectonic and Sedimentary Evolution of the Cretaceous-Eocene Salta Group Basin, Argentina. In: Salfity, J.A. (Ed.) *Cretaceous Tectonics of the Andes*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, p. 266-315. [https://doi.org/10.1007/978-3-322-85472-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-322-85472-8_6).

Schlager, W., 2005. Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy. SEPM Society for Sedimentary Geology, Oklahoma, 200 pp.

Schwarzacher, W., 1993. Cyclostratigraphy and the Milankovitch Theory. Elsevier: *Developments in Sedimentology*, 52, London, 225 pp.

Steinhauff, D.M., Walker, K.R., 1995. Recognizing exposure, drowning, and "missed beats"; platform-interior to platform-margin sequence stratigraphy of Middle Ordovician limestones, East Tennessee. *Journal of Sedimentary Research* 65, 183-207. <https://doi.org/10.1306/D4268211-2B26-11D7-8648000102C1865D>.

Tian, M., Omre, H., & Xu, H. 2021. Inversion of well logs into lithology classes accounting for spatial dependencies by using hidden markov models and recurrent neural networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107598.: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107598>.

Tucker, M. E., 1993. Carbonate diagenesis and sequence stratigraphy. In Wright, P. V. (Ed.); *Sedimentology Review* first edition, pp. 51-72.

Turner B.R., Armstrong H.A., Wilson C.R., Makhlof I.M., 2012. High frequency eustatic sea-level changes during the Middle to early Late Ordovician of southern Jordan: Indirect evidence for a Darriwilian Ice Age in Gondwana. *Sedimentary Geology*, 251-252:34-48. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.01.0>.

Vautard, R., Ghil, M., 1989. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena* 35 (3), 395–424. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(89\)90077-8](https://doi.org/10.1016/0167-2789(89)90077-8).

Viterbi, A., 1967. Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 13, no. 2, pp. 260-269, <https://doi.org/10.1109/TIT.1967.1054010>.

Vega, N. R. 2003. Reservoir characterization using wavelet transforms. PhD thesis, Texas A&M University, 128 pp.

Wang, R., Xie, J., Ran, A., Wang, S., Wang, J., Hu, X., Cai, W., & Zhou, Y., 2022. Comparison of INPEFA technology and wavelet transform in sequence stratigraphic division of mixed reservoir: A case study of lower Es3 of KL oilfield in Laizhouwan Sag. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(12), 3213-3225. <https://doi.org/10.1007/s13202-022-01523-z>.

Wei Li.; Zhang, J.; Xie, J.; Xia, Y.; He, Y., 2023. Application of the Wavelet Transform and INPEFA in Sequence Stratigraphy. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07367>.

Yuan, Y., Wang, L., & Xie, R. 2018. Application of INPEFA technology to sequence stratigraphy of the third member of Funing Formation, Nanhua block, Qintong Sag, North Jiangsu Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(6), 871-876. <https://doi.org/10.11781/sysydz201806871>.

Zecchin, M. and Catuneanu, O., 2013. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves I: units and bounding surfaces. *Marine and Petroleum Geology*, 39(1), 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.08.015>.

## 6. CONCLUSÕES

A aplicação de métodos matemáticos para decomposição espectral de sinais geológicos se apresentou como uma ferramenta com potencial para a análise estratigráfica multi-frequências. Foi visto que os métodos aplicados possuem maior ou menor afinidade com determinada hierarquia estratigráfica, sendo muito difícil que apenas um método gere bons *outputs* para construir modelos multi-hierárquicos. Nesse sentido, vale ressaltar a importância e a aplicabilidade da ferramenta desenvolvida no *Jupyter Notebook*, que possibilita a seleção de qualquer método e gera *outputs* rápidos e visualmente atrativos. Dessa forma, o geólogo operador tem um grande leque de opções para avaliar o método mais aplicável para o caso que estiver trabalhando.

A *Continuous Wavelets Transform* se mostrou promissora para definir ciclos de alta frequência. Foi visto uma excelente correlação entre seus picos positivos e negativos de mais alta frequência com a ocorrência de fácies siliciclásticas e carbonáticas, que correspondem a ciclos transgressivos e regressivos, respectivamente. Bento-Freire (2012) interpreta que essas fácies ocorrem em resposta aos condicionantes climáticos, onde momentos áridos favorecem o desenvolvimento de fácies carbonáticas, e em períodos úmidos os sedimentos siliciclásticos são melhor preservados.

Esse método também ressaltou diferentes padrões de sinais dominando na seção inferior e na superior, com a primeira exibindo oscilações de baixa amplitude variando em torno do zero, enquanto que a segunda preserva oscilações com grandes amplitudes. Essas assinaturas corroboram o modelo teórico proposto por Bento-Freire (2012), o qual propõe que uma sobreposição entre curvas de diferentes frequências seria o responsável por gerar ciclos sedimentares com diferentes anatomias características para a seção inferior e superior. Quando os sinais de diferentes frequências foram analisados, foi visto que realmente existe uma modulação entre eles. Na seção basal o sinal de mais baixa frequência imprime um grande *trend*, aqui interpretado como um equivalente à aridez de longa duração descrita em Bento-Freire (2012), e que estaria afetando o potencial de preservação dos processos de alta frequência. Desta forma, a aridez dominante imprime uma progressiva diminuição do nível de base, desfavorecendo a preservação dos sedimentos finos e potencializando a preservação dos carbonatos, gerando um empilhamento mais homogêneo. Em

termo de sinal, o empilhamento homogêneo é refletido em uma assinatura também homogênea, dominada por baixas amplitudes. Já na seção superior, a curva de baixa frequência mostra uma tendência oposta àquela da seção basal, interpretada aqui como equivalente ao momento dominado por uma umidade de longa duração descrita em Bento-Freire (2012). Nesse cenário, a preservação das grandes amplitudes na curva de alta frequência pode ser em decorrência de que elas comumente estão em fase em relação à curva de baixa frequência. Dessa forma, criam-se as condições ideais para a preservação de ciclos formados pelos componentes transgressivos e regressivos.

