



Observatório Nacional
Programa de Pós-graduação em Geofísica
Nível Mestrado

Evelyn Paiva do Nascimento

ANÁLISE CICLOESTRATIGRÁFICA DOS DEPÓSITOS SEDIMENTARES DA
BACIA POTIGUAR DURANTE O INTERVALO CENOMANIANO-TURONIANO

Rio de Janeiro

-2025-



Observatório Nacional
Programa de Pós-graduação em Geofísica
Nível Mestrado

ANÁLISE CICLOESTRATIGRÁFICA DOS DEPÓSITOS SEDIMENTARES DA
BACIA POTIGUAR DURANTE O INTERVALO CENOMANIANO-TURONIANO

Evelyn Paiva do Nascimento

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Geofísica do
Observatório Nacional, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do título
de Mestre em Geofísica.

Orientador: Dr. Daniel Ribeiro Franco
Coorientadora: Dra. Mariane Candido

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Junho de 2025

ANÁLISE CICLOESTRATIGRÁFICA DOS DEPÓSITOS SEDIMENTARES DA
BACIA POTIGUAR DURANTE O INTERVALO CENOMANIANO-TURONIANO

Evelyn Paiva do Nascimento

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
GEOFÍSICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM GEOFÍSICA.

Examinada por:

Dr. Nome do Examinador Sobrenome

Dr. Nome do Examinador Sobrenome

Dra. Nome da Examinadora Sobrenome

Dr. Nome do Examinador Sobrenome

Dr. Nome do Examinador Sobrenome

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Junho de 2025

*“Há um Deus que fez o céu, a terra e o mar. E me fez à Sua imagem e semelhança.
Por mais que eu tente entender a razão não vou conseguir.
Por Sua palavra o mundo criou, mas me esculpiu.
E empoeirou Suas mãos e Seus pés. Foi flagrante o amor que sentiu por mim.
Soprou em mim Seu sopro cortante, diamante, que quer ver alguém viver.”*

Felipe Valente

Agradecimentos:

A Deus, meu pai, amigo, provedor de toda capacidade intelectual e emocional para tornar este projeto possível. Em quem deposito minha fé e esperança e quem faz a minha vida ter sentido.

Aos meus pais, Cynthia e Everton, por me sustentarem de todas as maneiras possíveis (financeira, emocional e em oração), por cumprirem seu papel de pais brilhantemente e me proporcionarem muito além do que uma boa educação, um bom caráter. Às minhas irmãs Esther e Elis pela parceria e amizade nas horas difíceis.

Ao meu orientador e amigo Dr. Daniel Franco, por sua sapiência, ajuda e compreensão. Por sempre acreditar em mim e incentivar o meu melhor durante toda a caminhada. Por saber que além de toda sua capacidade intelectual, mostra-se sensível às necessidades de seus alunos.

À minha coorientadora e amiga Dra. Mariane Candido, por aceitar embarcar nessa jornada, dedicar horas e horas (além de qualquer expediente) de sua sapiência, apoio emocional e boas risadas. Me incentivar, me abrigar e contribuir para o meu conhecimento acadêmico de muitas maneiras.

Às minhas colegas de trabalho, Dra. Carolina Leandro, Dra. Gabriela Fazio, Dra. Natália Braun e Raysa Rocha por contribuírem ativamente com as análises e correção do texto. À amiga Dra. Natália pelas infinitas caronas. Ao amigo Bernardo Maffessoni, por tornar essa caminhada divertida e engraçada em momentos de caos.

À CAPES, pelo suporte financeiro.

Aos meus tios, Fernando e Valéria, por me abrigarem em boa parte do período de mestrado e tornarem possível financeiramente estudar longe dos meus pais. Aos meus tios, Egberto e Michele, Júnior e Elen, por ajudas financeiras em momentos difíceis e palavras de encorajamento. À Rosedna que cuidou de mim como uma segunda mãe.

Aos meus avós, Almir e Elizabete, Edgar e Soely, pelo incentivo e constantes orações. A todos os meus demais familiares e amigos pela parceria e afeto.

Ao meu amado, Matheus, por acreditar em mim, me incentivar e tornar a minha vida mais leve.

À minha casa de aprendizado, o Observatório Nacional, que me trouxe experiências tão incríveis em forma de conhecimento.

Dedico esse trabalho ao meu pai, que enfrentou e venceu um câncer durante o meu mestrado com tamanha fé que me fez acreditar mais em mim. E, também, à minha mãe que me ensina todos os dias o poder da resiliência e cuidado sem medidas.

“Entrega o teu caminho ao Senhor; confia Nele e o mais Ele fará.” Salmos 37.5.

SUMÁRIO

RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	2
Listas de Figuras.....	3
Abreviaturas e Simbologia.....	4
1. Introdução.....	5
2. Contexto Geológico.....	8
2.1. Bacia Potiguar.....	8
2.2. Supersequência Drifte.....	9
2.2.1. <i>Formações geológicas da Sequência Marinha Transgressiva</i>	9
2.2.2. <i>Cronoestratigrafia</i>	11
2.3. Área de estudo.....	13
3. Cicloestratigrafia – aspectos gerais.....	14
3.1. O espectro climático.....	14
3.2. Ciclos de Milankovitch e a forçagem orbital.....	15
3.3. A escala de tempo astronômica (ATS) e suas contribuições para arcabouços cronoestratigráficos.....	18
4. Procedimentos e Métodos.....	20
4.1. Base de dados.....	20
4.2. Análises Cicloestratigráficas.....	22
4.2.1. <i>Análise espectral e harmônica evolucionária para série de dados no domínio da estratigrafia</i>	22
4.2.2. <i>Procedimentos para estimativa de taxas médias de acumulação (COCO / eCOCO)</i>	24
4.2.3. <i>Isolamento da componente sinusoidal associada à excentricidade longa</i> ..	25
4.3. Análise de Filtro de Previsão de Erro Integrado.....	26
5. Manuscrito “CYCLOSTRATIGRAPHY OF FLUVIO-ESTUARINE DEPOSITS IN THE POTIGUAR BASIN DURING THE CENOMANIAN-TURONIAN INTERVAL”.....	28
6. Considerações finais.....	61
7. Bibliografia.....	63

Resumo de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

ANÁLISE CICLOESTRATIGRÁFICA DOS DEPÓSITOS SEDIMENTARES DA BACIA POTIGUAR DURANTE O INTERVALO CENOMANIANO-TURONIANO

Evelyn Paiva do Nascimento

Junho/2025

RESUMO

Bacias sedimentares exploratórias requerem um refinamento cronoestratigráfico contínuo. No entanto, em ambientes continentais, seu estudo permanece desafiador devido aos processos erosivos complexos e dinâmicos dos sistemas fluviais e fluvio-estuarinos, que frequentemente mascaram os registros deposicionais. Consequentemente, investigar a influência dos ciclos orbitais - uma abordagem que pode auxiliar no refinamento dos arcabouços cronoestratigráficos — nesses registros também é um desafio. Como resultado, estudos sobre esse tema são relativamente incomuns na literatura, apesar do crescente interesse recente da comunidade científica. Nesse contexto, os depósitos fluvio-estuarinos da Formação Açu, na Bacia Potiguar - uma importante bacia exploratória localizada na margem equatorial brasileira - representam um registro sedimentar incomum no qual os ciclos T-R podem ser rastreados lateralmente por dezenas de quilômetros. Isso os torna um objeto de estudo interessante para análises cicloestratigráficas em depósitos não convencionais. Assim, este estudo tem como objetivo investigar a influência do forçamento orbital na Formação Açu, correlacionar ciclos influenciados por variações orbitais nos poços e estabelecer o intervalo de tempo preservado por meio do desenvolvimento de uma Escala de Tempo Astronômica (ATS). Foram realizadas análises cicloestratigráficas utilizando técnicas de séries temporais em dados de perfilagem gama de três poços, com foco em duas sequências de terceira ordem depositadas do limite Albiano-Cenomaniano ao Turoniano (aproximadamente 100,5 a 93 milhões de anos). Métodos estatísticos, como o coeficiente de correlação (COCO) e a hipótese nula (H_0), foram aplicados para determinar a taxa de acumulação sedimentar (SAR) ideal e testar o registro de ciclos astronômicos. A Análise Integrada do Filtro de Erro de Previsão (INPEFA) foi utilizada para identificar tendências no registro sedimentar, aprimorando a correlação entre ciclos correspondentes. Os resultados cicloestratigráficos evidenciam o registro de forçamento orbital sobre os depósitos sedimentares, compatível com as taxas espectrais previstas por solução astronômica para o intervalo entre o Cenomaniano-Turoniano. As taxas de acumulação sedimentar inferidas variam entre aproximadamente 3 e 8 cm/kyr, consistentes com ambientes deposicionais semelhantes. A identificação de bandas espectrais compatíveis com o ciclo de excentricidade longa (405 ka) permitiu a construção de uma ATS flutuante para o intervalo Cenomaniano-Turoniano na bacia e a estimativa do tempo registrado. Como a boa preservação de sinais orbitais em ambientes fluvio-estuarinos é incomum — limitando o número de estudos cicloestratigráficos — esta pesquisa fornece insights importantes sobre o comportamento dos sinais orbitais e o preenchimento da bacia nesse tipo de paleoambiente. Além disso, como esse intervalo inclui depósitos portadores de hidrocarbonetos, os achados contribuem para o avanço dos estudos cicloestratigráficos em bacias exploratórias, podendo ser aplicados para fins de correlação cronoestratigráfica.

Abstract of the dissertation presented to the National Observatory's Graduate Program in Geophysics as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Geophysics.

CYCLOSTRATIGRAPHIC ANALYSIS OF THE SEDIMENTARY DEPOSITS IN THE POTIGUAR BASIN DURING THE CENOMANIAN-TURONIAN INTERVAL

Evelyn Paiva do Nascimento

June/2025

ABSTRACT

Exploratory sedimentary basins require continuous chronostratigraphic refinement. However, in continental settings, this remains challenging due to the complex and dynamic erosional processes of fluvial and fluvio-estuarine systems, which often obscure the depositional record. Consequently, investigating the influence of orbital cycles — an approach that can aid in refining chronostratigraphic frameworks — in these records is also a challenge. As a result, studies on this topic are relatively uncommon in the literature, despite the growing recent interest from the scientific community. In this context, the fluvio-estuarine deposits of the Açu Formation, in the Potiguar Basin — an important exploratory basin located on the Brazilian equatorial margin — represent an special sedimentary archive in which T-R cycles can be traced laterally for tens of kilometers. This makes them an interesting subject for cyclostratigraphic analysis in non-marine environments. This study investigates the influence of orbital forcing on the Açu Formation, correlate cycles influenced by orbital variations in the wells, and establish the preserved time interval through the construction of an Astronomical Time Scale (ATS). Cyclostratigraphic analyses were performed using time series techniques on gamma-ray logging data from three wells, focusing on two third-order sequences deposited from the Albian-Cenomanian boundary to the Turonian (approximately 100.5 to 93 million years ago). Statistical methods including correlation coefficient (COCO) and the null hypothesis (H_0), were applied to determine the ideal sedimentation rate (SAR) and test the record of astronomical cycles. The Integrated Error Prediction Filter Analysis (INPEFA) was used to identify trends in the sedimentary record, improving the correlation of matching cycles. The cyclostratigraphic results demonstrate the imprint of orbital forcing on the sedimentary deposits, consistent with the astronomical solutions for the Cenomanian–Turonian interval. The inferred sedimentation rates range from approximately 3 to 8 cm/kyr, consistent with similar depositional environments. The identification of spectral bands corresponding to the long eccentricity cycle (405 ka) allowed for the construction of a floating ATS for the Cenomanian-Turonian interval in the basin and the estimation of the recorded time. Since the good preservation of orbital signals in fluvio-estuarine environments is uncommon — limiting the number of cyclostratigraphic studies — this research provides important insights into the behavior of orbital signals and basin filling in this type of paleoenvironment. Furthermore, as this interval includes hydrocarbon-bearing deposits, the findings contribute to the advancement of cyclostratigraphic studies in exploratory basins, with potential applications for chronostratigraphic correlation.

Listas de Figuras

Figura 1: Localização da Bacia Potiguar.....	8
Figura 2: Detalhe parcial da carta estratigráfica da Bacia Potiguar, com destaque para o intervalo estudado (sequências, ordem de grandeza das sequências e palinozonas) (modificado de Pessoa Neto et al., 2007 e Melo et al., 2019).....	11
Figura 3: Mapa regional da Bacia Potiguar, com poços e seções sísmicas estudadas por Melo et al. (2019). Os poços selecionados para a realização deste estudo estão em destaque (círculos em amarelo) (modificado de Melo et al., 2019).....	13
Figura 4: Escalas temporais associados aos diversos processos influentes sobre o sistema climático global. As cores correspondem aos vários processos físicos que impulsionam a variabilidade. A parte superior do diagrama indica várias fontes e forças relativas de variabilidade periódica (orbital) e aleatória (impacto/vulcânica/solar) forçando a variabilidade. Entre as curvas e as forçantes constam a nomenclatura definida por Lovejoy e Schertzer (2013) para vários regimes temporais (modificado de Von der Heydt et al., 2020).....	16
Figura 5: Representação esquemática dos ciclos de Milankovitch (modificado de Zachos, et al, 2001).....	17
Figura 6: Seção sísmica <i>onshore</i> das sequências de terceira ordem (DS 1 a D5) da Sequência Marinha Transgressiva da fase Drifte da Bacia Potiguar. Poços 3 e 4 correspondem aos poços 1 e 2 deste estudo, respectivamente (modificado de Melo et al., 2019).).....	21
Figura 7: Seção sísmica transicional das sequências de terceira ordem (DS 1 a D5) da Sequência Marinha Transgressiva da fase Drifte da Bacia Potiguar. Poços 17 corresponde ao poço 3 deste estudo (modificado de Melo et al., 2019).....	21

Abreviaturas e Simbologia

ATS - Astronomical Time Scale

COCO - Coeficiente de correlação

DOP - Oscilação Decadal do Pacífico

eCOCO - Coeficiente de correlação evolucionário

EHA – Análise harmônica evolucionária

EM – Espectro de Mitchel

ENSO - El Niño-Oscilação do Sul

FATS – Floating Astronomical Timescale

FFT - Fast Fourier Transform

GR – Gamma Ray

INPEFA - Integrated Prediction Error Filter Analysis

INPOP - Intégration Numérique Planétaire de l'Observatoire de Paris

MESA - Maximum Entropy Spectral Analysis

MTM – Multitaper Method

PEFA - Prediction Error Filter Analysis

QBO - Oscilação Quase-bienal

SMI – Superfície de Máxima Inundação

Sq – Sequência

SU – Subaerial Unconformity

TSEQ – Trato de Sistema de Estágio de Queda

TSMA – Trato de Sistema de Mar Alto

TSMB – Trato de Sistema de Mar Baixo

TST – Trato de Sistema Transgressivo

1. Introdução

Na última década, estudos cicloestratigráficos vêm ganhando cada vez mais destaque em análises de sequências sedimentares, potencializando a compreensão dos elementos que influenciam no preenchimento de bacias e, por consequência, o próprio arcabouço estratigráfico (e.g., Batenburg et al., 2012; Franco et al., 2012; Wu et al., 2013; Kietzmann et al., 2015; Liu et al., 2017; Bao et al., 2018; Pas et al., 2018; Zhang et al., 2019; Leandro et al., 2022; Shi et al., 2022). Estudos de evolução de bacias são fundamentais para o setor de exploração de hidrocarbonetos, bem como para o entendimento dos processos paleoambientais e paleoclimáticos ocorridos no passado geológico. A Cicloestratigrafia tem como princípio básico a investigação de padrões deposicionais cíclicos, os quais registram variações quase-periódicas que ocorreram no ambiente no passado geológico. Tais padrões podem ser gerados por diversos fatores, tais como: mudanças no nível do mar, tectonismo, mudanças climáticas, ou uma combinação dos mesmos (Perlmutter e Azambuja Filho, 2005; Kodama e Hinnov, 2015). Deste modo, a análise de ciclicidade associada a técnicas de datação pode ser aplicada na construção de arcabouços geocronológicos de alta resolução (Perlmutter e Azambuja Filho, 2005).

A atribuição de idades e/ou intervalos de tempo a registros sedimentares ao longo do empilhamento deposicional pode ser feita a partir de análises de séries de dados em que o conteúdo de frequência do proxy é transformado em períodos, relacionando-os a ciclos temporais previamente conhecidos, como, por exemplo, ciclos de Milankovitch (Weedon, 2003; Hinnov, 2013; Hinnov, 2018). Proxies paleoclimáticos e/ou paleoambientais adquiridos em sequências sedimentares contínuas e razoavelmente espessas são ideais para a aplicação de estudos cicloestratigráficos, uma vez que a sedimentação ininterrupta – sem hiatos deposicionais – registraria todas as variações ambientais ao longo do tempo, relacionadas ao sítio deposicional analisado (Kodama e Hinnov, 2015). Depósitos marinhos, portanto, possuem o maior potencial para preservação de sinais forçados astronomicamente, devido aos processos contínuos de sedimentação (Kodama e Hinnov, 2015). Entretanto, alguns trabalhos realizados a partir de registros deposicionais fluviais têm demonstrado a influência de ciclos orbitais em sequências sedimentares continentais (Abels et al., 2013; Lanci et al., 2022).

Recentemente, Lanci et al. (2022) investigaram a variabilidade da deposição de sedimentos na Bacia do Karoo (Permiano Médio) em escala orbital, e verificaram um caso especial de sequência fluvial sob controle alogênico, impulsionado por ciclos astronômicos. A porção estudada, correspondente à Formação Abrahamskraal, é

composta por camadas de argilitos e siltitos, intercaladas com arenitos de preenchimento de canal fluvial, divergindo das condições usualmente discutidas sobre este tipo de estudo, uma vez que canais fluviais frequentemente evidenciam registros erosivos. Através de análise espectral de séries de dados de óxidos de elementos maiores, ou seja, de maior concentração em rochas sedimentares como: SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O e P_2O_5 , os autores identificaram periodicidades significativas, correspondentes a ciclos de excentricidade longa, curta, obliquidade e precessão de acordo com soluções astronômicas para o Paleozoico Superior.