Os métodos DTEL e INDTEL apresentaram-se como potenciais ferramentas para a interpretação de ciclos de média frequência. A comparação entre os ciclos interpretados a partir dos referidos métodos, com interpretações realizadas pelos métodos mais tradicionais (Magalhães *et al.* 2020; Fragoso 2021), mostraram uma boa correspondência entre os ciclos interpretados por ambos procedimentos. Esse método também mostrou grande potencial para fins de correlação estratigráfica, uma vez que os *trends* gerados exibiram um padrão uniforme em todos os perfis trabalhados.

O *Hidden-Markov Model* mostrou resultados compatíveis com a hierarquia de alta frequência, exibindo uma assinatura muito parecida com àquela encontrada pelo método CWT. No entanto, algumas transições geradas pelo HMM aparentam algumas inconsistências, principalmente quando assinalam ciclos transgressivos para transições de fácies que não representam tais eventos. Quando essas incoerências são analisadas em conjunto com os demais métodos, foi visto que há uma possível relação dos locais interpretados como ciclos transgressivos com a ocorrência de *missed-beats*, que seria a indicação de um ciclo que não foi preservado. Dessa forma, esse tipo de análise pode ser útil para fins de geologia de reservatório, uma vez que os *missed-beats* frequentemente têm relação com geração de porosidade secundária.

Por fim, este estudo cumpriu o objetivo de agilizar o processo de interpretação geológica através de uma abordagem pragmática, baseada na análise de sinais para interpretação estratigráfica. Os resultados demonstram sua eficácia na construção de modelos estratigráficos hierarquicamente consistentes, validando-a como uma alternativa aos métodos interpretativos convencionais. Espera-se que os parâmetros aqui apresentados possam ser utilizados para fins de detecção automatizada de ciclos

sedimentares e a construção de modelos estratigráficos multi-hierarquicos, dinamizando cada vez mais o processo de interpretação geológica.

## REFERÊNCIAS

- Abdolahi, A., Bahrehvar, M., Chehrazi, A., Kadkhodaie, A., & Wood, D. A., 2023. Integration of geoscience data to delineate quality of the Asmari reservoir, Iranian part of the Persian Gulf basin. *Marine and Petroleum Geology* 152, 106229. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106229>.
- Aceñolaza, F.G., 1968. Geología estratigráfica de la región de la sierra de Cajas, Dpto. Humahuaca (provincia de Jujuy). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Buenos Aires, 23(3), 207-222.
- Adams, J.A.S. & Weaver, C.E., 1958. Thorium-to-uranium ratios as indicators of sedimentary processes: Example of concept of geochemical facies. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 42(2), 387-430. <https://doi.org/10.1306/0BDA5A89-16BD-11D7-8645000102C1865D>.
- Aigner, T., Schauer, M., Junghans, W.-D., Reinhardt, L., 1995. Outcrop gamma-ray logging and its applications: examples from the German Triassic. *Sedimentary Geology* 100(1), 47-61. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(95\)00102-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(95)00102-6).
- Alonso, R.N., 1980. Icnitas de dinosaurios (Ornithopoda, Hadrosauridae) en el Cretácico superior del Norte de Argentina. *Acta Geol Lilloana*, 15(2), 55–63.
- Alonso R.N., Marquillas R.A., 1986. Nueva localidad con huellas de dinosaurios y primer hallazgo de huellas de aves en la Formación Yacoraite (Maastrichtiano) del Norte Argentino. *Actas 4th Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía*, 2, 33–41.
- Artagão, V.M., 2018. Análise estratigráfica de alta resolução aplicada aos depósitos da Formação Barra Velha, Bacia de Santos: identificação, correlação e mecanismos de controle de ciclos sedimentares. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 170 pp.
- Bachman, G., Narici, L., & Beckenstein, E., 2000. *Fourier and wavelet analysis*, Springer, New York, 507 pp.
- Behdad, A. 2019. A step toward the practical stratigraphic automatic correlation of well logs using continuous wavelet transform and dynamic time warping technique. *Journal of Applied Geophysics* 167, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.05.007>.
- Benedetto J.L., Sanchez, T., 1972. El hallazgo de peces Pycnodontiformes (Holostei) en la Formación Yacoraite (Cretácico Superior) en la provincia de Salta. *Ameghiniana - Revista de la Asociación Paleontológica Argentina*, 9(1), 59–71.
- Bento-Freire, E., 2012. Caracterização Estratigráfica em Alta Resolução das Sequências Calcárias de Origem Microbiana do Intervalo Paleocênico da Formação Yacoraite (Sequência Balbuena IV) na Região de Salta - Argentina. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 243 pp.
- Berger, A., 1978. Long-Term Variations of Caloric Insolation Resulting from the Earth's Orbital Elements. *Quaternary Research*, 9, 139-167. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(78\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90064-9).

Black, M., 1932. The Algal Sediments of Andros Island, Bahamas. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 222, 165–192. <http://www.jstor.org/stable/92164>.

Bianucci, H., Acevedo, O., Cerdán, J., 1981. Evolución tectosedimentaria del Grupo Salta en la Subcuenca Lomas de Olmedo (provincias de Salta y Formosa). In: *Actas VIII Congreso Geológico Argentino: San Luis, Argentina, Asociación Geológica Argentina*, pp. 159-172.

Bibliotecas, Python. Principais aplicações das bibliotecas da linguagem Python. Disponível em: <https://python.org>. Acesso em: 13/06/2023.

Bossi, G.E.; Wapler, M., 1988. Edad del Complejo Alto de las Salinas y Formación El Cadillal según el método K-Ar. *Acta Geológica Lilloana*, 10, 141-160.

Bristow, C.S., Williamson, B.J. 1998. Spectral gamma ray logs: core to log calibration, facies analysis and correlation problems in the Southern North Sea. *Geological Society, London, Special Publications* 136(1), 1-7. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.136.01.01>.

Brackebush, L., 1891. Mapa Geológico del Interior de la República Argentina. Escala 1: 1.000. 000, Gotha: Instituto Geográfico de Hellfahrt. Ed. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba.

Bunevich R.B., Borghi L., Raja Gabaglia G.P., Terra G.J.S., Bento Freire E., Lykawka R., Fragoso D.G.C., 2017. Microbialitos da Sequência Balbuena IV (Daniano), Bacia de Salta, Argentina: caracterização de intrabioarquiteturas e de microciclos. *Pesquisas em Geociências*, 44(2), 177-202. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78270>.

Bohacs, K. M., A. R. Carroll, J. E. Neal, P. J. Mankiewicz., 2000, Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated-sequence-stratigraphic-geochemical framework. In: E. H. Gierlowski-Kordesch and K. R. Kelts, (Eds.), *Lake basins through space and time*, AAPG Studies in Geology, 46, pp. 3–34. <https://doi.org/10.1306/St46706C1>.

Burgess. P. M., 2016a. Identifying ideal stratigraphic cycles using a quantitative optimization method; *Geology*; 44(6), 443–446. <https://doi.org/10.1130/G37827.1>.

Burgess. P. M., 2016b. Identifying Ordered Strata: Evidence, Methods, and Meaning. *Journal of Sedimentary Research*; 86(3), 148–167. <https://doi.org/10.2110/jsr.2016.10>.

Carmona, R., Hwang, W.-L., & Torresani, B., 1998. *Practical Time-Frequency Analysis: Gabor and wavelet transforms, with an implementation in S*. First Edition, Academic Press. New Jersey, 490 pp.

Catuneanu O., Abreu V., Bhattacharya J.P., Blum M.D., Dalrymple R.W., Eriksson P.G., Fielding C.R., Fisher W.L., Galloway W.E., Gibling M.R., Giles K.A., Holbrook J.M., Jordan R., Kendall C.G.ST.C., Macurda B., Martinsen O.J., Miall A.D., Neal J.E., Nummedal D., Pomar L., Posamentier H.W., Pratt B.R., Sarg J.F., Shanley K.W., Steel R.J., Strasser A., Tucker M.E., Winker C., 2009. Towards the standardization of

sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 92(1-2):1-33.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.003>.

Catuneanu, O., Bhattacharya J.P., Blum M.D., Dalrymple R.W., Eriksson P.G., Fielding C.R., Fisher W.L., Galloway W.E., Gianolla P., Gibling M.R., Giles K.A., Holbrook J.M., Jordan R., Kendall C.G. ST. C., Macurda B., Martinsen O.J., Miall A.D., Nummedal D., Posamentier H.W., Pratt B.R., Shanley K.W., Steel R.J., Strasser A., Tucker M.E. 2010., Sequence stratigraphy: common ground after three decades of development. *First Break*, 28:21-34.

Catuneanu, O., Galloway, W. E., Kendall, C. G. ST. C., Miall, A. D., Posamentier, H. W., Strasser, A., & Tucker, M. E., 2011. Sequence Stratigraphy: Methodology and Nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy*, 44(3), 173-245.  
<https://doi.org/10.1127/0078-0421/2011/0011>.

Catuneanu, O. 2019a. Model-independent sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 188:312-388. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.09.017>.

Catuneanu, O. 2019b. Scale in sequence stratigraphy. *Marine and Petroleum Geology*, 106:128-159. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.04.026>.

Catuneanu, O., 2022. *Principles of Sequence Stratigraphy*, second edition, Elsevier, Amsterdam, 496 pp.

Ceolin, D., Dos Santos Filho, M. A. B., Terra, G. J. S., Fragoso, D. G. C., Bunevich, R. B., Fauth, G., Hernández, J. I., & Hernández, R. M., 2022. Ostracods from upper Yacoraite Formation (Danian), Salta Basin, Western Argentina: Taxonomy and paleoenvironmental indicators of climatic signals in lacustrine deposits. *Journal of South American Earth Sciences*, 116, 103836.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103836>.

Chandrasekhar, E., Rao, E. V., 2012. Wavelet analysis of geophysical well-log data of Bombay offshore basin, India. *Mathematical Geosciences*, 44, 901--928.  
<https://doi.org/10.1007/s11004-012-9423-4>.

Comínguez, A. H., Ramos, V. A., 1995. Geometry and seismic expression of the Cretaceous Salta rift system, northwestern Argentina. In: Tankard, A. J., Suárez, R., Welsink, H. J. (Eds.), *Petroleum Basin of South America*, AAPG Memoir 62, Massachusetts, pp. 325-340.

Cónsole Gonella, C.A., Cione, A.L., Aceñolaza, F.G., 2009. Registro del teleósteo *Gasteroclupea branisai* em la Formación Yacoraite (Maastrichtiano-Daniano) en el área de Tres Cruces, Jujuy, Argentina. *Tafonomía y correlación estratigráfica. Serie Correlación Geológica*, S. M. de Tucumán/Provincia de Tucumán, 25, 129-138.

Cónsole Gonella, C.A., Griffin, M., Aceñolaza, F.G., 2009. Gastropods Associated with Fossil Traces from Yacoraite Formation (Maastrichtian-Danian), and its Paleoenvironmental Significance, Jujuy, Northwestern Argentina. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 83: 860-867. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2009.00122.x>.

Cristallini, E.; Cominguez, A. H.; Ramos, V. A., 1998. Deep structure of the Metan-Guachipas region: Tectonic inversion in northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 10(5-6), 403-421. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(97\)00026-6](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(97)00026-6).

Daubechies, I., 1992. Ten lectures on wavelets. Society for Industrial and Applied Mathematics, 357 pp. <https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/1.9781611970104>.