Neste contexto, as principais rochas-reservatório da Bacia Potiguar (Fig. 1), importante bacia petrolífera brasileira, estão associadas a ambientes flúvio-estuarinos da Formação Açu (Vasconcelos et al., 1990; Melo et al., 2021). Os depósitos siliciclásticos da Formação Açu (Albiano-Cenomaniano) gradam lateralmente para depósitos carbonáticos e siltosos de *offshore* das Formações Ponta do Mel (Albiano Tardio) e Quebradas (Albiano-Campaniano), e são recobertos por carbonatos também de *offshore* da Formação Jandaíra (Turoniano-Campaniano) (Araripe e Feijó, 1994; Melo et al., 2019).

De acordo com Melo et al. (2021), as formações do intervalo Albiano-Campaniano da Bacia Potiguar compõem cinco sequências deposicionais de terceira ordem, que por sua vez são compostos por ciclos T-R (transgressivo-regressivo) de quarta ordem, mapeáveis lateralmente ao longo da bacia. Melo et al. (2021) ainda sugerem que tais quase-periodicidades de alta frequência estariam subordinados aos de baixa ordem. Logo, de acordo com Fragoso et al. (2021), estas características resultariam em pouca ou nenhuma mudança de sistema deposicional ao longo do empilhamento vertical. Entretanto, os autores não investigam se as forçantes astronômicas que poderiam ter controlado o registro – o que seria determinante para o pleno entendimento do contexto deposicional. Logo, esta configuração constitui um cenário interessante para investigações do registro de forçagem orbital em ambiente fluvial e transicional, teoricamente não ideais, devido aos processos erosivos mais intensos (Kodama e Hinnov, 2015).

Assim, este trabalho tem por objetivo central investigar o possível registro de processos quase-periódicos em escala orbital que possivelmente controlaram a deposição dos depósitos no intervalo Cenomaniano-Turoniano (entre ~100,5 e 93,1 Ma) da Bacia Potiguar. Este intervalo, representado por duas sequências de terceira ordem da Sequência Marinha Transgressiva da bacia, foi escolhido por apresentar maior detalhamento estratigráfico, além das seções serem mais regulares em relação à variação de espessura

e litologia ao longo da bacia, e da qualidade dos dados. As forçantes, uma vez determinadas, permitirão compreender o controle alogênico sobre os sistemas e, possivelmente, refinar a correlação entre os poços, bem como determinar o intervalo de tempo preservado nas sequências estudadas, através da geração de uma escala de tempo astronômica flutuante (FATS; sigla em inglês). Para tal, foram realizadas análises de sinais cicloestratigráficos e evolucionárias, além de testes de taxa de sedimentação e de tendência a partir de dados de gama total de três testemunhos de sondagem, disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), e que estão estratigraficamente contextualizados no arcabouço de alta resolução construído por Melo et al. (2019).

2. Contexto Geológico

2.1. Bacia Potiguar

A Bacia Potiguar, situada no extremo nordeste do Brasil, na margem equatorial, compreende em sua maior parte o estado do Rio Grande do Norte e parte do estado do Ceará (Matos, 1999; Pessoa Neto et al., 2007; Santos, 2009). Limita-se a norte na porção *offshore* pela isóbata de 2000 m, e a leste, oeste e sul pelo embasamento cristalino (Fig. 1). Sua extensão territorial possui cerca de 48.000 km², sendo 21.500 km² a área emersa (45% *onshore*) e 26.500 km² a área submersa (55% *offshore*), e a maior espessura de seus depósitos possui aproximadamente 6.000 metros (Bertani et al., 1990; Matos, 1992; Pessoa Neto et al., 2007).

A origem da bacia data da Era Mesozóica, cujo embasamento é constituído por rochas pré-cambrianas (Bertani et al., 1990). A evolução tectono-sedimentar se inicia no período Cretáceo concernente à quebra do continente Gondwana, culminando na abertura do Atlântico e separação das placas Sul-Americana e Africana (Matos, 1987; Matos, 1999; de Castro et al., 2012). A Bacia Potiguar pode ser dividida em três fases principais, as quais estão registradas em três superseqüências deposicionais: Rifte (Neocamiano/Eo-Aptiano), Pós-rifte (Neo-Aptiano/Eo-Albiano) e Drifte (Albiano/Holoceno) (Pessoa Neto, 1999; Pessoa Neto et al., 2007).

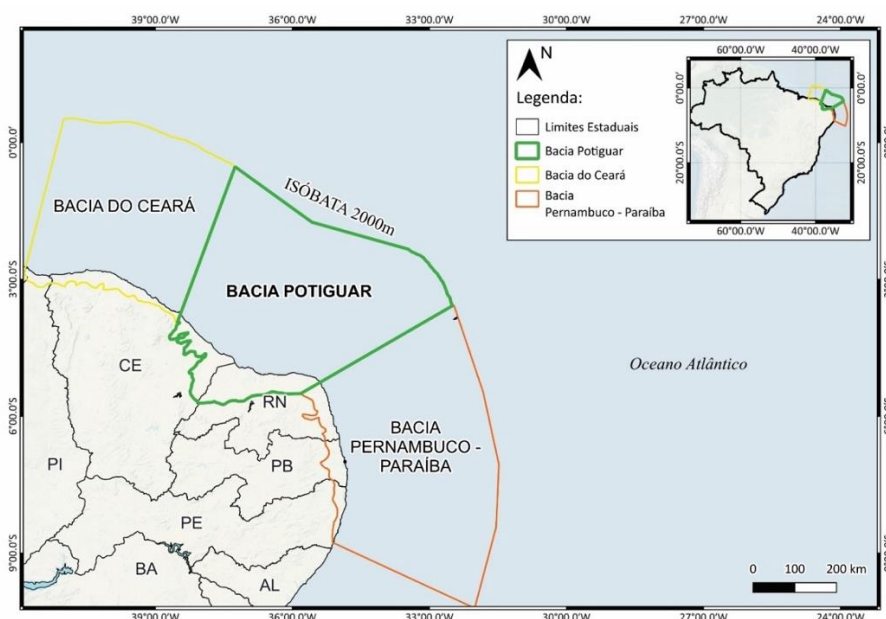


Figura 1: Localização da Bacia Potiguar.

Segundo Pessoa Neto et al. (2007), a Supersequência Rifte contém duas fases (Rifte I e Rifte II) e é representada pelas Formações Pendência e Pescada (Berriasiano/EoAptiano), cujos depósitos foram descritos como flúvio-deltaicos e lacustres. A Supersequência Pós-rifte também inclui depósitos continentais flúvio-deltaicos e os primeiros registros marinhos representados pela Formação Alagamar. Já a Supersequência Drifte é assinalada por uma sequência flúvio-marinha transgressiva (Formações Açu, Ponta do Mel, Quebradas, Jandaíra e Ubarana), intervalo de interesse neste estudo, a qual é recoberta por uma sequência clástica e carbonática regressiva (Formações Ubarana, Tibau e Guamaré). As idades da sequência transgressiva variam do Albiano ao Campaniano, e da sequência regressiva do Campaniano ao Holoceno.

Três eventos magmáticos significativos também marcaram a história deposicional da Bacia Potiguar: o evento Rio Ceará-Mirim, com intrusões de diques de diabásio provenientes do embasamento pré-cambriano na fase sin-rifte I (Matos, 1992; Lopes, 2018); os fluxos de basalto do magmatismo mesozóico da Serra do Cuó; e o evento cenozóico de Macau, cuja origem pode estar associada a intrusões magmáticas intraplaca ou à formação do Arquipélago de Fernando de Noronha (Pessoa Neto et al., 2007).

2.2. Supersequência Drifte

A Supersequência Drifte compreende toda a sedimentação marinha em condições de subsidência térmica verificada a partir do Albiano Inferior (Araripe e Feijó, 1994; Pessoa Neto, 1999). Ela pode ser classificada em dois grupos: as Sequências Marinhas Transgressivas, de idade Eoalbiano – Eocampaniano, que compreende o intervalo de estudo, e as Sequências Marinhas Regressivas, de idade Neocampaniano – Holoceno.

2.2.1. Formações geológicas da Sequência Marinha Transgressiva

O agrupamento de sequências transgressivas contém depósitos flúvio-estuarinos representados pela Formação Açu, plataformas carbonáticas observadas nas Formações Jandaíra e Ponta do Mel, e depósitos de xisto marinho e de turbiditos vistos na Formação Quebradas. Estas sequências também incluem cânions submarinos bem marcados nos estratos (Tibana e Terra, 1981; Castro et al., 1986). Segundo Araripe e Feijó (1994), a Formação Açu sobrepõe a Formação Alagamar de modo abrupto, em contato discordante e erosivo. Lateralmente, em direção ao depocentro, interdigita-se com as formações Quebradas e Ponta do Mel.

Uma subdivisão lito-estratigráfica de quatro unidades, relacionadas a diferentes sistemas deposicionais, foi proposta por Vasconcelos et al (1990) para a Formação Açu, definidas de forma ascendente na coluna estratigráfica: Açu I (leques aluviais e sistemas aluviais incipientes), Açu II (sistemas fluviais entrelaçados com a migração para sistemas meandantes no topo), Açu III (ciclo fluvial mais jovem semelhante ao Açu II) e Açu IV (fluvial para costeiro-estuarino). Essa configuração representa um ciclo global transgressivo na Formação Açu (Fig. 2) e a renovação de energia fluvial deve-se a quedas relativas do nível do mar ou elevações tectônicas sobrepostas à subida do nível relativo do mar.

A Formação Ponta do Mel registra uma estreita plataforma de carbonato marinho e de planície de maré, depositada durante o Albiano. Por sua vez, a Formação Jandaíra representa uma rampa carbonática formada a partir de depósitos de planícies de maré, de lagoas e marinhos calcários, depositados do Turoniano ao Campaniano. A Formação Jandaíra recobre a Formação Açu e correlaciona-se lateralmente aos xistos e turbiditos marinhos da Formação Quebradas (Sampaio e Schaller, 1968; Araripe e Feijó, 1994; Córdoba, 2001).

As sequências deposicionais do intervalo Albiano-Campaniano da Bacia Potiguar foram recentemente refinadas e reinterpretadas por Melo et al. (2019, 2021) através de perfis sísmicos, dados de poços e dados bioestratigráficos. Segundo este refinamento, a sequência deposicional 1 (Sq 1) foi depositada entre o Eo-Albiano e o Eo-Cenomaniano, e compreende as Formações Açu e Ponta do Mel. Apresenta os seguintes tratos de sistemas: Trato de Sistema de Estágio de Queda (TSEQ) - preservado em um cânion submarino escavado no topo dos depósitos da Formação Alagamar, Trato de Sistema de Mar Baixo (TSMB) - depósitos siliciclásticos progradantes, Trato de Sistema Transgressivo (TST) e o Trato de Sistema de Mar Alto (TSMA) - carbonatos da Formação Ponta do Mel.

A sequência deposicional 2 (Sq 2), registrada durante o Cenomaniano, compreende os depósitos continentais da Formação Açu e os depósitos siliciclásticos da Formação Quebradas. Assim como a Sq 1, preserva o TSEQ - restrito ao cânion submarino Ubarana, que sobrepõe e retrabalha depósitos da Sq 1, TSMB - canais amalgamados, representando sistemas fluviais entrelaçados, TST - canais isolados na base, relacionados a sistemas fluviais meandantes, e depósitos mais distais gradualmente em direção ao topo e o TSMA - restrito ou erodido pela sequência depositada acima.

A sequência deposicional 3 (Sq 3) compreende o período entre o Neo-Cenomaniano e o Meso-Turoniano, e apresenta apenas os tratos transgressivo e de mar

alto. A superfície de inundação máxima que marca a mudança do TST para o TSMA marca o contato estratigráfico entre as Formações Açú e Jandaíra, bem como o limite Cenomaniense/Turoniano. Este contato equivale à inconformidade subaérea e limite inferior da sequência 4 (Sq 4). As sequências deposicionais 4 e 5, estão compreendidas entre o Turoniano e Campaniano, ambas também apresentam apenas os tratos transgressivos e de mar alto, e estão inseridas no contexto da Formação Jandaíra.

No presente estudo, o empilhamento estratigráfico é formado pelas sequências deposicionais de terceira ordem 2 e 3 (Fig. 2), definidas por Melo et al. (2019), limitadas por inconformidades subaéreas e suas respectivas conformidades correlativas marinhas.

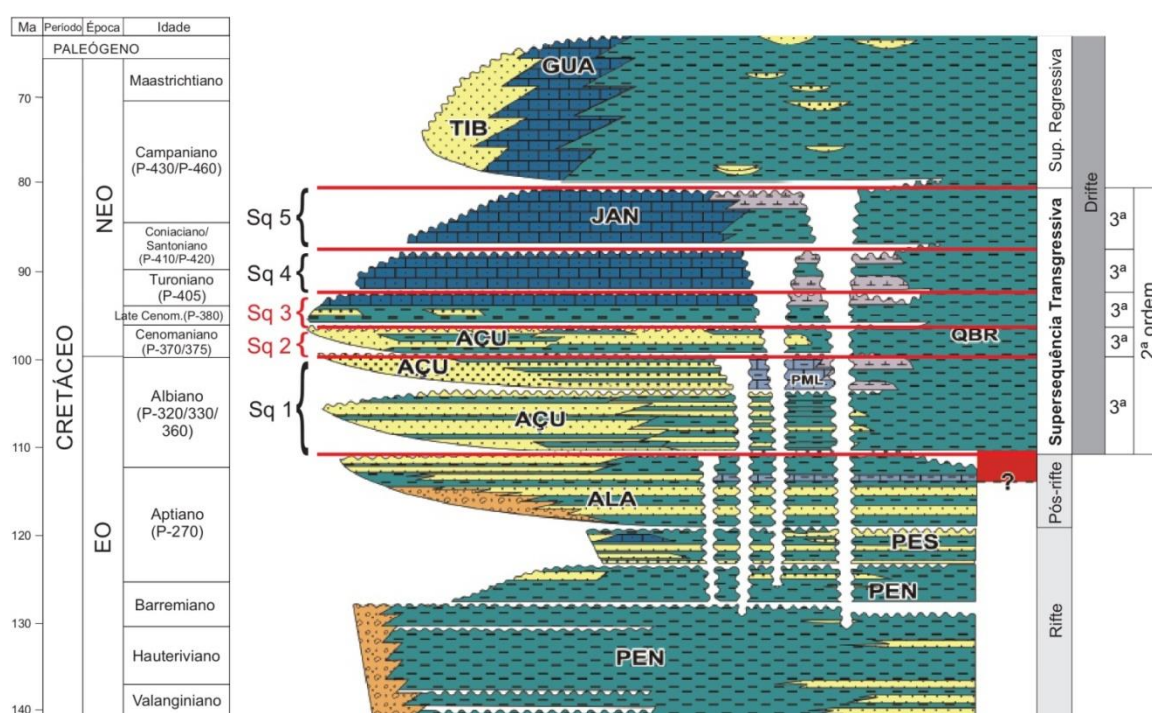


Figura 2: Detalhe parcial da carta estratigráfica da Bacia Potiguar, com destaque para o intervalo estudado (sequências, ordem de grandeza das seqüências e palinozonas) (modificado de Pessoa Neto et al., 2007 e Melo et al., 2019). Linhas vermelhas representam hiatus deposicionais (inconformidades subaéreas) e fonte em vermelho destaca as sequencias estudadas (Sq 2 e Sq 3). AÇU: Formação Açú; JAN: Formação Jandaíra; PML: Formação Ponta do Mel; QBR: Formação Quebradas.

2.2.2. Cronoestratigrafia

A cronoestratigrafia trata das relações temporais relativas aos corpos rochosos e é uma importante ferramenta para analisar o registro sedimentar, provendo maior detalhamento sobre sua distribuição espacial e a evolução do preenchimento sedimentar das bacias. (Salvador, 1994; 1999). Segundo Melo et al. (2019), a Bacia Potiguar não dispõe de um arcabouço cronoestratigráfico completo para o intervalo Albiano–Campaniano, seu alvo de estudo. Logo, constatou-se que, através dos estudos

estratigráficos de Pessoa Neto et al. (2007), as sequências deposicionais desse intervalo foram inicialmente baseadas em hiatos deposicionais definidos por estudos bioestratigráficos, uma vez que os tratos de sistemas não eram definidos até o momento. A bioestratigrafia da Bacia Potiguar baseia-se na integração de dados de palinomorfos, foraminíferos e nanofósseis, e na correlação com outras seções da Margem Atlântica, o que facilita a interpretação de eventos transgressivos, regressivos e a identificação de hiatos deposicionais (Regali et al., 1974; Beurlen, 1982; Viviers e Burlen, 1987).

Os palinomorfos são microfósseis constituídos de esporopolenina, quitina ou pseudoquitina, proteínas resistentes ao ataque de agentes químicos redutores, à pressão e às mudanças de temperatura (Parizzi, 1993). Ao serem atribuídas a uma determinada faixa de idades, estes microfósseis podem ser definidos como biozonas denominadas palinozonas. Nesse contexto, os estudos de Regali e Gonzaga (1985) definiram um quadro de palinozonas específicas para a Bacia Potiguar, que foi posteriormente atualizado e tem sido utilizado frequentemente por outros estudos como referência de idades (Viviers e Regali, 1987; Gil, 1997; Lana, 1997; Córdoba, 2001).

As palinozonas associadas ao intervalo de interesse deste estudo, todas representativas de depósitos de sequência transgressiva de idade Cenomaniana-Turoniana (Lana, 1997; Arai, 2001; Nascimento, 2013), são denominadas de acordo com a terminologia empregada pela Petrobras (Petróleo Brasileiro S/A). Deste modo, P-370 (espécie *Psilatricolpites Papilioniformis*) e P-375 (*Gnetaceaepollenites diversus*) são palinozonas representantes do Cenomaniano (~100,5-93,9 Ma), e P-380 (*Gnetaceaepollenites similis*) restrita ao Cenomaniano Tardio, idades relativas às sequências Sq2 e parte da Sq3, respectivamente; e P-405 (*Tricolpites sp.*) é uma palinozona associada ao Turoniano (93,9-89,8 Ma), em que a porção final da Sq3 estaria contextualizada (Melo et al., 2019).