Decelles, P. G., Carrapa, B., Horton, B. K., & Gehrels, G. E. (2011). Cenozoic foreland basin system in the central Andes of northwestern Argentina: Implications for Andean geodynamics and modes of deformation. *Tectonics*, 30(6), 1-30. <https://doi.org/10.1029/2011TC002948>.

Del Papa, C. E., Salfity, J. A., 1999. Non-marine paleogene sequences, Salta Group, northwest Argentina. *Acta Geológica Hispánica*, 34(2-3), 105-122.

De Jong, M., Smith, D., Nio, S.D. and Hardy, N., 2006. Subsurface correlation of the Triassic of the UK southern Central Graben: new look at an old problem. *First Break*, 24, 103–109. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.24.1096.26993>.

De Jong, M. G. G., Nio, D. S., Böhm, A. R., Seijmonsbergen, H. C., & DE Graaff, L. W. S., 2009. Resolving climate change in the period 15–23 ka in Greenland ice cores: a new application of spectral trend analysis. *Terra Nova*, 21(2), 137-143. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00866.x>.

Deschamps, R., Rohais, S., Hamon, Y., & Gasparrini, M., 2020. Dynamic of a lacustrine sedimentary system during late rifting at the Cretaceous-Palaeocene transition: Example of the Yacoraite Formation, Salta Basin, Argentina. *The Depositional Record*, 6(3), 490-523. <https://doi.org/10.1002/dep2.116>.

Dunn, C. E., 1974. Identification of sedimentary cycles through Fourier analysis of geochemical data. *Brazilian Journal of Geology*, 4(2), 217-232. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(74\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0009-2541(74)90021-7).

Dunham, R. J., 1962. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture. In: William E. Ham (Ed.) *Classification of Carbonate Rocks—A Symposium*. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, pp. 108-121. <https://doi.org/10.1306/M1357>.

Dupraz, C., Reid, R. P., Braissant, O., Decho, A. W., Norman, R. S., & VISSCHER, P. T., 2009. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews*, 96(3), 141-162. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.005>.

Dyer, B., Maloof, A. C., Purkis, S. J., & Harris, P. M., 2018. Quantifying the relationship between water depth and carbonate facies. *Sedimentary Geology*, 373, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.05.011>.

Ehrenberg, S. N., & Svana, T. A., 2001. Use of spectral gamma-ray signature to interpret stratigraphic surfaces in carbonate strata: An example from the Finnmark Carbonate Platform (Carboniferous-Permian), Barents Sea. *Brazilian Journal of Geology*, 31(2), 295-308. <https://doi.org/10.1306/8626C7C1-173B-11D7-8645000102C1865D>.

Embry, A. F.; Klován, J. E., 1971. A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, NWT. *Bulletin of Canadian petroleum geology*, v. 19, n. 4, p. 730-781.

Embry A.F., Johannessen E.P., 1992. T–R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada. In: Vorren T.O., Bergsager E., Dahl-Stamnes O.A., Holter E., Johansen B., Lie E., Lund T.B. (Eds.). *Arctic Geology and Petroleum Potential*, Special Publication 2, Norwegian Petroleum Society, pp. 121-146.

Ferreira, D. J. A., Dutra, H. P. L., Castro, T. M., & Lupinacci, W. M., 2021. Geological process modeling and geostatistics for facies reconstruction of presalt carbonates. *Marine and Petroleum Geology*, 124, 104828. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104828>.

Folk, R.L., 1962 Spectral subdivision of limestones types. In: William E. Ham (Ed.) *Classification of Carbonate Rocks—A Symposium*. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, pp. 62-85. <https://doi.org/10.1306/M1357>.

Fragoso, D.G.C., Gabaglia, G.P.R., Magalhães, A.J.C., & Scherer, C.M.S., 2021. Cyclicity and hierarchy in sequence stratigraphy: an integrated approach. *Brazilian Journal of Geology*, 51(2), e20200106. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202120200106>.

Fragoso, D.G.C., De Melo, A.H., Gonçalves, L.A., Bunevich, R.B., Araujo, J.A.M., Da Costa, T.C., Pedrosa, C.A., Scherer, C.M.S., 2023. High-resolution sequence stratigraphy applied to reservoir characterization of the Brazilian Cretaceous pre-salt section, Campos Basin: Guidelines for geological modeling and reservoir management. *Marine and Petroleum Geology*, 151, 106203. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202320210181>.

Galliski, M.A., Viramonte, J.G., 1988. The Cretaceous paleorift in North-western Argentina: A petrologic approach. *Journal of South American Earth Sciences*, 1(4), 329-342. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(88\)90021-1](https://doi.org/10.1016/0895-9811(88)90021-1).

Gasparini, Z. B. de, & Buffetaut, E., 1980. *Dolichochoampsia minima*, n. g. n. sp., a representative of a new family of eusuchian crocodiles from the Late Cretaceous of northern Argentina. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Monatshefte*, 1980(5), 257-271. <http://dx.doi.org/10.1127/njgpm/1980/1980/257>.

GAWTHORPE, R. L., LEEDER, M. R., 2000. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins. *Basin Research*, 12(3-4), 195-218. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2000.00121.x>.

Geyman, E. C., Maloof, A. C., & Dyer, B., 2021. How is sea level change encoded in carbonate stratigraphy?. *Earth and Planetary Science Letters*, 560, 116790. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116790>.

Ghil, M., Allen, M. R., Dettinger, M. D., Ide, K., Kondrashov, D., Mann, M. E., Robertson, A. W., Saunders, A., TIAN, Y., Varadi, F., & Yiou, P., 2002. Advanced spectral methods for climatic time series. *Reviews of Geophysics*, 40(1), 3-1-3-41. <https://doi.org/10.1029/2000RG000092>.

Gianni, G. M., Navarrete, C. G., & Folguera, A., 2015. Synorogenic foreland rifts and transtensional basins: A review of Andean imprints on the evolution of the San Jorge Gulf, Salta Group and Taubaté Basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 64, 288-306. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.08.004>.

Gomes, J.P.B., Bunevich, R.B., Tonietto, S.N., Alves, D.B., Santos, J.F., & Whitaker, F.F., 2020. Climatic signals in lacustrine deposits of the Upper Yacoraite Formation, Western Argentina: evidence from clay minerals, analcime, dolomite and fibrous calcite. *Sedimentology*, 67(5), 2282-2309. <https://doi.org/10.1111/sed.12746>.

Gómez Omil, R. J., Boll, A., Hernández, R. M., 1989. Cuenca cretácico-terciaria del Noroeste argentino (Grupo Salta). *Cuencas Sedimentarias Argentinas*. Universidad Nacional de Tucumán, Serie de Correlación Geológica, 6, 43-64.

Gómez Omil, R.J., Boll, A., 1999. Sistema petrolero de la cuenca cretácica del noroeste argentino. In: CONGRESO DE EXPLORACIÓN Y DESARROLLO DE HIDROCARBUROS, 4°. Mar del Plata: Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, 1, 101-112.

Gómez Omil, R.J.; Boll, A., 2005. Cuenca Cretácica del Noroeste Argentino. In: CHEBLI, G.A. et al. (Eds.) *Frontera Exploratoria da la Argentina: CONGRESSO DE EXPLORACIÓN Y DESARROLLO DE HIDROCARBUROS – AMPLIANDO LAS FRONTERAS*. 6°. Mar del Plata: IAPG, pp. 63-73.

Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D., & Ogg, G. M., 2020. *Geologic Time Scale 2020*, Elsevier, Amsterdam, 1367 pp. <https://doi.org/10.1016/C2020-1-02369-3>.

Grier, M.E., Salfity, J.A., Allmendinger, R.W., 1991. Andean reactivation of the Cretaceous Salta rift, northwestern Argentina. *Journal of South America Earth Sciences*, 4(4), 351-372. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(91\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0895-9811(91)90007-8).

Herbert, T.D., Fischer, A.G., 1986. Milankovitch climatic origin of mid-Cretaceous black shale rhythms in central Italy. *Nature* 321, 739-743. <https://doi.org/10.1038/321739a0>.

Hernández, R. M., Disalvo, A., Boll, A., Gómez Omil, R., & Galli, C., 1999. Estratigrafía secuencial del Grupo Salta, con énfasis en las subcuencas de Metan-Alemania, noroeste Argentino. In 14° Congreso Geológico Argentino, Relatório, Geología del Noroeste Argentino, pp. 263-283.

Hinnov, L. A., Schulz, M., & Yiou, P., 2002. Interhemispheric space–time attributes of the Dansgaard–Oeschger oscillations between 100 and 0 ka. *Quaternary Science Reviews*, 21(10), 1213-1228. Decadal-to-Millennial-Scale Climate Variability. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(01\)00140-8](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(01)00140-8).

Huang, N. E., Wu, Z., Long, S. R., Arnold, K. C., Chen, X., & Blank, K., 2009. On instantaneous frequency. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1(2), 177-229. <https://doi.org/10.1142/S1793536909000096>.

Hunt, D., Tucker, M.E., 1992. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall. *Sedimentary Geology*, 81(1-2), 1-9. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(92\)90052-S](https://doi.org/10.1016/0037-0738(92)90052-S).

Hyland, E., Murphy, B., Varela, P., Marks, K., Colwell, L., Tori, F., Monechi, S., Cleaveland, L., Brinkhuis, H., Van Mourik, C. A., Coccioni, R., Bice, D., Montanari, A., 2009. Integrated stratigraphic and astrochronologic calibration of the Eocene-Oligocene transition in the Monte Cagnero section (northeastern Apennines, Italy): A potential parastratotype for the Massignano global stratotype section and point (GSSP). In *The Late Eocene Earth—Hothouse, Icehouse, and Impacts*. Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2009.2452\(19\)](https://doi.org/10.1130/2009.2452(19)).

Jahnert, R. J., & Collins, L. B., 2012. Characteristics, distribution and morphogenesis of subtidal microbial systems in Shark Bay, Australia. *Marine Geology*, 303-306, 115-136. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.02.009>.

Jeong, J., Park, E., Han, W., & Kim, K., 2014. A novel data assimilation methodology for predicting lithology based on sequence labeling algorithms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(10), 7503-7520. <https://doi.org/10.1002/2014JB011279>.

Johnson J.G., Murphy M.A., 1984. Time-rock model for Siluro-Devonian continental shelf, western United States. *Geological Society of America Bulletin*, 95(11):1349-1359. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95%3C1349:TMFSCS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95%3C1349:TMFSCS%3E2.0.CO;2).

Keidel, J., 1921. Sobre la distribución de los depósitos glaciares del Pérmico conocidos en la Argentina: y su significación para la estratigrafía de la serie de Gondwana y la paleogeografía del hemisferio austral. *Boletim da Academia Nacional de Ciencias, Córdoba*, 1(25) 239-368.

Leandro, C. G., Savian, J. F., Kochhann, M. V. L., Franco, D. R., Coccioni, R., Frontalini, F., Gardin, S., Jovane, L., Figueiredo, M., Tedeschi, L. R., Janikian, L., Almeida, R. P., & Trindade, R. I. F., 2022. Astronomical tuning of the Aptian stage and its implications for age recalibrations and paleoclimatic events. *Brazilian Journal of Geology*, 52(3), e20220126. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30075-3>.

Magalhães, A.J.C., Gabaglia, G.P.R., Fragoso, D.G.C., Bento Freire, E., Lykawka, R., Arregui, C.D., Silveira, M.M.L., Carpio, K.M.T., DE Gasperi, A., Pedrinha, S. et al. 2020. High-resolution sequence stratigraphy applied to reservoir zonation and characterisation, and its impact on production performance-shallow marine, fluvial downstream, and lacustrine carbonate settings. *Earth-Science Reviews*, 210, 103325. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103325>.