A carta estratigráfica da Bacia Potiguar apresenta os hiatos deposicionais identificados por estudos bioestratigráficos (Fig. 2), e, como supracitado, as sequências estratigráficas analisadas estão contextualizadas nas referidas idades. No entanto, essa associação foi previamente realizada de acordo com a correlação lateral de uma série de poços, sendo que cada poço não possui, necessariamente, o registro palinológico. Não há nenhuma evidência bioestratigráfica discutida na literatura para o poço 1; no poço 2, para o intervalo estudado, apenas a palinozona P-390; e no poço 3, as palinozonas P-370 e P-380. Apesar das incertezas de idade atribuída aos dados bioestratigráficos, as idades

relativas são de fundamental importância para inferir a solução astronômica para o intervalo de tempo estudado e, por sua vez, as periodicidades esperadas para os ciclos orbitais à época de formação dos depósitos. Esses dados bioestratigráficos representam um geocronômetro independente capaz de auxiliar na proposição de uma astrocronologia flutuante, não ancorada à escala de tempo geológico, através da detecção de frequências de sinal relacionadas a uma ou várias frequências previstas pela modelagem astronômica; por exemplo, com base no ciclo de excentricidade longa de 405 ka (Hilgen e Hinnov, 2012; Hinnov, 2013).

2.3. Área de estudo

A área de estudo encontra-se na porção oriental da Bacia Potiguar, na região *onshore* da bacia (Fig. 3). O estudo fundamenta-se a partir de análises cicloestratigráficas de três testemunhos de sondagem inseridos em uma extensa área de campos petrolíferos (Fig. 3) (Castro, 1992; Bagnoli, 1992), contextualizados em trabalhos de estratigrafia de seqüências de Melo et al. (2019; 2021). Os poços selecionados, denominados como 1 (*onshore*), 2 (*onshore*) e 3 (transicional), correspondem aos poços 3, 4 e 17 de Melo et al. (2019), respectivamente.

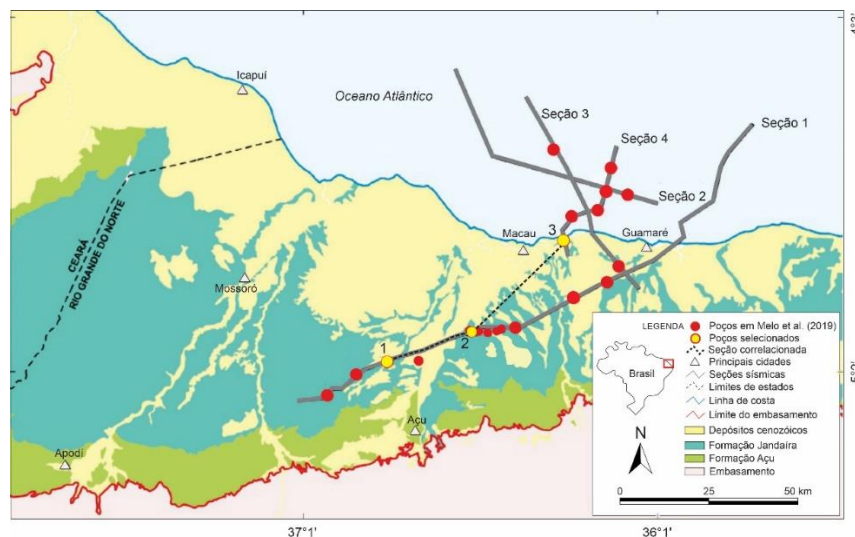


Figura 3: Mapa regional da Bacia Potiguar, com poços e seções sísmicas investigadas por Melo et al. (2019). Os poços selecionados para a realização deste estudo estão em destaque (círculos em amarelo) (modificado de Melo et al., 2019).

3. Cicloestratigrafia – aspectos gerais

A cicloestratigrafia pode ser definida como a subdisciplina da estratigrafia capaz de identificar, caracterizar, correlacionar e interpretar variações periódicas e/ou quase-periódicas no registo estratigráfico e possui amplas aplicações em geocronologia (Strasser et al., 2006; Hinnov, 2013). Uma das principais aplicações atualmente consiste no aprimoramento da resolução de arcabouços cronoestratigráficos (Hilgen et al., 2004; Strasser et al., 2006). Ela fundamentalmente permite a análise da recorrência de padrões deposicionais no registo sedimentar e inferências sobre a origem das forçantes, que pode estar associada a diversos agentes, dentre os quais os movimentos orbitais terrestres conhecidos como ciclos de Milankovitch (Strasser et al., 2006).

3.1. O espectro climático

O complexo sistema climático da Terra, que inclui subsistemas como os oceanos, massas de gelo, biosfera e a atmosfera, sofre mudanças em diferentes escalas de tempo, e flutuações anuais são geradas por processos naturais internos e influências externas (Berger et al., 1992). Os registos geológicos são o repositório das alterações ambientais a longo prazo e dos fatores que as influenciaram, tais como a taxa de dióxido de carbono, a incidência de radiação solar e o movimento das placas tectônicas (Weedon, 2003; Meyers, 2019).

As forçantes climáticas fundamentais, segundo Ruddiman (2008), são provenientes de (i) processos tectônicos operantes na escala de milhões de anos, gerados pelo calor interno da Terra e afetando sua geografia básica; (ii) alterações na órbita da Terra em torno do Sol ($10^4 - 10^6$ anos), que afetam a quantidade de radiação recebida pelo Sol; e (iii) variações na intensidade do Sol, com o aumento da intensidade em variações de mais curto prazo.

Todos estes mecanismos de forçagem refletem-se no clima e na temperatura em escala regional a global em escalas de tempo distintas, e podem ser representadas por um espectro de potência – um espectro climático (Von der Heydt et al., 2020). Uma das primeiras versões deste espectro foi proposto por Mitchell (1976) com base em registos paleoclimáticos e dados de observações instrumentais da variabilidade atmosférica, com estimativas para a variação relativa do clima em períodos comparáveis à idade da Terra até cerca de uma hora (Mitchell, 1976). De acordo com este autor, as fontes potenciais da

variabilidade podem ser internas ao sistema climático, externas ou geradas a partir da interação de ambos. Dois exemplos de eventos quase-periódicos com influência climática interna são, respectivamente, o aquecimento diferencial da superfície do mar no Pacífico equatorial oriental conhecido como El Niño-Oscilação do Sul (ENSO), que ocorre em média a cada 3-7 anos (Philander, 1990), e a Oscilação Quase-bienal (QBO), caracterizada por variações de vento zonal de propagação irregular para baixo na estratosfera tropical inferior (Wallace, 1973), tem um período médio de ~28 meses (Newman et al., 2016). Em escalas decadais e multidecadais, merece destaque a Oscilação Decadal do Pacífico (DOP) – variações cíclicas da temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico, que podem apresentar flutuações mais energéticas em dois intervalos distintos, de 15 a 25 anos e de 50 a 70 anos (Mântua e Lebre, 2001). Como fontes potenciais da variabilidade externas, podemos mencionar os seguintes exemplos: (1) processos tectônicos, que afetam o clima através da remodelação gradual das bacias oceânicas, processos continentais e atividade vulcânica; (2) ciclo diurno determinístico e a forçagem solar anual do clima, que ocorrem devido à rotação e à inclinação do eixo de rotação da Terra no movimento de translação, respectivamente (Mitchell, 1976). As fontes identificadas como determinísticas incluem também a forçagem astronômica de longa escala (Crucifix et al., 2006), representada pelos ciclos de Milankovitch, e que serão discutidos no próximo tópico.

Um exemplo recente da composição do espectro climático foi proposto por Von der Heydt et al. (2020), em que a forçagem externa é mostrada na parte superior do diagrama apresentado na Figura 4. As curvas na parte inferior representam as respostas e à variabilidade interna devido à dinâmica de vários subsistemas. Os eventos de impacto, variabilidade solar e eventos de vulcanismo representam forçamentos aperiódicos de amplitude altamente variável.

3.2. Ciclos de Milankovitch e a forçagem orbital

A teoria astronômica de paleoclimas, proposta em 1941 pelo matemático sérvio Milutin Milankovitch (1879 – 1958) define que os mecanismos de resposta climática são causados principalmente por variações nos parâmetros orbitais. De acordo com esta interpretação, mudanças na posição Terra-Sol acarretariam em variações de insolação de

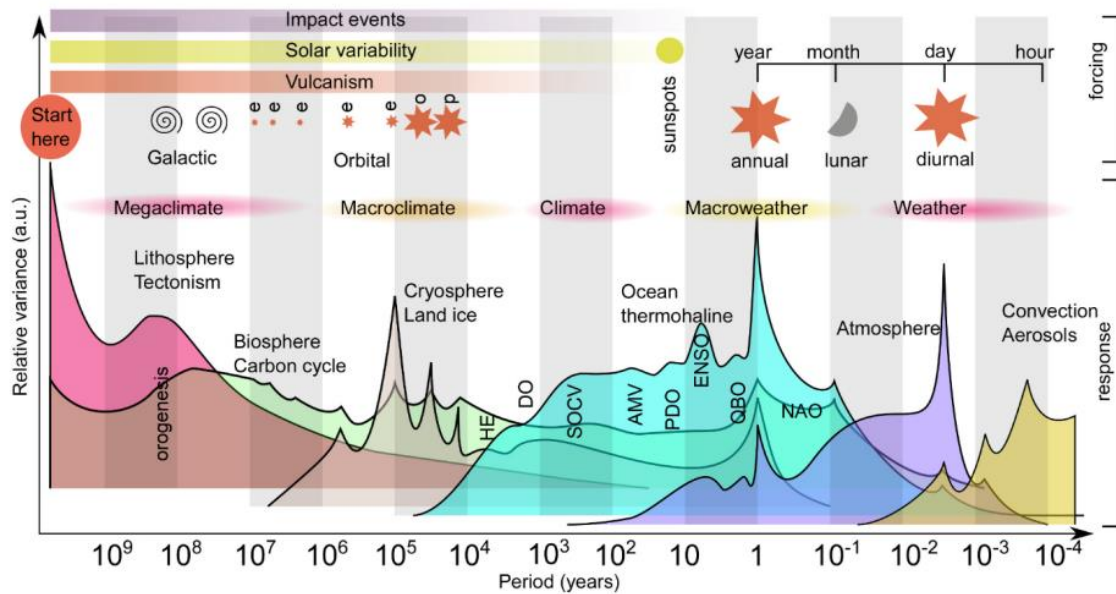


Figura 4: Escalas temporais associados aos diversos processos influentes sobre o sistema climático global. As cores correspondem aos vários processos físicos que impulsionam a variabilidade. A parte superior do diagrama indica várias fontes e forças relativas de variabilidade periódica (orbital) e aleatória (impacto/vulcânica/solar) forçando a variabilidade. Entre as curvas e as forçantes constam a nomenclatura definida por Lovejoy e Schertzer (2013) para vários regimes temporais (modificado de Von der Heydt et al., 2020).

longo período, agindo de maneira significativa sobre o sistema climático global – os chamados “ciclos de Milankovitch” (Hilgen et al., 2004; Strasser et al., 2006, Hinnov, 2013). Tais processos, operantes em escalas de tempo entre 10^4 a 10^6 anos, são definidos pelos seguintes parâmetros orbitais: (i) excentricidade (e); (ii) inclinação axial da Terra ou obliquidade eclíptica (ϵ); e (iii) precessão do eixo de rotação da Terra, ou precessão dos equinócios ($e \sin \psi$) (Hinnov e Hilgen, 2012).

A *excentricidade* (Fig. 5A) é determinada pela variação no formato da órbita da Terra de uma trajetória mais próxima da circular (excentricidade curta) a mais elipsoidal (excentricidade longa), com períodos característicos de ~ 100 ka e 405 ka, e outros como, 95, 99,125, 131 e 2400 ka (Hinnov e Hilgen, 2012, Kodama e Hinnov, 2015), de acordo com a seguinte relação:

$$e = \frac{(a^2 - b^2)^{\frac{1}{2}}}{a}$$

onde a e b correspondem, respectivamente, aos semieixo maior e menor da órbita terrestre e b ao semieixo menor.

A *obliquidade* (ϵ) (Fig. 5B) é definida pela mudança de inclinação do eixo da Terra em relação ao seu plano orbital, com período médio atual de 41 ka e outros períodos

de 54 mil, 40 mil, e 29 mil anos, e determina a distribuição latitudinal da incidência solar (Hinnov e Hilgen, 2012, Kodama e Hinnov, 2015).

$$\epsilon = \epsilon^* + \sum A_i \cos(f_i t + \delta_i)$$

onde ϵ^* corresponde ao termo independente, A_i as amplitudes, f_i as frequências seculares e δ_i a fase fundamental.

A *precessão*, resultado da variação da direção do eixo de rotação da Terra (Fig. 5C), é determinada pela variação da eclíptica em relação ao equador celeste (precessão axial), e pela rotação do semieixo maior da órbita da Terra que realiza um movimento anti-horário (precessão apsidal) (Berger e Loutre, 1994). O índice de precessão representa os efeitos combinados da excentricidade orbital e da precessão axial da Terra na distância entre o Sol e a Terra com períodos principais de 23 ka, 22 ka, 19 ka e 18 ka (Hinnov e Hilgen, 2012, Kodama e Hinnov, 2015).

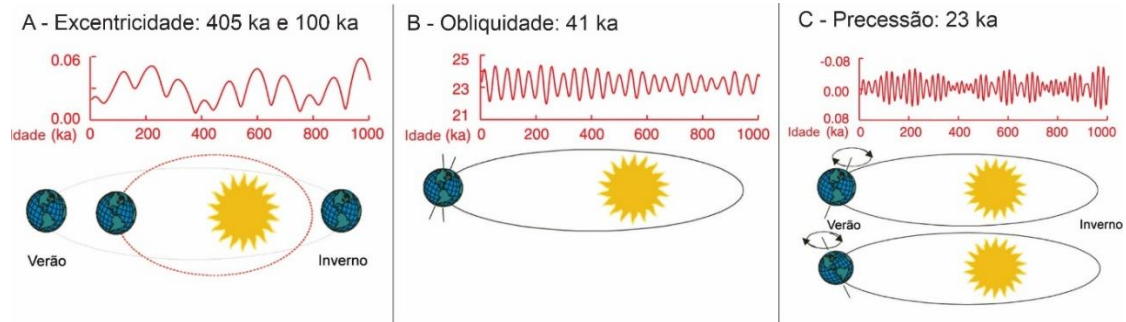


Figura 5: Representação esquemática dos ciclos de Milankovitch: A – Excentricidades longa e curta; B – Obliquidade; C - Precessão (modificado de Zachos et al., 2001).

Uma ressalva importante para a descoberta das periodicidades dos ciclos de Milankovitch está na compreensão de que as mesmas não se mantiveram estáveis ao longo de bilhões de anos (Berger et al., 1989; Berger et al., 1992; Weedon, 2003; Hinnov e Hilgen, 2012; Hinnov, 2013). Variações seculares em fatores astrodinâmicos e geofísicos de longo prazo, como difusão caótica do Sistema Solar, a dissipação de maré do sistema Terra-Lua, a elipticidade dinâmica da Terra e o atrito climático, podem ter influenciado as frequências e fases dos parâmetros astronômicos (Hinnov e Hilgen, 2012). Apesar da investigação buscar os bilhões de anos no passado, as frequências foram calculadas para os últimos ~500 Ma por ser um período com um modelo da Terra e dados disponíveis. As mudanças na taxa de rotação, por exemplo, apresentaram uma

desaceleração mais proeminente no referenciado período (Berger et al., 1989; Hinnov e Hilgen, 2012). A desaceleração rotacional da Terra, resultado da dissipação de maré do sistema Terra-Lua e do aumento gradual da distância entre esses corpos celestes, e a sua elipticidade dinâmica causaram um aumento na taxa de precessão, e por sua vez nas periodicidades da obliquidade e no índice de precessão (Hinnov, 2013). O percentual de variação das periodicidades associadas à obliquidade e à precessão é relativamente baixo ao longo de intervalos de aproximadamente 100 milhões de anos. Dessa forma, na análise de registros estratigráficos que abrangem escalas temporais da ordem de dezenas de milhões de anos, os períodos médios desses ciclos podem ser assumidos como praticamente constantes (Weedon, 2003).

Apesar do comportamento caótico do sistema solar ter, muito provavelmente, influenciado a excentricidade curta da Terra (~100 ka), o ciclo orbital de 405 mil anos permaneceu notavelmente estável por pelo menos aproximadamente 250 milhões de anos no passado geológico (Laskar et al., 2004, Laskar et al., 2011; Hinnov e Hilgen, 2012). Esse ciclo, caracterizado por sua alta amplitude, resulta das interações gravitacionais entre os planetas Júpiter e Vênus, particularmente relacionadas aos deslocamentos de seus periélios orbitais. A estabilidade desse ciclo deve-se, principalmente, à grande massa de Júpiter, que exerce um papel crucial na manutenção dessa regularidade, embora exista uma margem de incerteza estimada em cerca de 500 mil anos para eventos ocorridos há 250 milhões de anos. Devido à essa estabilidade, o ciclo de 405 mil anos é amplamente utilizado como uma base de calibração temporal em estudos de ciclostratigrafia (Laskar et al., 2004; Laskar et al., 2011; Hinnov e Hilgen, 2012).

3.3. A escala de tempo astronômica (ATS) e suas contribuições para arcabouços cronoestratigráficos

A Escala de Tempo Astronômica (ATS – *Astronomical Time Scale*) é uma escala temporal de alta resolução (0,02-0,4 milhões de anos) resultado da calibração da idade geológica dos depósitos sedimentares às periodicidades dos ciclos de Milankovitch. Ela representa um dos avanços mais relevantes na Cronoestratigrafia e na Geocronologia modernas (Hinnov e Hilgen, 2012; Hinnov, 2013; Wu et al., 2013). A calibração astronômica corresponde ao processo de ajuste de uma série de dados provenientes de proxies paleoclimáticos registrados em sucessões sedimentares a soluções astronômicas de longo prazo. Esse procedimento fundamenta-se na análise da relação de proporcionalidade entre frequências predominantes identificadas nos espectros de potência, partindo do pressuposto de que os movimentos orbitais da Terra mantiveram

estabilidade suficiente ao longo do intervalo temporal considerado. As assinaturas orbitais, assim reconhecidas nos registros geológicos, permitem ancorar a escala de tempo com elevado grau de precisão (Hinnov e Hilgen, 2012; Hinnov, 2013).

O padrão dos resultados gerados pela astrocronologia depende da preservação dos processos oriundos de força orbital nas séries de dados ao longo de dezenas de milhões de anos. Por isso, é necessária a compreensão de que os modelos astronômicos, resultado de robusta análise das periodicidades dos parâmetros orbitais ao longo tempo, são acurados até ~50 Ma no passado geológico. Após esse período, as interações mútuas entre os planetas perturbam suas órbitas causando um desvio difuso na frequência dos ciclos (Laskar et al., 2004; Laskar et al., 2011; Waltham, 2015). No entanto, como mencionado anteriormente, a estabilidade do ciclo de 405 ka, possibilita investigar periodicidades em um passado mais remoto. A ATS é bem definida para o Cenozóico e parte do Mesozóico, porém, pouco explorada para a era Paleozóica pelos escassos dados geocronológicos de alta precisão (Wu et al., 2012; Hinnov, 2013; Wu et al., 2013).

A calibração astronômica permite uma melhor compreensão da relação entre as variações orbitais da Terra, mudanças climáticas e as respostas dos sistemas deposicionais ao longo do tempo, aprimorando a resolução de arcabouços geocronológicos (Hilgen et al., 2004; Strasser et al., 2006; Meyers, 2019; Heydt, 2020). Problemas fundamentais nas Ciências da Terra também podem ser resolvidos com uma escala de tempo de alta resolução, como a origem das sequências sedimentares de terceira ordem e o nível do comportamento caótico do Sistema Solar (Hilgen et al., 2006). As análises ciclostratigráficas permitem também que intervalos sem datação radioisotópica sejam restaurados, validados e aprimorados com cronologia de alta precisão, tornando a astrocronologia uma ferramenta importante nas Geociências (Hinnov, 2013).

4. Procedimentos e Métodos

4.1. Base de dados

As análises cicloestratigráficas foram realizadas com base em registros de raios gama (GR) obtidos a partir de furos de sondagem, cujos dados estão publicamente disponíveis por meio da Agência Nacional do Petróleo (ANP) (<https://reate.cprm.gov.br/anp/TERRESTRE>). Conforme apresentado no capítulo sobre o contexto geológico, três poços foram escolhidos para a análise de dados de duas sequências deposicionais de terceira ordem. Os poços 1 e 2 estão localizados em uma porção mais proximal da bacia, enquanto o poço 3 está situado em uma área transicional. Todos os poços estão inseridos em contextos deposicionais associados a ambientes flúvio-estuarinos. As séries de dados foram segmentadas de acordo com os limites das sequências deposicionais identificadas. Para os poços 1 e 2, as espessuras das sequências 2 e 3 correspondem a 128 m e 94 m, respectivamente. Já no poço 3, essas espessuras são de 155 m e 175 m. A taxa média de amostragem dos dados de GR analisados é de aproximadamente 0,20 m, o que permite uma resolução adequada para as interpretações cicloestratigráficas propostas. A seleção dos poços foi subsidiada por um arcabouço estratigráfico robusto, estabelecido por Melo et al. (2019), e considerou múltiplos critérios, incluindo o contexto paleoambiental e paleodeposicional, a disposição espacial dos poços na bacia, os dados bioestratigráficos e a qualidade dos registros disponíveis. Nas Figuras 6 e 7, observa-se a distribuição das sequências descritas por Melo et al. (2019), bem como sua geometria deposicional e os tratos de sistemas associados, dispostos em orientação *dip*.

O *proxy* utilizado quantifica a intensidade da radiação emitida pela decomposição de núcleos atômicos de elementos radioativos como o potássio-40 (^{40}K), tório-232 (^{232}Th) e urânio-238 (^{238}U), presentes em rochas sedimentares. Essa intensidade varia de acordo com a composição dos sedimentos e os elementos radioativos que eles emitem. Rochas ricas em argila tendem a apresentar altos valores de GR, enquanto rochas arenosas e carbonáticas geralmente exibem valores mais baixos (Wu et al., 2009; Wu et al., 2013; Gong, 2021). Deste modo, uma vez que as variações litológicas devem refletir mudanças

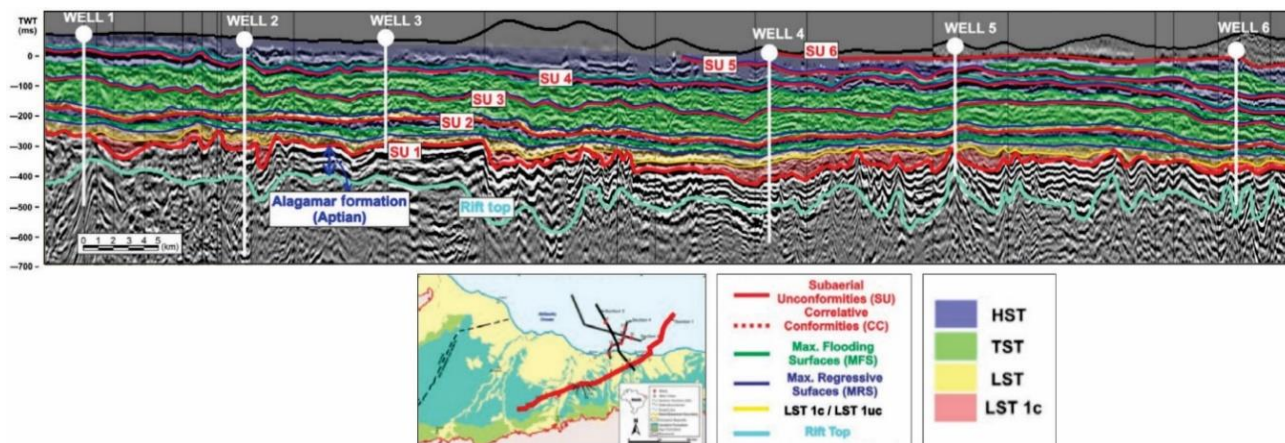


Figura 6: Seção sísmica *onshore* das seqüências de terceira ordem (DS 1 a D5) da Sequência Marinha Transgressiva da fase Drifte da Bacia Potiguar. Poços 3 e 4 correspondem aos poços 1 e 2 deste estudo, respectivamente (modificado de Melo et al., 2019).

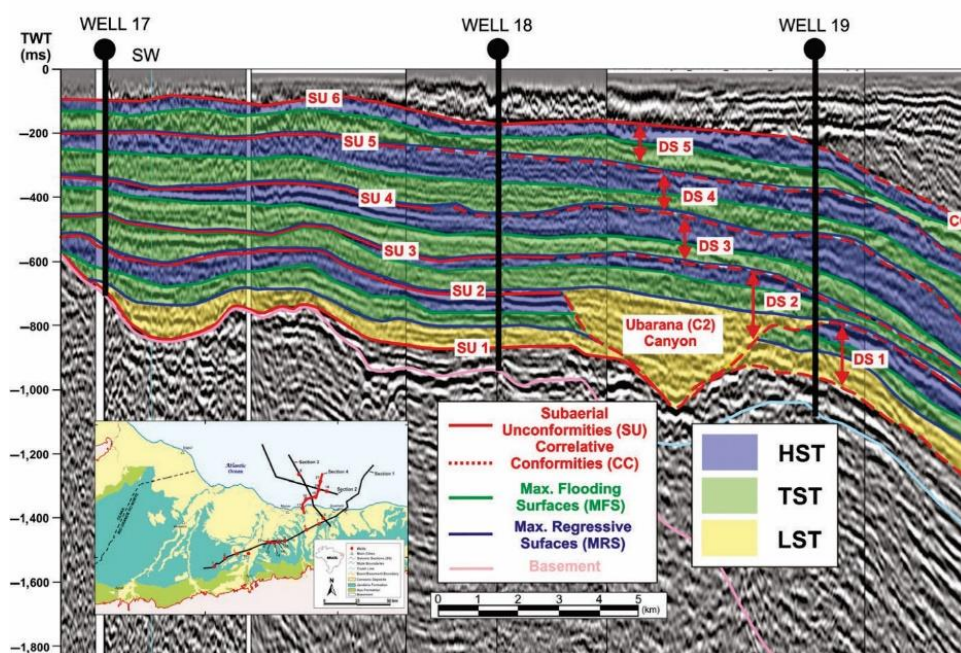


Figura 7: Seção sísmica transicional das seqüências de terceira ordem (DS 1 a D5) da Sequência Marinha Transgressiva da fase Drifte da Bacia Potiguar. Poços 17 corresponde ao poço 3 deste estudo (modificado de Melo et al., 2019).

paleoambientais e paleoclimáticas, o GR é amplamente utilizado como um proxy físico na análise cicloestratigráfica, oferecendo uma ferramenta eficaz para inferir variações ligadas à forçagem astronômica (Li et al., 2019; Peng et al., 2024; Wang et al., 2024).

4.2. Análises Cicloestratigráficas

Padrões quase-periódicos registrados em sucessões sedimentares podem ser identificados por repetições consecutivas de diferentes litologias ou pela variação na espessura dos estratos dentro de uma mesma litologia. Tais padrões podem surgir como resultado de processos episódicos ou cíclicos, e refletem oscilações ambientais controladas por uma ampla gama de variáveis. Dentre essas, destacam-se variáveis químicas, físicas, paleontológicas e sedimentológicas, que podem responder de forma sensível a mudanças no sistema deposicional (Schwarzacher, 1993; Sinnesael et al., 2019). Um dos principais mecanismos reconhecidos como gerador de tais padrões cíclicos é a forçante orbital, relacionada às variações nos parâmetros da órbita terrestre (precessão, obliquidade e excentricidade), que afetam o clima e, por consequência, os processos de sedimentação.

Nesse contexto, o estudo de padrões estratigráficos cíclicos pode ser abordado com o auxílio de métodos quantitativos baseados em séries temporais. Segundo Weedon (2003), uma série temporal é definida como qualquer sequência de medições ou observações organizadas em uma ordem específica, geralmente com intervalos regulares em uma determinada escala, como tempo geológico, espessura acumulada de rochas ou distância. Portanto, uma sucessão sedimentar composta por camadas superpostas em ordem estratigráfica pode ser tratada como uma série temporal, especialmente quando há evidências de repetição sistemática.

A análise quantitativa dessas séries permite a identificação de ciclos potencialmente associados à forçante astronômica, ampliando a capacidade de interpretação dos processos sedimentares e sua relação com mudanças climáticas passadas. As ferramentas aplicadas nesse tipo de investigação, conhecidas como métodos de análise de séries temporais, incluem transformadas espectrais e outros algoritmos estatísticos que permitem quantificar a frequência e a amplitude dos ciclos observados nos dados estratigráficos (Schwarzacher, 1975; Weedon, 2003). Tais abordagens são fundamentais para a cicloestratigrafia moderna, que busca integrar registros sedimentares com escalas de tempo precisas e refinadas.

4.2.1. Análise espectral e harmônica evolucionária para série de dados no domínio da estratigrafia

Uma das etapas fundamentais na análise de séries temporais aplicadas à cicloestratigrafia é a geração do espectro de potência, que permite identificar

componentes periódicas ou quase-periódicas presentes nos dados. Essas componentes manifestam-se como picos no espectro, cuja significância é avaliada estatisticamente com base na comparação com um modelo de hipótese nula — ou seja, um modelo que representa a distribuição esperada dos dados na ausência de periodicidade (ruído). Picos que se destacam significativamente desse modelo são interpretados como evidências de ciclos potencialmente relacionados a forçantes orbitais ou a outros mecanismos cíclicos de controle sedimentar.

Neste trabalho, as análises de séries temporais foram realizadas por meio do software *Acycle* (Li et al., 2019a). O arquivo de entrada é um arquivo do tipo *.txt* contendo as medidas de GR para cada profundidade. Antes da etapa de análise espectral, realiza-se o pré-processamento dos dados, em que os mesmos são uniformizados e interpolados, gerando um espaçamento uniforme para a série. Posteriormente, é realizada uma remoção de tendências irregulares de alta amplitude (Li et al., 2019a), que, neste estudo, optou-se por uma remoção linear, com exceção da Sq 2 do poço 3 onde foi aplicado o LOESS 60% (*Locally estimated scatterplot smoothing*, em inglês). Essa abordagem específica teve como objetivo remover comprimentos de onda irregulares e de alta amplitude causados pelo alto teor de argila na base, os quais interferiam na detecção do sinal orbital.

Sequencialmente, a investigação de periodicidades e identificação dos sinais astronômicos foi realizada através de análises espectrais, que estabelecem uma distribuição das variações da série temporal (potência) no domínio da frequência (Schwarzacher, 1993; Kodama e Hinnov, 2015). O Método Multi-taper (MTM, Thomson, 1982) foi usado como estimador espectral, utilizando dois *tapers* de 2π e múltiplas janelas que minimizam o vazamento espectral em comparação com a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Essa abordagem, testada contra um modelo nulo de ruído vermelho baseado em um processo autorregressivo de primeira ordem (AR (1)) (Mann e Lees, 1996), permite estimar os níveis de confiança para picos periódicos, com limiares definidos em 90%, 95% e 99% (Li et al., 2019a).

A análise espectral harmônica evolucionária (EHA) através do método da Transformada Rápida de Fourier (FFT) (Kodama e Hinnov, 2015), é utilizada para analisar o comportamento dos padrões das frequências ao longo da estratigrafia, os quais refletem as variações nas taxas de sedimentação ao longo do registro sedimentar estudado. Este método é aplicado para estimar o conteúdo de frequência do *proxy* investigado a partir de uma janela móvel de profundidade/tempo. Portanto, definir o tamanho da janela

a ser analisada é fundamental, pois se a janela for muito longa suprimirá as periodicidades refletidas por frequências mais altas (e.g. precessão), enquanto uma janela muito curta pode não estimar com precisão ciclos de periodicidade mais longa (e.g., excentricidade) (Kodama e Hinnov, 2015; Hinnov, 2016; Li et al., 2019). A análise em conjunto de ambos os métodos (MTM e EHA) permite rastrear o sinal e definir quais frequências influenciaram o registro deposicional, e que correspondem a sinais orbitais conhecidos, como: excentricidade longa (E), excentricidade curta (e), obliquidade (O) e precessão (P).

A identificação das forçantes orbitais por meio do espectro de potência tem início com a detecção de picos espectrais cujas frequências são compatíveis com aquelas previstas por modelos astronômicos para os ciclos orbitais em uma determinada idade geológica. Com base no modelo La2004 (Laskar et al., 2004), para a idade de ~ 94 Ma (relativa à idade média do intervalo geológico de deposição das sequências estudadas - Cenomaniano Inferior/Turoniano Superior; Melo et al., 2019), a taxa espectral esperada é de $405:125:95:39,1:23,0:18,5 = 21,8:6,7:5,1:2,1:1,2:1$.

As sequências alvo deste estudo (Sq 2 e Sq 3) foram preliminarmente analisadas de modo contínuo com o intuito de avaliar o registro de forçantes orbitais nas séries de dados. Entretanto, como há importantes limites de sequência a serem considerados, as sequências foram analisadas separadamente, de modo independente. Considerando que ambas as sequências representam depósitos associados a ambientes de contexto deposicional semelhante, é natural que os registros de ciclicidade sejam comparáveis entre elas. Nesse sentido, a existência de um arcabouço estratigráfico robusto foi fundamental para determinar a estratégia de análise e garantir a coerência na interpretação dos sinais preservados.

4.2.2. Procedimentos para estimativa de taxas médias de acumulação (COCO / eCOCO)

Após a identificação das periodicidades, é essencial realizar uma análise estatística que relacione os dados a uma solução astronômica adequada ao intervalo de tempo estudado. Essa etapa permite avaliar se as taxas de acumulação sedimentar estimadas são compatíveis com os comprimentos de onda das forçantes orbitais reconhecidas no registro geológico. Um dos métodos comumente utilizados para essa finalidade é o coeficiente de correlação evolutiva (COCO), que quantifica a correspondência entre o modelo astronômico (no domínio do tempo) e os espectros de potência obtidos a partir dos dados de proxy (no domínio da profundidade), por meio da variação de uma faixa de taxas de acumulação sedimentar (SARs, na sigla em inglês) (Hinnov &

Hilgen, 2012; Dinarès-Turell et al., 2014). O pico máximo do coeficiente de correlação indica a taxa de sedimentação mais provável, ou seja, aquela que melhor alinha os sinais observados com os padrões previstos pela solução astronômica (Li et al., 2018c; Li et al., 2019a).

Para que seja possível testar a origem astronômica dos ciclos registrados, estimar SARs e ajustar as calibrações astronômicas, são realizadas análises de otimização da escala temporal e de correlação. Através da análise evolucionária do coeficiente de correlação (eCOCO) é possível avaliar as taxas variáveis de acumulação de sedimentos por meio de uma janela móvel (Li et al., 2018). O coeficiente de correlação mais elevado é resultado da taxa de sedimentação mais provável. A hipótese de ausência de uma forçante astronômica (hipótese nula, H_0) indica a probabilidade de um valor específico do coeficiente de correlação ocorrer por acaso.

As análises eCOCO realizadas neste trabalho foram conduzidas considerando-se 2000 simulações de Monte Carlo, com adicional aplicação um modelo autorregressivo de primeira ordem (AR (1)) clássico, e remoção de ruído vermelho. A janela móvel utilizada para a análise eCOCO foi definida entre 34 m e 45 m, dependendo da série analisada. Para validar as SARs obtidas, é importante comparar com valores reportados na literatura para ambientes deposicionais semelhantes ao do presente estudo. Essa comparação ajuda a verificar se os resultados fazem sentido dentro do contexto geológico esperado e se estão de acordo com o que já foi observado em casos análogos (Liu et al., 2020; Yang et al., 2021; Lanci et al., 2022).