Magalhães, A. J. C., Fragoso, D. G. C., Gabaglia, G. P. R., Terra, G. J. S., Melo, A. H., Andrade, P. R. O., Guadagnin, F., & Lima-Filho, F. P., 2021. Sequence stratigraphy of clastic and carbonate successions: applications for exploration and production of natural resources. *Brazilian Journal of Geology*, 51(4), 1-34. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202120210014>.

Markov, A.A. Primer statisticheskogo issledovaniya nad tekstom “Evgeniya Onegina”, illyustriruyuschij svyaz’ ispytanij v cep’, *Izvestija Akademii nauk*, VI seriya 7 (93), p. 153–162, 1913.

Marquillas, R., A., Salfity, J., A., 1988. Tectonic framework and correlations of the cretaceous-ecocene salta group, Argentina. In: Reitner, J., Trauth, M., H., Stuwe, K., Yuen, D., A., (Eds.), *Lecture Notes in Earth Sciences*, Springer, London, pp. 119-136.

Marquillas, R. A., Del Papa, C., AND Sabino, I. F., 2005. Sedimentary aspects and paleoenvironmental evolution of a rift basin: Salta Group (Cretaceous--Paleogene), northwestern Argentina. *International Journal of Earth Sciences*, 94, 94-113. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0443-2>.

Marquillas, R., Sabino, I., Sial, A. N., Del Papa, C., Ferreira, V., & Matthews, S., 2007. Carbon and oxygen isotopes of Maastrichtian–Danian shallow marine carbonates: Yacoraite Formation, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 23(4), 304-320. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.02.009>.

Marquillas, R., A., Salfity, J., A., Stephen, J., Massimo, M., Dantas, E., 2011 U–Pb zircon age of the Yacoraite Formation and its significance to the Cretaceous–Tertiary boundary in the Salta Basin, Argentina. In: Salfity & Marquillas (Eds.), *Cenozoic Geology of the Central Andes of Argentina*, SCS Publisher, 227-246 pp.

Martinez, M., Aguirre-Urreta, B., Dera, G., Lescano, M., Omarini, J., Tunik, M., O'dogherty, L., Aguado, R., Company, M., & Bodin, S., 2023. Synchrony of carbon cycle fluctuations, volcanism and orbital forcing during the Early Cretaceous. *Earth-Science Reviews*, 239, 104356. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104356>.

Matos, R. M. D., Krueger, A., Norton, I., & Casey, K., 2021. The fundamental role of the Borborema and Benin–Nigeria provinces of NE Brazil and NW Africa during the development of the South Atlantic Cretaceous Rift system. *Marine and Petroleum Geology*, 127, 104872. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104872>.

Melani, L., H., Honório, B., C., Z., Correia, U., M., C., Vidal., A., C., 2020. The use of variational mode decomposition in assisting sedimentary cyclicity analysis: A case study from an Albian carbonate reservoir, Campos Basin, southeast Brazil. *Geophysics*, 85(3), B77-B86. <https://doi.org/10.1190/GEO2019-0447.1>.

Melo, A.H., Magalhães, A.J.C., Menegazzo, M.C., Fragoso, D.G.C., Florencio, C.P. and Lima-Filho, F.P., 2021. High-resolution sequence stratigraphy applied for the improvement of hydrocarbon production and reserves: A case study in Cretaceous fluvial deposits of the Potiguar basin, northeast Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 130, 105124. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105124>.

Méndez, I.; Viviers, M. C., 1973. Estudio micropaleontológico de sedimentitas de la Formación Yacoraite (provincias de Salta y Jujuy). In: *Anais del 5º CONGRESO GEOLÓGICO ARGENTINO*, Córdoba.: Asociación Geológica Argentina, 3, 467-470.

Mitchum, R. M., Vail, P. R., Thompson, S., 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 2: The Depositional Sequence as a Basic Unit for Stratigraphic Analysis. In: C. E. Payton (Ed.), *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration*, AAPG Memoir 26, pp. 53-62.

Montano, D., Gasparrini, M., Rohais, S., Albert, R., & Gerdes, A., 2022. Depositional age models in lacustrine systems from zircon and carbonate U-Pb geochronology. *Sedimentology*, 69(6), 2507-2534. <https://doi.org/10.1111/sed.13000>.

Moreno, J.A., 1970. Estratigrafía y paleogeografía del Cretácico superior en la cuenca del noroeste argentino, con especial mención de los Subgrupos Balbuena y Santa Bárbara. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, BuenosAires, 24(1), 9-44.

Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., & Glard, D., 1982. Wave propagation and sampling theory—Part I: Complex signal and scattering in multilayered media. *Geophysics*, 47(2), 203-221. <https://doi.org/10.1190/1.1441328>.

Moroni, A.M., 1982. Correlación palinológica en las Formaciones Olmedo y Yacoraite. Cuenca del Noroeste Argentino. III Congreso Geología Chile, 340–349.

Muniz, M. C., & Bosence, D. W. J., 2015. Pre-salt microbialites from the Campos Basin (offshore Brazil): image log facies, facies model and cyclicity in lacustrine carbonates. *Geological Society, London, Special Publications*, 418(1), 221-242. <https://www.lyellcollection.org/doi/abs/10.1144/SP418.10>.

Musacchio, E. A., 1972. Charophytas de la Formación Yacoraite en Tres Cruces y Yavi Chico, Jujuy, Argentina. *Revista de la Asociación Paleontologica Argentina*, 9, 223-237.

Mutti, M., Vallati, M., Tomás, S., Galli, C., Bahniuk Rumbelsperger, A. M., Maerz, S., & Coira, B., 2023. Constraining depositional evolution and reservoir compartmentalization in a mixed carbonate-siliciclastic lacustrine system: The Yacoraite formation, Salta Group, NW Argentina. *Marine and Petroleum Geology*, 149, 106049. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.106049>.