4.2.3 *Isolamento da componente sinusoidal associada à excentricidade longa*

A filtragem é uma técnica amplamente empregada na cicloestratigrafia e em diversas áreas das geociências, sendo uma abordagem eficaz para manipular séries temporais e modificar o conteúdo no domínio das frequências (Weedon, 2003). O processo ocorre em três etapas: inicialmente, a série temporal é transformada para o domínio da frequência por meio da transformada de Fourier; em seguida, o conteúdo em frequência obtido é multiplicado pelo filtro; por fim, a transformada de Fourier inversa é utilizada para reconverter os dados ao domínio do tempo (Kodama, 2014). O propósito principal é remover as frequências indesejadas das séries de dados. Para isso, os métodos mais comuns utilizados são os filtros passa-alta, passa-baixa e passa-banda. O filtro passa-alta elimina as frequências mais baixas abaixo de um determinado limite, enquanto o passa-baixa remove as frequências superiores a um valor específico. Já o filtro passa-

banda permite apenas a passagem das frequências dentro de um intervalo definido, descartando aquelas que estão fora dessa faixa.

Neste estudo, foi aplicado um filtro passa-banda gaussiano, determinado a partir das bandas de frequência associadas aos ciclos de excentricidade longa verificadas pelas análises das séries de dados, permitindo assim o isolamento da componente desejada. Através dessa ferramenta, torna-se possível estimar o intervalo de tempo entre as sequências 2 e 3 do intervalo Cenomaniano-Turoniano da Bacia Potiguar, ainda não estabelecido, e construir uma FATS.

4.3 Análise de Filtro de Previsão de Erro Integrado

A análise de Filtro de Previsão de Erro Integrado, seu acrônimo em inglês INPEFA, é uma técnica geofísica utilizada como método auxiliar na correlação entre poços, salientando tendências na sedimentação no contexto da estratigrafia (Zulivandama, 2018; Nainggolan, 2019; Liu et al, 2024). A curva INPEFA é obtida através do processamento integral específico da curva de análise do erro de previsão (PEFA). A curva PEFA utiliza o cálculo autorregressivo (AR) baseado na diferença entre o valor de previsão e o valor original do dado de entrada, conhecido como de erro de previsão (Equação 1). Dessa forma eventos "imprevisíveis" identificados podem ser interpretados como hiatos deposicionais, posteriormente caracterizados como limites de sequência ou alguma superfície relativa à mesma (Zulivandama, 2018).

A equação do erro de previsão pode ser escrita da seguinte forma:

$$e_n = y_n - \sum_{i=1}^p C_i y_{n-i} \quad (1)$$

em que, para cada amostra, o erro de previsão (e_n) - ruído aleatório na posição n correspondente à parcela não previsível - é a diferença entre o dado real (y_n) e a parcela prevista (somatório). No somatório, o termo é a combinação linear das p amostras anteriores (y_{n-i}) ponderadas pelos coeficientes C_i e correspondem à parcela previsível do modelo. Nesse trabalho, os coeficientes C_i são calculados pelo método de mínimos quadrados considerando-se simultaneamente as previsões progressivas e retrógradas. Essa abordagem é chamada de método de Burg (Nainggolan, 2019; Yuan et al. 2018; Zulivandama, 2018).

O número de coeficientes de previsão (C_i) determina o tamanho do filtro (~10 m na literatura – Ni et al, 2005; De Jong, 2007; Enres, 2011; Qayyum and Smith, 2014), que na prática, não muda significativamente a previsão, mas limita a aplicação da previsão nas bordas da série por um comprimento igual ao tamanho do filtro (Qayyum and Smith, 2014). Como o PEFA tem aplicação limitada devido à dificuldade de interpretar hiatos em séries com conteúdo de alta frequência e sujeitas a ruído (Ni et al, 2005; De Jong, 2007; Enres, 2011; Qayyum and Smith, 2014), para contornar o problema, utiliza-se o cálculo da curva INPEFA (Equação 2).

$$INPEFA(t) = \sum_{i=1}^t e_i \quad (2)$$

em que se faz a integração numérica (soma corrida) das amostras do erro de predição (e_n) desde a amostra 1 até a amostra t . Durante o processamento do dado é possível gerar curvas em diferentes faixas de frequências. Nesse estudo, a curva de baixa frequência ocorre no INPEFA aplicado ao dado sem remoção de tendência, e a curva de mais alta frequência é processada utilizando o dado de entrada com a remoção LOWESS 5%.

No contexto da estratigrafia de sequências, a técnica da soma corrida (INPEFA) aplicada aos dados gera uma curva que destaca tendências ao longo do perfil. Tendências ascendentes na curva, geralmente associadas a altos valores de GR (erros positivos), indicam fases transgressivas, enquanto tendências descendentes, relacionadas a baixos valores de GR (erros negativos), correspondem a fases regressivas (Nio et al., 2005; De Jong, 2007; Yuan et al., 2018; Nainggolan, 2019). Os pontos de transição entre essas tendências, representados por inflexões na curva, marcam mudanças significativas no padrão deposicional e podem ser identificados por inversões na direção da curva — de negativa para positiva ou de positiva para negativa (Liu et al., 2024).

5. Manuscrito: “CYCLOSTRATIGRAPHY OF FLUVIO-ESTUARINE DEPOSITS IN THE POTIGUAR BASIN DURING THE CENOMANIAN-TURONIAN INTERVAL”

Os resultados desta dissertação estão apresentados na forma de um artigo científico submetido ao periódico *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (ver capítulo 6). O estudo investiga a influência das forçantes orbitais sobre os depósitos flúvio-estuarinos da Formação Açu, na Bacia Potiguar, por meio de análises ciclostratigráficas de duas sequências de terceira ordem, aplicadas a perfis de raios gama de três poços. A pesquisa concentra-se na identificação de ciclos orbitais, na correlação entre os poços e na construção de uma escala de tempo astronômica flutuante para o intervalo Cenomaniano-Turoniano. Essa abordagem contribui para o refinamento da cronoestratigrafia em bacias sedimentares e amplia o entendimento sobre a preservação de sinais orbitais em sistemas deposicionais dinâmicos.

CYCLOSTRATIGRAPHY OF FLUVIO-ESTUARINE DEPOSITS IN THE POTIGUAR BASIN DURING THE CENOMANIAN-TURONIAN INTERVAL

Evelyn Paiva do Nascimento^{1*}, Mariane Candido¹, Daniel Ribeiro Franco¹, Carolina Gonçalves Leandro¹, Natália Braun dos Santos¹, Raysa de Magalhães Rocha¹, Gabriella Fazio¹, Bernardo Moka Maffessoni¹, Mateus Michelin², Jhon Willy Lopes Afonso^{1,5}, José Alejandro Moreno Alfonso¹, Daniel Galvão Carnier Frago^{2,3,4}, Anderson H. Melo²; Joice Cagliari⁶, Mariana Aragão Fernandes¹, Ciro Climaco Rodrigues².

¹ Observatório Nacional, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

² Petrobras, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

³ Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG), Belo Horizonte, MG, Brazil.

⁴ Laboratório de Estudos Tectônicos (LESTE), Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina, MG, Brazil.

⁵ Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, Campinas, SP, Brazil.

⁶ Geology Graduate Program, Unisinos University, São Leopoldo, RS, Brazil.

*e-mail: evelynnascimento@on.br

ABSTRACT

Exploratory sedimentary basins require continuous chronostratigraphic refinement, which is especially challenging for transitional environmental settings due to the complex and dynamic erosional processes of fluvial-estuarine systems, which often obscure depositional records. In this context, the fluvio-estuarine deposits of the Açu Formation (Potiguar Basin, northeastern Brazil) – which reveals well-preserved T-R cycles that can be traced laterally for tens of kilometers - poses a special opportunity for cyclostratigraphic - based chronostratigraphic framework studies. In this work, we provided a cyclostratigraphic study for investigating whether these transitional fluvio-estuarine reveal an orbitally-forced origin by means of three gamma-ray well-log datasets, targeting two third-order sequences spanning the Albian-Cenomanian boundary to the Turonian (~101–90 Ma). Our analysis revealed the record of Milankovitch spectral content which resembles the spectral ratios predicted for Cenomanian/Turonian times. A statistical estimate of optimal sediment accumulation rate based on the observed orbital parameters (3 - 8 cm/kyr) is consistent with similar depositional environments. After auxiliary tests by means of Integrated Prediction Error Filter Analysis, which allowed us to recognize trends in the sedimentary record and improved the recognition of corresponding cycles, we proposed a floating Astronomical Time Scale for the Cenomanian-Turonian interval by means of and timespan estimates for the three wells. Given that the preservation of orbital signals in fluvio-estuarine environments is uncommon - thus limiting the number of cyclostratigraphic studies - this research provides valuable insights into orbital signal behavior and basin infill dynamics in such depositional settings.

Keywords: Milankovitch cycles; Astronomical Time Scale; fluvial deposits; exploratory basins; Brazilian equatorial margin.

1. Introduction

Over the past decade, cyclostratigraphic studies have gained increasing prominence in the analysis of sedimentary sequences, enhancing our understanding of the processes governing basin infill and, consequently, the development of the stratigraphic framework (e.g., Batenburg et al., 2012; Franco et al., 2012; Wu et al., 2013; Kietzmann et al., 2015; Liu et al., 2017; Bao et al., 2018; Pas et al., 2018; Zhang et al., 2019; Leandro et al., 2022; Shi et al., 2022). Because sedimentary environments evolve in response to

long-term climatic variations, patterns of sedimentary cyclicity may capture the influence of astronomical forcing, even in environmental settings considered unconventional – as fluvial-estuarine systems, which naturally reflect intense erosional processes.

A number of studies have been discussed in literature on the orbitally-forced record associated to fluvial deposits (e.g., Abels et al., 2013; Wang, 2024). Lanci et al. (2022) investigated sediment deposition variability at an orbital scale in the Karoo Basin (Middle Permian) and identified a case of a fluvial sequence with significant orbitally-forced allogenic control, characterized by mudstone and siltstone layers interbedded with fluvial channel-fill sandstones. Laurin et al. (2024) also identified astronomically-driven sedimentation on the fluvial system of the Upper Silesian Basin (Middle to Upper Pennsylvanian), characterized by the alternation between sand-dominated braidplain and confined streams with extensive floodplain deposits.

Recently, Wang et al. (2024) conducted a comprehensive assessment using stochastic sedimentation modeling to evaluate the preservation of orbital signal in sedimentary records. The authors concluded that long-eccentricity cycles (~405 kyr) – which are considered highly stable over geological timescales and have been successfully applied in astronomical calibration (Kent et al., 2018; Meyers, 2019) – are generally detectable across most model scenarios, including those with highly unstable sedimentation such as fluvial and deltaic environments. In contrast, shorter-period cycles, such as obliquity and precession, were found to be less consistently expressed, underscoring the need for comprehensive stratigraphic approaches and integrating data to support robust cyclostratigraphic interpretations.

In this context, the main reservoir rocks of the Potiguar Basin (northern Brazil; Fig. 1) – one of the largest Brazilian hydrocarbon exploratory basins – are associated with fluvio-estuarine environments comprised by the Açu Formation (Vasconcelos et al., 1990; Melo et al., 2019; 2021), which provide a valuable opportunity for cyclostratigraphic analysis in fluvial settings. The study area benefits from a well-established stratigraphic framework, and the sequences analyzed exhibit lower-order cycles with characteristic lateral continuity, indicative of allogenic control.

In this study, we investigate orbital-scale quasi-periodic imprints that may have influenced the deposition of two third-order sequences (Sq 2 and Sq 3) within the Transgressive Marine Sequence of the Açu Formation, based on data from three wells (Wells 1, 2, and 3) spanning the Cenomanian–Turonian interval (~101 to 90 Ma). The objective is to improve our understanding of allogenic controls on sedimentation, refine inter-well correlations, and estimate the duration of the preserved stratigraphic record

through the development of a floating Astronomical Time Scale (FATS) for the Cenomanian–Turonian, thereby contributing to the refinement of the chronostratigraphic framework of the Potiguar Basin.

2. Geological setting

2.1. Potiguar Basin

The Potiguar Basin, located along the equatorial margin of northeastern Brazil, spans portions of the states of Rio Grande do Norte and Ceará (Matos, 1999; Pessoa Neto et al., 2007; Santos, 2009). It is bounded offshore to the north by the 2,000 m isobath, and on its eastern, western, and southern margins by the crystalline basement (Fig. 1). The basin covers an area of approximately of 48,000 km², with about 45% onshore and 55% offshore. The maximum thickness of its sedimentary fill reaches approximately 6,000 meters (Bertani et al., 1990; Matos, 1992; Pessoa Neto et al., 2007).

The Potiguar Basin was formed during the Cretaceous, in the context of the Gondwana supercontinent breakup that led to the opening of the South Atlantic Ocean (Matos, 1987; Matos, 2000; De Castro et al., 2012). It is subdivided into three major tecno-sedimentary supersequences: (1) rift (Late Berriasian to Early Aptian); (2) post-rift (Late Aptian to Early Albian); and (3) passive margin or drift (Albian to Holocene) (Pessoa Neto et al., 2007) (Fig. 2). The rift supersequence comprises two phases (rift I and rift II) and is represented by the Pendência and Pescada Formations (Berriasian to Early Aptian), characterized by fluvio-deltaic and lacustrine deposits. The post-rift supersequence also includes fluvio-deltaic sediments and the earliest marine incursion records, represented by the Alagamar Formation. In contrast, the drift supersequence consists of a transgressive fluvio-marine succession of Albian-Campanian age (Açu, Ponta do Mel, Quebradas, and Jandaíra Formations) - the main target of this study - overlain by a regressive clastic and carbonate succession (Ubarana, Tibau, and Guamaré Formations) of Campanian to Holocene age (Pessoa Neto et al. 2007).

The transgressive succession comprises sandstones and mudstones of fluvio-estuarine origin, represented by the Açu Formation (the main hydrocarbon reservoir of the basin), as well as carbonate platform deposits from the Jandaíra and Ponta do Mel

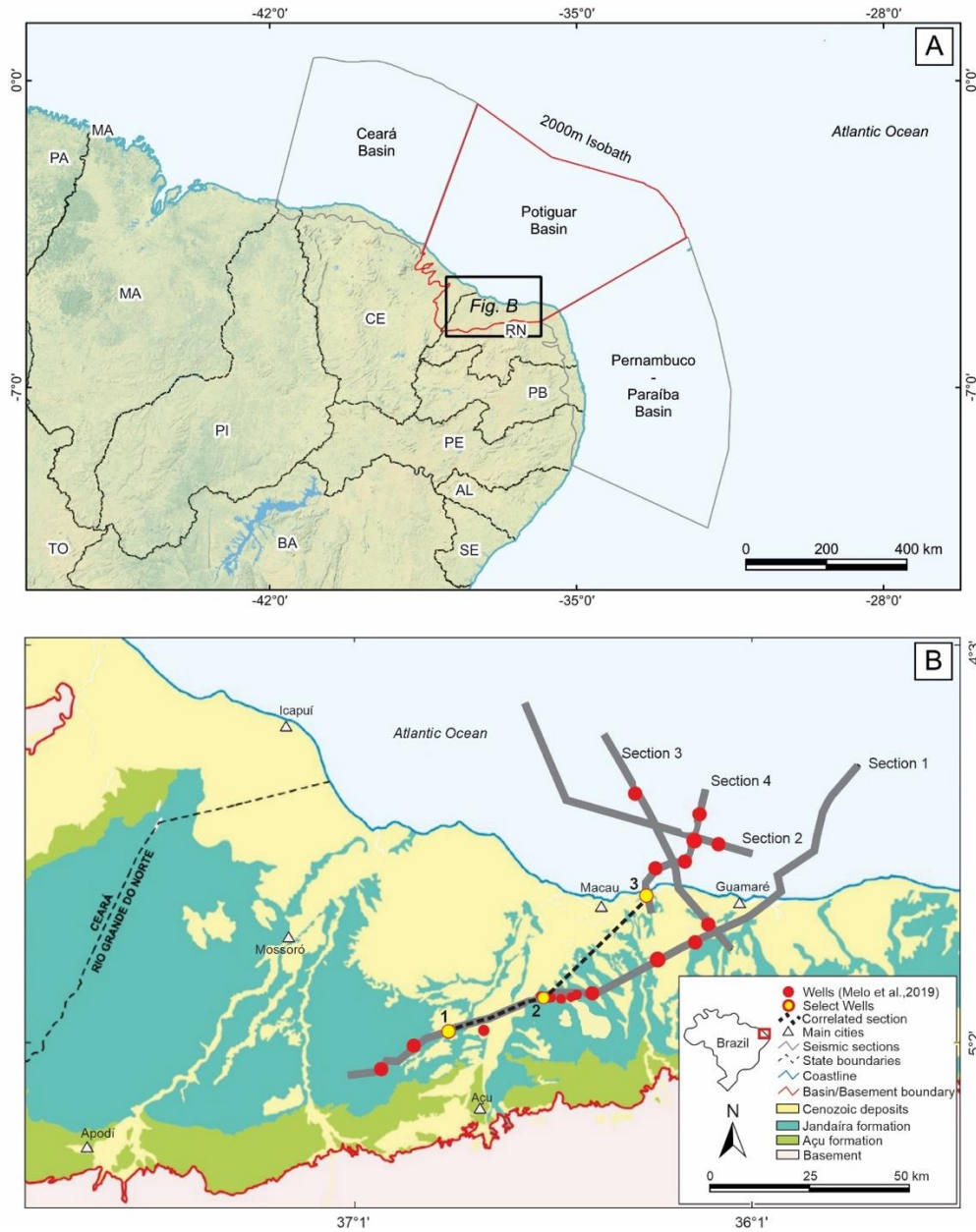


Figure 1: Overview of the Potiguar Basin with a detailed inset highlighting the regional map, including the wells and seismic sections analyzed by Melo et al. (2019).

formations, and marine shale and turbidites associated with the Quebradas Formation. This interval also includes well-developed submarine canyons (Tibana and Terra, 1981; Castro et al., 1986). The Açú Formation overlies the Alagamar Formation across an erosional unconformity and, toward the basin depocenter, it intercalates with the Quebradas and Ponta do Mel formations (Araripe and Feijó, 1994).

The depositional framework of the Albian-Campanian interval in the Potiguar Basin has been recently refined and reinterpreted by Melo et al. (2019; 2021) based on seismic profiles, well data, and biostratigraphic data. The authors subdivided the transgressive drift phase into five third-order depositional sequences. In the present study, we focus on the stratigraphic interval corresponding to two of these sequences -

Sequences 2 and 3 of Melo et al. (2019) (Fig. 2) – which are bounded by subaerial unconformities.

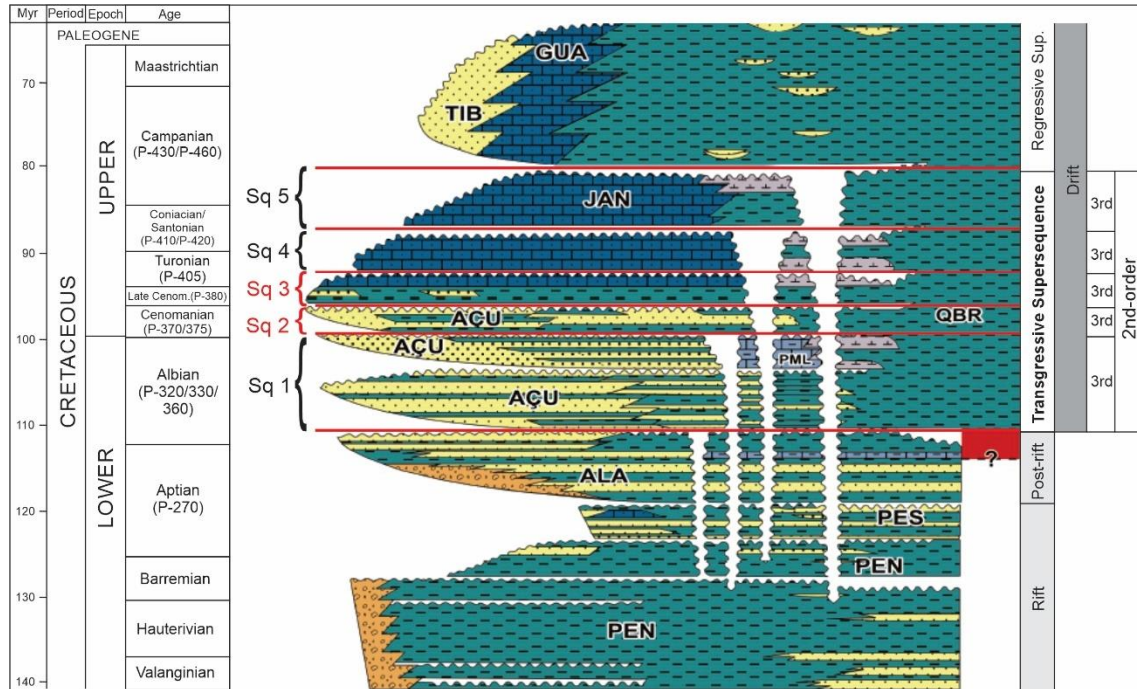


Figure 2: Stratigraphic chart of the Potiguar Basin, highlighting the studied interval (Sq 2 and Sq 3, in red). Modified from Pessoa Neto et al. (2007).

2.2. Study area

The study area is located in the eastern onshore portion of the Potiguar Basin and includes three wells aligned along a dip-oriented section: Well 1 (W1), Well 2 (W2), and Well 3 (W3), within a broad zone of hydrocarbon fields (Bagnoli, 1992; Castro, 1992) (Fig. 1). These wells are included in sequence stratigraphic framework of Melo et al. (2019), corresponding to Wells 3, 4 and 17 in their study, respectively. The interval analyzed corresponds to the third-order depositional sequences Sq 2 and Sq 3, as previously noted, which are bounded by subaerial unconformities SU2, SU3, and SU4 (Fig. 2; Table 1). The deposits are predominantly fluvio-estuarine. Wells W1 and W2 are located landward and were selected due to the similarity of their depositional architectures, despite being approximately 25 km apart. In contrast, Well W3 is situated basinward and was chosen to represent more transitional environments and to evaluate the lateral persistence of the orbitally-driven signal across the depositional system.

Table 1: Depths of the sequence boundaries in the three wells, defining the limits of the analyses.

	Sequence Boundaries	Well 1	Well 2	Well 3
Sq 3	SU4	160 m	150 m	595 m
	SU3	254 m	244 m	770 m
Sq 2	SU2	382 m	372 m	925 m

As discussed by Melo et al. (2019), Sq 2 includes a Lowstand Systems Tract 2 (LST 2), bounded at the top by the Maximum Regressive Surface 2 (MRS 2), and characterized by amalgamated, unconfined braided fluvial systems composed of coarse-grained and conglomeratic sandstones. In wells W1 and W2, MRS 2 directly overlies SU2, indicating that LST 2 is recorded only in W3. a transition from braided to low-energy, meandering fluvial systems marks the onset of the Transgressive Systems Tract (TST 2), driven by increased accommodation. TST 2 consists of interbedded low-energy channel and floodplain deposits, displaying an overall transgressive trend. Within this tract, correlatable paleosol horizons are recurrent, separating individual transgressive episodes at a fourth-order scale (T–R cycles). These paleosol levels are indicative of high-frequency base-level falls and associated subaerial unconformities. The Maximum Flooding Surface 2 (MFS 2) has a limited stratigraphic expression, often absent due to erosion or no-deposition, such that SU3 occurs close to or directly superimposed on MFS 2.

In Sq 3, there is no record of a LST in the selected wells, therefore, the TST 3 directly overlies SU3 and is bounded at the top by MFS 3. TST 3 is represented by meandering fluvial, tide-influenced fluvial, estuarine, and other tide-dominated systems (Bagnoli, 1992; Castro, 1992; Vasconcelos et al., 1990; Melo et al., 2019). MFS 3 corresponds to the global transgressive event marked at the Cenomanian-Turonian boundary (Viviers and Regali, 1987). TST 3 can also be subdivided into high-frequency depositional sequences that exhibit a trend similar to that observed in TST 2. Finally, above MFS 3, the Highstand Systems Tract 3 (HST 3) is composed by mixed and siliciclastic deposits also attributed to the Açu Formation, but with some intercalations of carbonate units from the overlying Jandaíra Formation, which fully constitutes depositional sequence 4 above.

The chronostratigraphic framework of the Potiguar Basin is marked by depositional hiatuses identified through biostratigraphic analysis (Fig. 2). This framework was established based on the lateral correlation of multiple wells, some of which include

palynological data, while others do not. In W1, no biostratigraphic information is available. In W2, palynozone P-390 – restricted to the Early Turonian – is present within the studied interval. In W3, palynozones P-370 (characterized by *Psilatricolpites papilioniformis*, Cenomanian, ~100.5–93.9 Ma) and P-380 (*Gnetaceaepollenites similis*, restricted to the Late Cenomanian) have been identified (Lana, 1997; Arai, 2001; Nascimento, 2013). Despite the associated uncertainties, these biostratigraphic records are crucial for constraining the astronomical solution to be applied to the studied interval, as it is inherently dependent on accurate age assignment.

3. Methods

3.1. Well-log datasets

All analyses were conducted using gamma-ray (GR) datasets obtained from three well logs (1-SP-1- RN, 1-ARG-1-RN and 1-MA-5-RN – hereafter referred to as wells 1 (W1: $L_1 = 222$ m, $r_1 = 0.2$ m), 2 (W2: $L_2 = 222$ m, $r_2 = 0.2$ m) and 3 (W3: $L_3 = 330$ m, $r_3 = 0.2$ m), respectively), sourced from publicly available data provided by the Brazilian National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP) (<https://reate.cprm.gov.br/anp/TERRESTRE>). GR is widely used in cyclostratigraphic studies as a physical proxy, as it indirectly reflects lithological variations and can thus be used to investigate astronomical forcing (Li et al., 2019; Peng et al., 2024; Wang et al., 2024). To align with the stratigraphic framework provided by Melo et al. (2019), all series were subdivided according to depositional sequences Sq 2 and Sq 3, based on reported subaerial unconformities, as follows – W1 and W2: Sq 2 = 128 m and Sq 3 = 94 m; and W3: Sq 2 = 155 m and Sq 3 = 175 m;

3.2 Cyclostratigraphy analyses

Cyclostratigraphic analyses were performed using Acycle version 2.8 (Li et al., 2019). Prior to spectral analysis aimed at detecting quasi-periodic signals in the frequency domain (Schwarzacher, 1993; Kodama and Hinnov, 2015), gamma-ray (GR) data were uniformly resampled at 0.2 m intervals and subjected to preprocessing steps, including the removal of null or spurious values. A log-transformation was applied to stabilize spectral variance and improve comparability of amplitude fluctuations across the frequency domain. Linear detrending was performed on all datasets, except for Sequence

2 of Well 3 (Sq 2 – W3), for which a locally estimated scatterplot smoothing (LOESS) regression with a window size equivalent to 60% of the dataset length. Spectral analysis was employed to identify quasi-periodic signals within the frequency domain (Schwarzacher, 1993; Kodama and Hinnov, 2015).

Power spectra were computed using the Multi-Taper Method (MTM; Thomson, 1982) against a red-noise background modeled as a first-order autoregressive process (AR(1); Mann and Lees, 1996) with mean, 90%, 95%, and 99% confidence levels. To investigate temporal variations in frequency content along the stratigraphic successions, Evolutionary Harmonic Analysis (EHA) was conducted using the Evolutionary Fast Fourier Transform (eFFT) algorithm (Kodama and Hinnov, 2015). This approach enables the identification of both persistent and transient spectral components and facilitates the assessment of temporal changes in sediment accumulation rates (SAR) throughout the analyzed intervals. Window lengths for the EHA ranged from approximately 27 m to 45 m, depending on the specific well, stratigraphic sequence, and dataset extent. A fixed step size of 0.2 m was applied across all analyses to preserve spatial resolution and continuity.

The identification of orbitally-driven signals in the power spectra was guided by comparison of observed wavelength ratios with the predicted Milankovitch frequency ratios for the mid-Cretaceous (~94 Ma), based on the La2004 astronomical solution (Laskar et al., 2004): $405:125:95:39.1:23.0:18.5 = 21.9:6.7:5.1:2.1:1.2:1$. Astronomical tuning was carried out by aligning the 405 kyr long-eccentricity sinusoidal component-isolated via band-pass Gaussian filtering-to its orbital counterpart in the La2004 solution. The tuning was anchored using two independent stratigraphic tie-points: SU2 and MFS 3, both identified in the W1, W2, and W3 records. These surfaces correspond to the base and top of palynozone P-370, dated to ~100.5 Ma and ~93.9 Ma, respectively, as reported by Melo et al. (2019).

To test whether Milankovitch-scale orbital forcing exerted a primary control on the depositional architecture of the studied sequences, we performed a series of spectral correlation analyses. Specifically, Correlation Coefficient (COCO) and Evolutionary COCO (eCOCO) methods were applied to evaluate the most probable sedimentation rates and to test the null hypothesis of no orbital forcing (H_0). These approaches compare the power spectra of stratigraphic proxy data with astronomical target curves via 5,000 Monte Carlo simulations, incorporating red-noise modeling based on a first-order autoregressive process (AR(1)) and subsequent red-noise removal (Li et al., 2018). For the eCOCO analysis, moving window lengths ranged from 34 to 45 meters, depending on the stratigraphic sequence and data extent. Sedimentation rate search intervals were

constrained between 0 and 20 cm/kyr, guided by analogues from similar depositional settings (Liu et al., 2020; Yang et al., 2021; Lanci et al., 2022). Optimal sedimentation rates were determined by identifying intervals that yielded high correlation coefficients (ρ) and low significance levels (H_0), integrated with the evolutionary sedimentation patterns obtained through eCOCO. Additionally, a linear age model was constructed using the 405 kyr eccentricity cycle as the primary tuning reference, producing time scales that reflect the influence of seven orbital parameters-405, 125, 95, 39.1, 23.0, 21.8, and 18.5 kyr-according to the La2004 astronomical solution for 94 Ma (Laskar et al., 2004).

3.3 Integrated Prediction Error Filter Analysis

The Integrated Prediction Error Filter Analysis (INPEFA) is a geophysical technique commonly used to assist well-to-well correlation at regional scales and to identify changes in depositional order and sedimentation cyclicity (Nainggolan, 2019; Zulivandama, 2018; Liu et al., 2024). INPEFA is derived from the specific integral transformation of the Prediction Error Filter Analysis (PEFA) curve. The PEFA curve is generated through an autoregressive (AR) model that calculates the difference between the predicted and observed input values-referred to as the prediction error (Eq. 1). Consequently, intervals characterized by elevated prediction error, i.e., reduced predictability, can be interpreted as potential depositional hiatuses, which may correspond to sequence boundaries or related stratigraphic surfaces (Zulivandama, 2018). The prediction error equation is expressed as follows:

$$e_n = y_n - \sum_{i=1}^p C_i y_{n-i} \quad (1)$$

In this formulation, for each sample, the prediction error (e_n) – interpreted as random noise at position n , representing the non-predictable component – is defined as the difference between the real data value (y_n) and its predicted portion (i.e., the summation term). This summation represents a linear combination of the p preceding samples (y_{n-i}), each weighted by a coefficient C_i , which collectively define the predictable portion of the model. In this study, the coefficients C_i were estimated using the least squares method, simultaneously incorporating forward and backward prediction steps - a procedure known as the Burg method (Nainggolan, 2019; Yuan et al., 2018; Zulivandama, 2018).

The number of prediction coefficients (C_i) defines the effective filter size, typically corresponding to a stratigraphic interval of approximately 10 meters, as reported in the literature (Nio et al., 2005; De Jong, 2007; Qayyum and Smith, 2014). While the filter size does not significantly affect the accuracy of prediction, it imposes a limitation near the boundaries of the data series, where reliable predictions are not possible over a range equivalent to the filter length (Qayyum and Smith, 2014).

Due to the limited interpretability of PEFA in datasets dominated by high-frequency signals and noise - conditions under which hiatuses become difficult to identify (Nio et al., 2005; De Jong, 2007; Qayyum and Smith, 2014) - the Integrated Prediction Error Filter Analysis (INPEFA) curve is computed to mitigate these limitations. The INPEFA curve is defined as:

$$INPEFA(t) = \sum_{i=1}^t e_i \quad (2)$$

where a numerical integration (i.e., running sum) of the prediction error values (e_i) is performed from the first sample to time t . In this study, the raw data were analyzed to investigate long-wavelength (low-frequency) depositional trends, whereas a detrended dataset - using a 5% LOWESS regression - was employed to enhance the identification of higher-frequency cyclic variations.

In a sequence stratigraphic context, the INPEFA curve provides insights into depositional trends. Upward shifts in the curve are typically associated with intervals of high gamma-ray (GR) values (i.e., positive prediction errors), often reflecting transgressive phases, whereas downward shifts correspond to low-GR intervals (i.e., negative errors), indicative of regressive tendencies (Ni et al., 2005; De Jong, 2007; Yuan et al., 2018; Nainggolan, 2019).

4. Results

4.1 Cyclostratigraphy

4.1.1 Time-series analysis

Multi-Taper Method (MTM) spectral analysis of gamma-ray (GR) data from all three wells, targeting sequences Sq 2 and Sq 3, revealed statistically significant spectral peaks exceeding the 90% confidence level. When integrated with Evolutionary Harmonic Analysis (EHA), these results enabled the identification and tracking of spectral bands

corresponding to Milankovitch cycles - namely long eccentricity (E), short eccentricity (e125 and e95), obliquity (O), and, in some cases, precession (P1 and P2). A total of six spectral analyses were performed - one per sequence in each well - analyzed independently (Fig. 3). The results are discussed below on a sequence-by-sequence basis and summarized in Table 2.

As previously noted, the predicted spectral peak ratios derived from the La2004 astronomical solution for 94 Ma are 21.9:6.7:5.1:2.1:1.2:1, corresponding to periodicities of 405:125:95:39.1:23.0:18.5 kyr. For Sq 2 in W1 (Fig. 3a), the observed spectral ratio of 22.1:6.7:5.1:2.3 translates to periods of 405:122.8:93.5:38.5 kyr, which closely match the La2004 solution, although precessional peaks (1.2:1) were not identified above the 90% confidence level. In W2 and W3 (Fig. 3b and 3c), precession-related peaks (P1) are present but do not exhibit persistent spectral power along the full stratigraphic sections. The observed spectral ratios are 26.7:10.2:5.3:3.4:1.9 for W2 (405:154.7:80.4:51.6:28.8 kyr) and 29.9:8.9:6.6:2.6:1.7 for W3 (405:120.5:89.4:35.2:23.0 kyr). For Sq 3, no precessional signals were identified above the 90% threshold in any of the wells (Fig. 3d–f). The spectral peak ratios observed are as follows - W1: 22.4:8.9:5.5:2.4 = 405:160.9:99.4:43.4 kyr; W2: 24.9:8.1:4.9:2.7 = 405:131.7:79.7:43.9 kyr; W3: 21.0:6.2:4.9:2.1 = 405:119.6:94.5:40.5 kyr. These results further support the interpretation of eccentricity and obliquity modulation in both sequences, with less consistent expression of precession.

The spectral bands corresponding to eccentricity, obliquity, and precession cycles were defined based on the frequency ratio method, integrating results from MTM and EHA analyses. The identified wavelength ranges for each cycle and well are summarized in Table 3.