Nio, S.D., Brouwer, J., Smith, D., Jonh, M., Buhm, A., 2005. Spectral trend attribute analysis: applications in the stratigraphic analysis of wireline logs. *First Break* 23, 71–75.

Pandey, Y. N., Rastogi, A., Kainkaryam, S., Bhattacharya, S., & Saputelli, L., 2020. *Machine Learning in the Oil and Gas Industry: Including Geosciences, Reservoir Engineering, and Production Engineering with Python*. New York, NY, USA: Apress, 315 pp.

Park, J. Craig R. Lindberg, David J. T., 1987. Multiple-taper spectral analysis of terrestrial free oscillations: part I, *Geophysical Journal International*, Volume 91, Issue 3, December, p. 755–794, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1987.tb01668.x>.

Paula Faria, L. D., A. Tadeu Dos Reis., O. Gomes De Souza., 2017. Three-dimensional stratigraphic-sedimentological forward modeling of an Aptian carbonate reservoir deposited during the sag stage in the Santos basin, Brazil: *Marine and Petroleum Geology*, v. 88, p. 676–695. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.09.013>.

Payton, C. E., 1977. *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration*, AAPG Memoir 26, Tulsa, 516 pp.

Pedrinha, S., 2014. Análise estratigráfica em depósitos lacustres Maastrichianos da Formação Yacoraite (Bacia de Salta-Argentina): definição e rastreabilidade de sequências de alta resolução. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 149 pp.

Posamentier H.W., Jervey M.T., Vail P.R. 1988. Eustatic controls on clastic deposition I – conceptual framework. In: 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, Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 42, pp. 110-124.

Prokoph, A., Agtemberg, F. P., 2000. Wavelet analysis of well-logging data from oil source rock, Egret Member, Offshore eastern Canada, AAPG Bulletin, vol. 84, no. 10, 1617 – 1632. <https://doi.org/10.1306/8626BF15-173B-11D7-8645000102C1865D>.

Prosser, S., 1993. Rift-related linked depositional systems and their seismic expression. Geological Society, London, Special Publications, 71(1), 35-66. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1993.071.01.03>.

Protazio M., 2005. Análise Wavelet Aplicada a Sinais Geofísicos. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 151 pp.

Quattrocchio, M., 2006. Palynology and palaeocommunities of the Paleogene of Argentina. Sociedade Brasileira de Paleontologia. Revista Brasileira de Paleontologia, 9(1), 101-108. <https://dx.doi.org/10.4072/rbp.2006.1.11>.

Ramos, V. A., 1988. Time constraints for the uplift of the Sierras de Toro Negro, Umango, and Espinal, Western Sierras Pampeanas, Argentina. In: Geological Society of America. Abstract with Programs, Denver, 20(7), pp. 61.

Ramos, V., 1999. Rasgos estructurales del territorio argentino. Geología Argentina, 29(24), 15-75.

Reyes, F. C., 1972. Correlaciones en el Cretácico de la cuenca Andina de Bolivia, Perú y Chile. Revista técnica YPF, 1(2-3), 101-144.

Reyes, F. C., Salfity, J. A., 1973. Consideraciones sobre la estratigrafía del Cretácico (Subgrupo Pirgua) del noroeste argentino. In: V Congreso Geológico Argentino. Buenos Aires, Argentina: Asociación Geológica Argentina, Actas III, pp. 355-385.

Riding, R., 1991. Classification of microbial carbonates. In: RIDING, R., (Ed.). Calcareous algae and stromatolites. Berlin: Springer, pp. 21–51.

Roemers, O., E., 2014. Contexto deposicional da Sequência Balbuena III (Maastrichtiano/Daniano) da Formação Yacoraite na Sub-bacia Metán-Alemania, na região de Salta, Argentina. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 181 pp.

Rohais, S., Hamon, Y., Deschamps, R., Beaumont, V., Gasparrini, M., Pillot, D., & Romero-Sarmiento, M., 2019. Patterns of organic carbon enrichment in a lacustrine system across the K-T boundary: Insight from a multi-proxy analysis of the Yacoraite Formation, Salta rift basin, Argentina. International Journal of Coal Geology, 210, 103208. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.05.015>.

Romero-Sarmiento, M., F., Rohais, S., Littke, R., 2019. Lacustrine Type I kerogen characterization at different thermal maturity levels: Application to the Late Cretaceous Yacoraite Formation in the Salta Basin–Argentina. International Journal of Coal Geology, 203(2), 15-27. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.01.004>.

Sabino, I.F., 2002. Geología del Subgrupo Pirgua (Cretácico) del noroeste argentino. Tese de Doutorado em Geologia, Faculdade de Ciências Naturais, Universidade Nacional de Salta, Salta, 260 pp.

Salfity, J. A., 1979. Paleogeología de la cuenca del Grupo Salta (Cretácico-Eogénico) del norte de Argentina. In: Actas VII Congreso Geológico Argentino, Neuquén, Asociación Geológica Argentina, pp. 505-515.

Salfity, J. A., 1980. Estratigrafía de la Formación Lecho (Cretácico) en la cuenca andina del norte argentino. Tese de Doutorado em Geologia, Departamento de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, Salta, 91 pp.

Salfity J.A., Marquillas R. A., 1989. El basamento pre-cretácico de la Argentina septentrional y regiones adyacentes. Comunicaciones, 40, 17–28.

Salfity, J. A.; Marquillas, R. A., 1994. Tectonic and sedimentary evolution of the Cretaceous-Eocene Salta Group basin, Argentina. In: Salfity, J. A., (Ed.), Cretaceous tectonics of the Andes. Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, pp. 266-315. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-85472-8>.

Salfity, J.A.; Marquillas, R.A., 1999. La cuenca cretácico-terciaria del norte argentino. In: CAMINOS, R. (Ed.). Geología de la República Argentina. Buenos Aires: Dirección Nacional del Servicio Geológico, 29(19), 613-629.

Scherer, C. M., Goldberg, K., & Bardola, T., 2015. Facies architecture and sequence stratigraphy of an early post-rift fluvial succession, Aptian Barbalha Formation, Araripe Basin, northeastern Brazil. *Sedimentary Geology*, 322, 43-62. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.03.010>.

Schoellhamer, D. H. 2001. Singular Spectrum Analysis for time series with missing data. *Geophysical Research Letters*, 28(16), p. 3187-3190. <https://doi.org/10.1029/2000GL012698>.

Schwarzacher, W., 1993. Cyclostratigraphy and the Milankovitch Theory. Elsevier: *Developments in Sedimentology*, 52, London, 225 pp.

Séranne, M., & Anka, Z., 2005. South Atlantic continental margins of Africa: a comparison of the tectonic vs climate interplay on the evolution of equatorial west Africa and SW Africa margins. *Journal of African Earth Sciences*, 43(1-3), 283-300. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.07.010>.

Seggiaro, R. E., Hongn, F., Gallardo, E., Boso, M., Del Papa, C., Marquillas, R., Sabino, I., Galli, C., Aguilera, N., Amengual, R., Ramallo, E., 2019. Hoja Geológica 2566-II, Salta. Provincias de Salta y Jujuy. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. *Boletín*, 440, 92.

Sial, A. N., Ferreira, V. P., Toselli, A. J., Parada, M. A., Aceñolaza, F. G., Pimentel, M. M., & Alonso, R. N., 2001. Carbon and oxygen isotope compositions of some Upper Cretaceous–Paleocene sequences in Argentina and Chile. *International Geology Review*, 43(10), 892-909. <https://doi.org/10.1080/00206810109465054>.

Sinnesael, M., DE Vleeschouwer, D., Zeeden, C., Batengurg, S. J., DA Silva, A. C., De Winter, N. J., Dinarès-Turrell, J., Drury, A. J., Gambacorta, G., Hilgen, F. J., & others. 2019. The Cyclostratigraphy Intercomparison Project (CIP): consistency, merits and pitfalls. *Earth-Science Reviews*, 199, 102965. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102965>.

Starck, D., 2011 Cuenca Cretácica-Paleogena del Noroeste Argentino. 8° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Visión Actual, Instituto Argentino del Petróleo y el Gas: Simposio Cuencas Argentinas, 407–453.

Suarez-Gonzalez, P., Benito, M. I., Quijada, I. E., Mas, R., & Campos-Soto, S., 2019. 'Trapping and binding': A review of the factors controlling the development of fossil agglutinated microbialites and their distribution in space and time. *Earth-Science Reviews*, 194, 182-215. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.05.007>.

Talbot, M.R., 1990. A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates. *Chemical Geology*, 80(4), 261-279. [https://doi.org/10.1016/0168-9622\(90\)90009-2](https://doi.org/10.1016/0168-9622(90)90009-2).

Terra, G. J. S., Spadini, A R., França, A. B., Sombra, C. L., Zambonato, E. E., Juschaks, L. C. S., Arienti, L. M., Erthal, M. M., Blauth, M., Franco, M. P., Matsuda, N. S., Silva, N. G. C., Junior, P. A. M., D'ávila, R. S. F., Schiffer, R. S., Tonietto, S. N., Anjos, S. M. C., Campinho, V. S., Winter, W. R., 2009. Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. *Boletim Geociências Petrobras*, 18(1), 9-29.

Tian, M., Omre, H., & Xu, H., 2021. Inversion of well logs into lithology classes accounting for spatial dependencies by using hidden markov models and recurrent neural networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107598.: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107598>.

Turic, M., Flores, F. A., Omil, R. G., Pombo, R., Sciutto, J., Robles, D., & Cáseres, A., 1987. Geología de las Cuencas petroleras de la Argentina. Evaluación de las Formaciones en la Argentina, 1(1), 1-44.

Turner, J.C.M., 1959. Estratigrafía del cordón de Escaya y de la sierra Rinconada (Jujuy). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Buenos Aires, 13(1), 15-39.

Vail, P. R., Mitchum, R. M., Thompson, S., 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 4: Global Cycles of Relative Changes of Sea Level. In: C. E. Payton (Ed.), *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration*, AAPG Memoir 26, pp. 83-97.

Vautard, R., Ghil, M., 1989. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena* 35 (3), 395–424. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(89\)90077-8](https://doi.org/10.1016/0167-2789(89)90077-8).

Vega, N. R. 2003. Reservoir characterization using wavelet transforms. PhD thesis, Texas A&M University, 128 pp.

Viramonte, J. G., Kay, S. M., Becchio, R., Escayola, M., & Novitski, I. (1999). Cretaceous rift related magmatism in central-western South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 12(2), 109-121. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(99\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(99)00009-7).

Wang, R., Xie, J., Ran, A., Wang, S., Wang, J., Hu, X., Cai, W., & Zhou, Y., 2022. Comparison of INPEFA technology and wavelet transform in sequence stratigraphic division of mixed reservoir: A case study of lower Es3 of KL oilfield in Laizhouwan Sag. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(12), 3213-3225. <https://doi.org/10.1007/s13202-022-01523-z>.

Wei Li.; Zhang, J.; Xie, J.; Xia, Y.; He, Y., 2023. Application of the Wavelet Transform and INPEFA in Sequence Stratigraphy. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07367>.

Yuan, Y., Wang, L., & Xie, R. 2018. Application of INPEFA technology to sequence stratigraphy of the third member of Funing Formation, Nanhua block, Qintong Sag, North Jiangsu Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(6), 871-876. <https://doi.org/10.11781/sysydz201806871>.

Zecchin, M., Catuneanu, O., 2013. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves I: units and bounding surfaces. *Marine and Petroleum Geology*, 39(1), 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.08.015>.