Table 2: Spectral Peak Ratios and Corresponding Orbital Periods (kyr) for Sq 2 and Sq 3 in Wells W1–W3

Sq 2			Sq 3	
Well	Power Spectrum Ratio	Estimated Orbital Periods (kyr)	Power Spectrum Ratio	Estimated Orbital Periods (kyr)
W1	22.1:6.7:5.1:2.3	405:122.8:93.5:38.5	22.4:8.9:5.5:2.4	405:160.9:99.4:43.4
W2	26.7:10.2:5.3:3.4:1.9	405:154.7:80.4:51.6:28.8	24.9:8.1:4.9:2.7	405:131.7:79.7:43.9
W3	29.9:8.9:6.6:2.6:1.7	405:120.5:89.4:35.2:23.0	21.0:6.2:4.9:2.1	405:119.6:94.5:40.5
La2004	21.9:6.7:5.1:2.1:1.2:1	405:125:95:39.1:23.0:18.5	21.9:6.7:5.1:2.1:1.2:1	405:125:95:39.1:23.0:18.5

Table 3: Spectral frequency ranges associated with long and short eccentricity, obliquity, and precession cycles for each sequence (Sq 2 and Sq 3) in the three studied wells.

	Sequence	W1	W2	W3
E	Sq 3	1/52.3 – 1/15.2 m ⁻¹	1/59.1 – 1/16.3 m ⁻¹	1/33.9 – 1/13.5 m ⁻¹
	Sq 2	1/37.7 – 1/13.1 m ⁻¹	1/53.4 – 1/15.3 m ⁻¹	1/55.4 – 1/16.9 m ⁻¹
e	Sq 3	1/11.2 – 1/4.0 m ⁻¹	1/11.3 – 1/3.5 m ⁻¹	1/11.1 – 1/4.5 m ⁻¹
	Sq 2	1/10.5 – 1/4.4 m ⁻¹	1/12.1 – 1/4.0 m ⁻¹	1/12.5 – 1/4.1 m ⁻¹
O	Sq 3	1/3.6 – 1/2.2 m ⁻¹	1/3.1 – 1/2.3 m ⁻¹	1/3.1 – 1/1.9 m ⁻¹
	Sq 2	1/3.6 – 1/1.9 m ⁻¹	1/3.6 – 1/2.3 m ⁻¹	1/3.4 – 1/2.2 m ⁻¹
P	Sq 3	–	–	–
	Sq 2	–	1/2.1 – 1/1.2 m ⁻¹	1/1.9 – 1/1.2 m ⁻¹

4.1.2 Sediment accumulation rates analysis (SAR)

The COCO analysis identified significant sedimentation rate peaks for Sq 2, with 4.3 cm/kyr in W1, while the linear SAR model indicated a range from 3.4 to 6.9 cm/kyr. In W2, COCO analysis yielded a rate of 4.9 cm/kyr, whereas the linear model ranged from 4.7 to 7.9 cm/kyr. For W3, a notably higher rate of 6.8 cm/kyr was detected by the COCO analysis, with the linear model varying between 3.2 and 7.9 cm/kyr. For Sq 3, the highest rate identified by COCO was 4.8 cm/kyr in W1, with the linear model indicating a range from 3.5 to 5.4 cm/kyr. In W2, COCO estimated 4.7 cm/kyr, while the linear model ranged from 4.3 to 5.9 cm/kyr. Similarly, W3 exhibited a COCO-derived rate of 4.4 cm/kyr, with the linear model varying between 4.3 and 6.5 cm/kyr (Fig. 4).

The eCOCO results for Sq 2 revealed greater signal continuity in W1, with a distinct shift at approximately 305 meters. In contrast, W2 exhibited more frequent signal interruptions, while W3 displayed a prominent discontinuity at ~885 m. For Sq 3, W1 and W3 showed increased signal interruptions, whereas W2 maintained a remarkably consistent signal at 4.7 cm/kyr throughout the entire depth interval.

4.1.3 Construction of a Floating Astronomical Time Scale based on the 405-kyr cycles

The frequency bands corresponding to the 405-kyr long eccentricity (E) cycle (Table 3) were used to apply Gaussian band-pass filters, allowing the isolation of this orbital component in all studied wells. The 405-kyr cycle was selected for Astronomical Time Scale (ATS) construction and for estimating the duration of preserved depositional intervals, given its recognized stability over geological timescales and robustness under

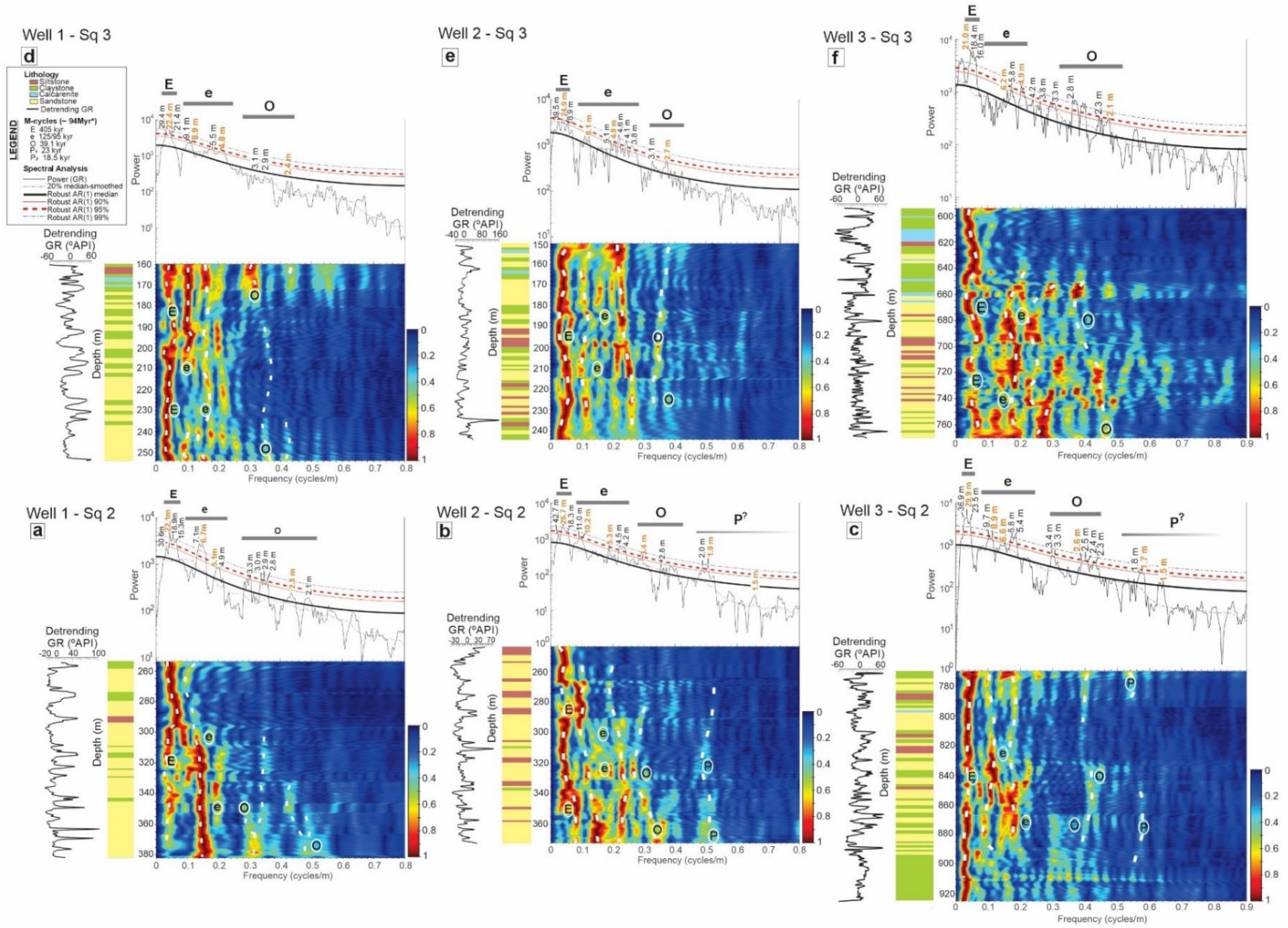


Figure 3: Spectral Analysis and Evolutionary Harmonic Analysis of Wells 1, 2, and 3.

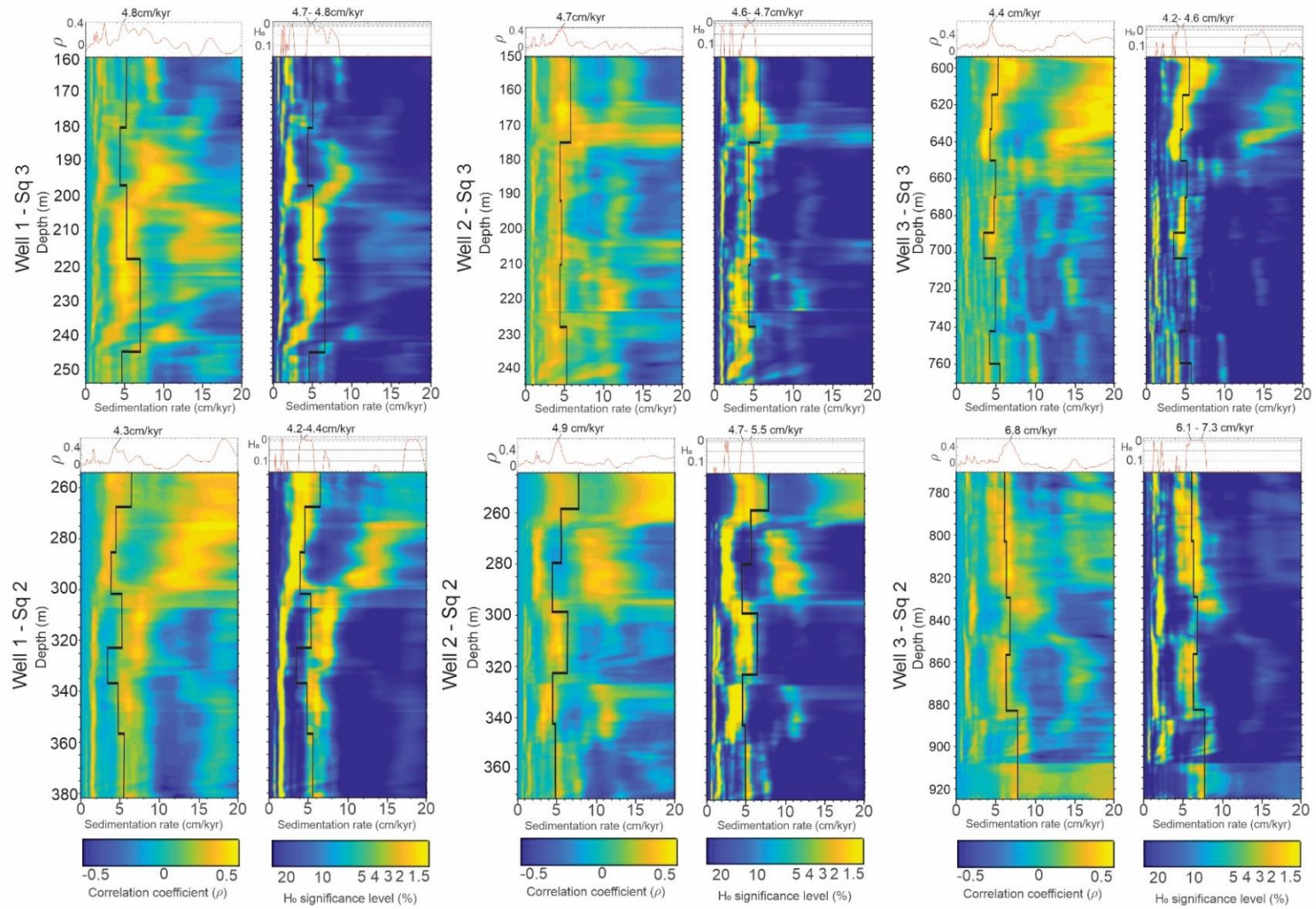


Figure 4. Results of COCO/eCOCO analyses for Wells 1, 2, and 3 within Sq 2 and Sq 3.

conditions of variable sedimentation rates (Wang et al., 2024). The band-pass filtered curves were then used to establish a floating Astronomical Time Scale (FATS), integrating palynozone markers (see Section 2.2) and well-to-well stratigraphic correlations. To support the identification of the 405-kyr signal, an additional band-pass filter was applied to isolate the short eccentricity component, allowing for the evaluation of the amplitude modulation relationship between the two signals during the ATS construction process.

The procedure for construction of an overall FATS comprising wells, W1, W2 and W3 was conducted in two steps:

- (i) A preliminary FATS was established for wells W1 and W2, which are located in proximal and stratigraphically comparable settings (Fig. 5). According to palynological data, the subaerial unconformity SU2 defines the base of the Cenomanian (~100.5 Ma), while the maximum flooding surface MFS 3 marks the base of the Turonian (~93.9 Ma). Within Sq 2, seven and eight 405-kyr cycles (E405) were identified in W1 and W2, corresponding to durations of approximately 2.8 and 3.24 Myr, respectively. In Sq 3, five and six E405 cycles were identified, yielding timespans of ~2.02 and ~2.4 Myr;
- (ii) The preliminary chronostratigraphic framework was then extended to well W3, located in a more distal depositional setting, in order to evaluate the preservation of orbitally forced signals across the context and to develop a composite FATS (Fig. 6). As in W1 and W2, both SU2 and MFS 3 were clearly recognized in W3. This well recorded eight E405 cycles in Sq 2 and ten cycles in Sq 3, indicating preserved intervals of approximately 3.24 Myr and 4.04 Myr, respectively.

These results indicate that the total preserved time in W3 (excluding the stratigraphic gap associated with SU3) is approximately 7.3 Myr, compared to ~4.8 Myr in W1 and ~5.7 Myr in W2 (Fig. 6; Table 4). Notably, the thicknesses of the depositional sequences vary among the wells. Consequently, although sediment accumulation rates (SARs) are broadly similar, the number of preserved eccentricity cycles differs. The final FATS shown in Figure 6 thus represents the synthesis of the individual ATSS derived from each well.

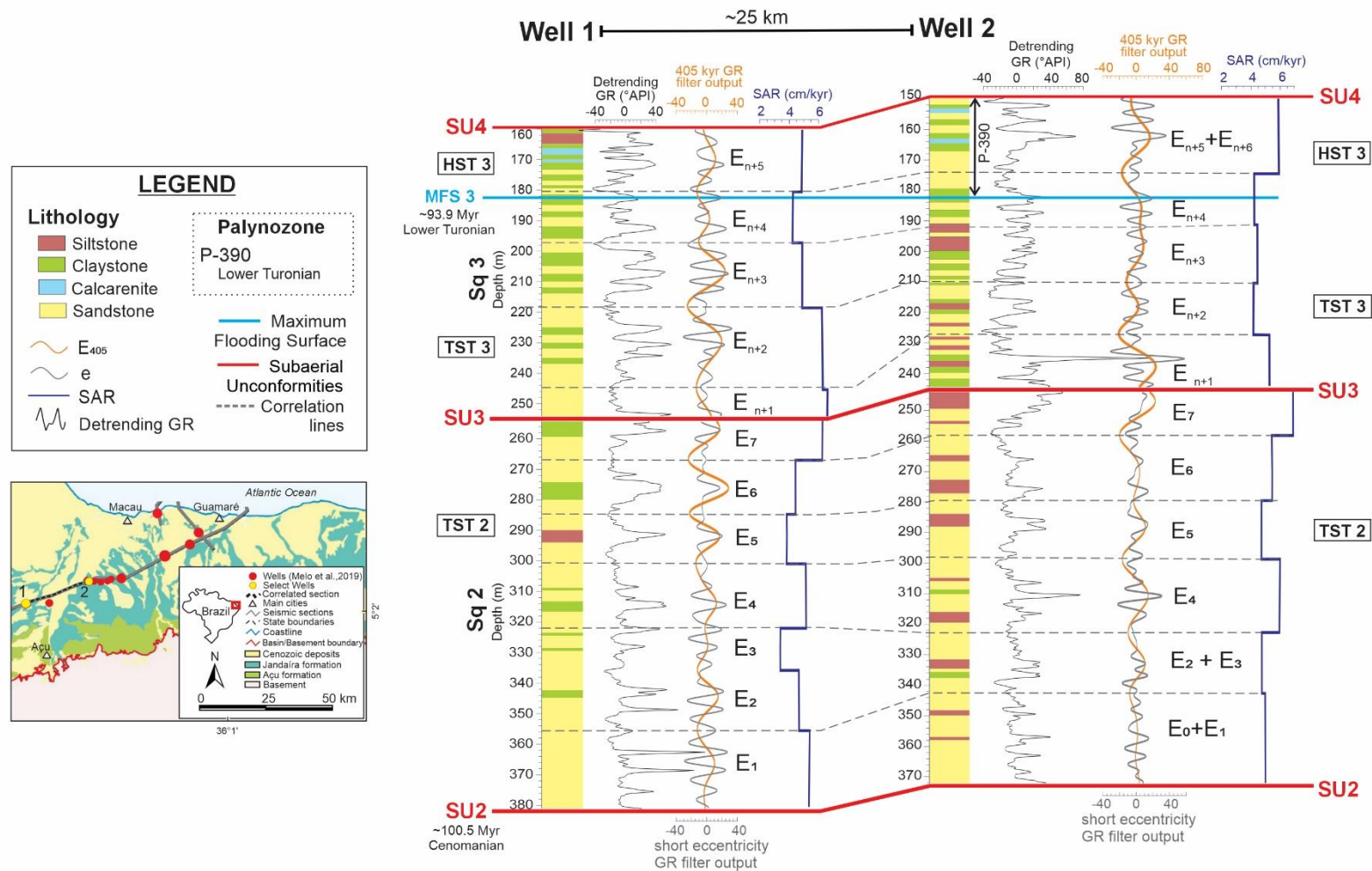
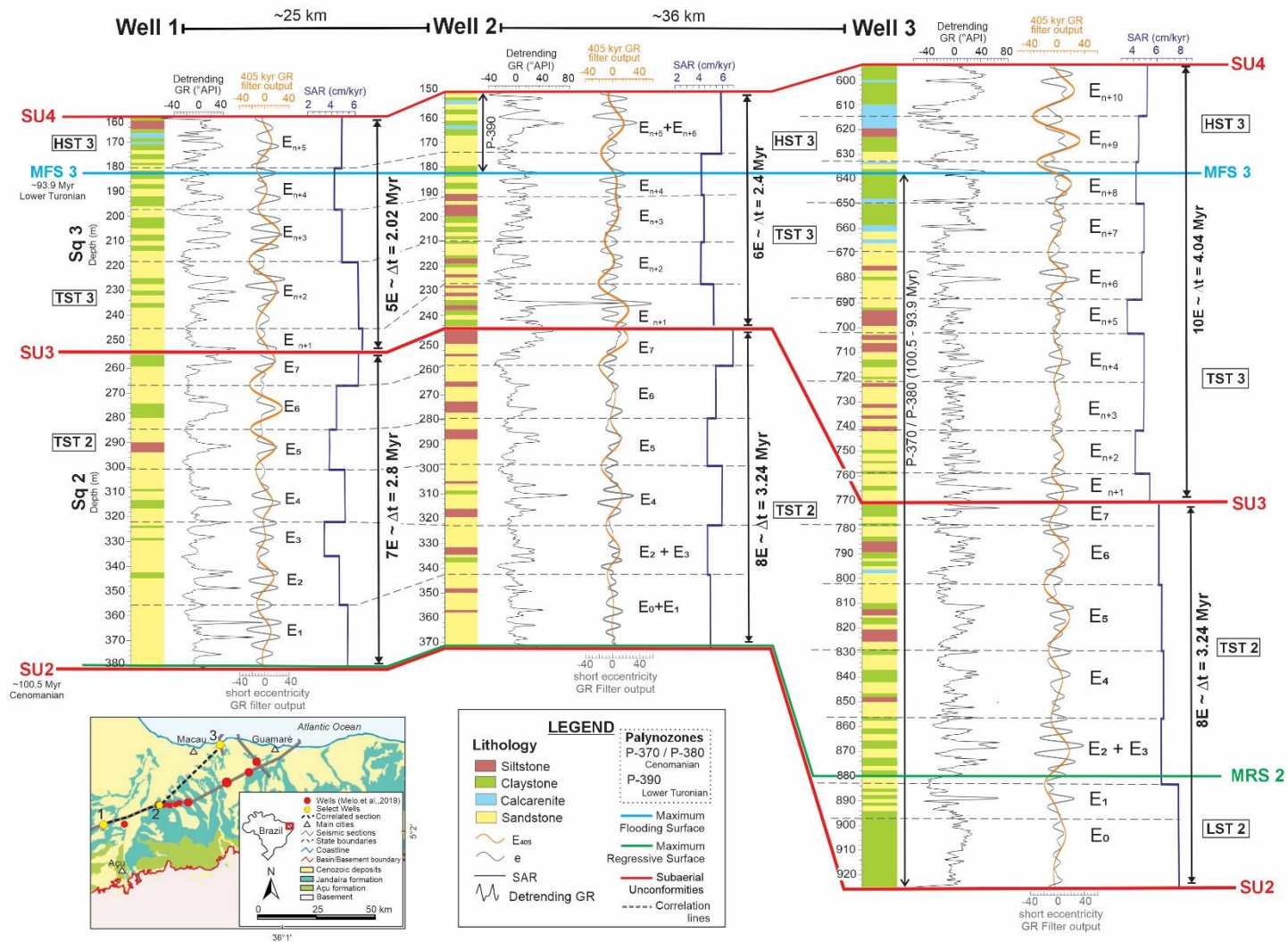


Figure 5: Correlation panel between Wells 1 and 2 showing lithological description, gamma-ray detrending, orbital eccentricity filtering, and sediment accumulation rates (SAR).



4.2 INPEFA results

In this work, INPEFA analyses improved the identification of trends and enhancing the correlation between long-eccentricity isochronous cycles through trend analysis (Fig. 7). The third-order trends - associated with the depositional sequences - are evident in the curve derived from the original dataset. Although these trends are not always pronounced, they consistently delineate patterns representative of the sequences in each well, thereby supporting the sequence boundaries proposed by Melo et al. (2019). Conversely, the application of the Integrated Prediction Error Filter Analysis (INPEFA) method, combined with a 5% LOWESS smoothing filter, enabled the identification of higher-frequency trends corresponding to fourth-order cycles, interpreted as ~405-kyr long-eccentricity cycles.

In the context of high-frequency trends, the patterns detected in the INPEFA curves exhibit lateral continuity among the wells, particularly within intervals where cyclic correspondence is anticipated. This lateral consistency reinforces the reliability of the correlation of these high-frequency, or higher-order, trends. However, this correspondence is disrupted in two specific intervals. The first occurs at the base of stratigraphic sequence Sq 2 in W3 (Fig. 7c, lower part), where claystones predominate; here, the INPEFA curve displays a distinct behavior compared to the other wells, with patterns that do not replicate laterally within the equivalent cycles. The second disruption is observed in the lower third of sequence Sq 3 (702–770 m depth) in W3 (Fig. 7c, upper part), where the INPEFA curve exhibits a serrated pattern characterized by reduced amplitude variations, lacking a correlative expression in the other analyzed wells.

5. Discussion

The identification of long- and short-eccentricity cycles, obliquity, and - albeit inconsistently - precession, provides compelling evidence for the presence of orbitally forced sedimentation patterns that can be quantitatively analyzed to refine stratigraphic correlations. Spectral and evolutionary harmonic analyses clearly reveal distinct and statistically significant periodicities that closely match the expected astronomical frequencies for the studied interval (~94 Ma), thereby confirming a clear imprint of astronomical forcing.

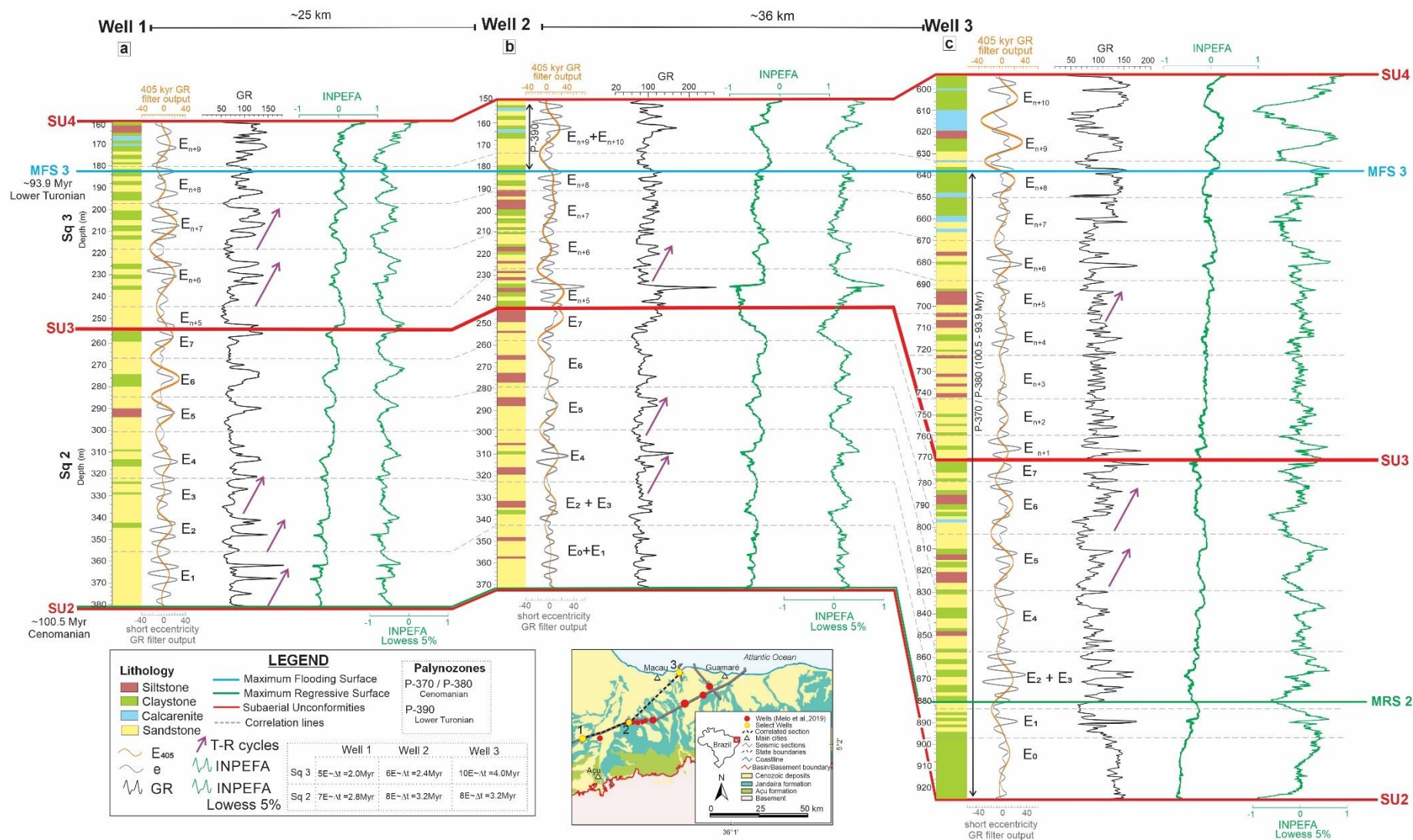


Figure 7: Correlation of 405-kyr band-pass curves across the three wells using INPEFA linear and INPEFA LOWESS 5% curves, enabling the expansion of the floating ATS. T-R cycles are shown associated with long eccentricity by purple arrows.

While the frequency ratios associated with obliquity and precession are broadly consistent with theoretical astronomical predictions, the expression of these signals also reflects environmental constraints inherent to the depositional setting. In particular, the incomplete preservation of precessional forcing - most notably in W1 - is likely attributable to a highly dynamic and proximal fluvial regime, which favors erosion and reworking of fine-grained sediments where high-frequency orbital signals are typically recorded. This setting, characterized by reduced accommodation space, enhances sediment bypass and discontinuous preservation. In contrast, the more distal, estuarine-influenced environments of W2 and W3 show relatively improved preservation of precessional signals. These findings align with previous studies indicating that high-energy fluvial environments often result in the partial or complete loss of high-frequency orbital signatures due to episodic sediment remobilization (Wang et al., 2024).

SAR analysis estimates further underscore the influence of orbital forcing on the depositional framework. The SAR values derived from COCO analysis and linear sedimentation models - ranging between ~3 cm/kyr and ~8 cm/kyr - are consistent with those reported for comparable fluvio-estuarine systems (Liu et al., 2020; Yang et al., 2021). Notably, SAR distribution exhibits spatial variability within Sq 2, with an increasing trend from the more proximal inland wells toward distal settings, whereas Sq 3 displays relatively uniform accumulation rates across the study area. This shift in SAR patterns suggests that Sq 2 was predominantly controlled by variations in sediment supply and preservation potential, while Sq 3 reflects a more stable sediment supply regime throughout most of the sequence. Such differences may be related to greater differentiation in accommodation space among the wells within the lower sequence. In Sq 2, only the TST 2 is preserved in Wells 1 and 2, whereas both LST 2 and TST 2 are preserved in Well 3. Conversely, in Sq 3, both the TST 3 and HST 3 are preserved across all three wells, despite thickness variations, suggesting a more uniform accommodation space during the infill of this sequence.

However, the Sq 2 contains fewer fine-grained rocks than Sq 3, except in W3, where a higher carbonate content is observed in Sq 3. This suggests that, although both sequences exhibit enhanced preservation of transgressive systems tracts, W3 records more distal deposits within Sq 3 compared to Sq 2 and, in fact, the overlying sequence 4 is dominated by marine carbonates from the Jandaíra Formation. This distinction is significant, as increased accommodation space toward the depocenter promotes sediment preservation, whereas more continental sectors are more susceptible to erosion or non-deposition. Consequently, this results in differential preservation of

stratigraphic stacking patterns, which, in turn, directly affects the completeness and resolution of the orbital record.

FATS, INPEFA and stratigraphic correlation

Clear evidence of orbital forcing on sedimentation was identified in all three wells, supporting their correlation based on long eccentricity (E) cycles. As previously discussed, frequency bands corresponding to long-eccentricity signals were employed to construct a 405-kyr Gaussian band-pass filtering curve. This approach enabled the identification and counting of individual E-cycles, forming the basis for constructing a FATS, given that the only available temporal constraints are palynozone data derived from ditch samples, which may be subject to lower precision.

The counting of E-cycles was conducted from the subaerial unconformity at the base of Sq 2 (SU2), which marks the onset of the Cenomanian (~100.5 Ma), through the upper subaerial unconformity of Sq 2 (SU3), corresponding to the Late Cenomanian, and up to the subaerial unconformity of Sq 3 (SU4), which represents the Middle Turonian (absolute age undetermined). Between SU3 and SU4 lies the Maximum Flooding Surface (MFS 3), marking the transition from the Cenomanian to the Turonian (~93.9 Ma), serving as a key chronostratigraphic reference for well-to-well correlation. According to Melo et al. (2019), the MFS constitutes the most reliable stratigraphic datum due to its low diachroneity and its association with the culmination of transgression, when depositional topography becomes relatively flat. This surface was identified through integrated stratigraphic analysis of systems tracts and gamma-ray (GR) log pattern interpretation (Figs. 5 and 6).

Wells W1 and W2 exhibit remarkably similar stratigraphic and cyclostratigraphic characteristics (Fig. 5). This similarity is supported by several lines of evidence: (i) although approximately 25 km apart, both wells are located in relatively continental settings, and their gamma-ray profiles display strikingly similar signatures, facilitating robust correlation between them, further reinforced by comparable thicknesses of corresponding stratigraphic intervals; (ii) their depositional environments evolved similarly, transitioning from braided fluvial systems to meandering rivers and subsequently to estuarine coastal settings, characterized by interbedded sandstones, claystones, and siltstones (Melo et al., 2019); and (iii) long-eccentricity cycles exhibit consistent correlation across both wells, as do the trends observed in the INPEFA curves. Minor

discrepancies are present, likely attributable to localized erosional processes, episodes of higher-frequency non-deposition, and amalgamation of individual cycles.

In the lower part of Sq 2 in W1, E₂ and E₃ cycles are preserved, whereas in W2 and W3, these cycles cannot be distinguished, likely due to the influence of unconfined braided fluvial systems of the Açu Formation during the lowstand systems tract - a localized environmental control affecting this interval. Similarly, E₀ is well-preserved in W3, amalgamated in W2, and eroded in W1. The T-R cycles identified in this study (Fig. 7) correspond to long eccentricity cycles and, as previously mentioned and despite local variations, exhibit consistent lateral correlation across the entire basin, supporting the orbitally-forcing origin of allogenic control (Sevillano et al, 2020).

These stratigraphic and cyclostratigraphic similarities allowed for a robust ATS; however, its application remains restricted to more continental deposits. Extending the analysis to a well located farther basinward (W3) allowed for refinement of the ATS and provided insights into the behavior of orbital signals in more distal settings. As expected, the deposits in W3 exhibit better preservation of sedimentary packages (with more cycles preserved) attributable to its transitional environment, seaward and farther from areas with significant sediment removal. Nevertheless, correlating the fourth-order cycles from the more proximal wells (W1 and W2) with the more distal W3 presents challenges (Fig. 6). The long eccentricity cycles in Sq 2 exhibit overall good correlation among the wells, despite some localized differences in preservation, as previously noted. In contrast, Sq 3 exhibits considerable variation in the number of preserved cycles, with W3 capturing a substantially thicker depositional package.

By applying the INPEFA technique (Pratama, 2016; Zulivandama, 2018; Nainggolan, 2019; Wang, 2022), we were able to enhance inter-well cycle correlation through trend analysis. This approach revealed that the first four cycles within Sq 3 in W3 (Fig. 7) have no direct counterparts in the more proximal wells, indicating that approximately 1.6 million years of additional deposition is preserved in W3. This suggests that SU3 represents a hiatus of at least this duration in the more continental region. Thus, INPEFA analysis not only contributed to refining the ATS (Fig. 8) but also significantly improved the stratigraphic resolution within this interval.

The cyclostratigraphic analyses clearly evidenced spectral content compatible to the Milankovitch imprint, which allowed us to construct a floating ATS (Fig. 8) across the correlated wells while simultaneously enhancing stratigraphic resolution. The E-cycle counts presented in Figure 6 and detailed in the Results section indicate that the extended ATS comprises approximately eight long eccentricity cycles in Sq 2, corresponding to an estimated duration of

~3.24 million years ($\sim 8 \times E_{405} = \sim 3.24 \text{ Myr}$), and ten long eccentricity cycles in Sq 3, equivalent to ~4.05 million years ($\sim 10 \times E_{405} = \sim 4.05 \text{ Myr}$), resulting in a total of approximately 7.3 million years of sedimentation preserved (Table 4). The expected time interval between SU2 and MFS 3 is approximately 6.6 million years (100.5–93.9 Ma). However, counting the E-cycles within this interval yields approximately 11 E_{405} cycles in W1, resulting in ~4.4 Myr, 12 E-cycles in W2, or ~4.86 Myr, and 16 E-cycles in W3, resulting in ~6.480 Myr (Table 4). As noted above, the preservation of the orbital signal in W3 reveals that the interval eroded by SU3 in landward is at least 1.6 Myr ($4 \times E\text{-cycles}$). In contrast, the sedimentary record eroded in W3 would correspond to just a single short eccentricity cycle. Considering that the MFS 3 is associated with an age of 93.9 Ma, it is also possible to estimate that SU4 corresponds to approximately 93.1 Ma.

Table 4: Number of E-cycles and estimated timespans between unconformity surfaces, along with the previously established ages of subaerial unconformities and the MFS 3.

Sequence / SU	Well 1	Well 2	Well 3
SU4			~93.1 Ma (this study)
	1 $E_{405} = \Delta t \sim 0.405 \text{ Myr}$	2 $E_{405} = \Delta t \sim 0.810 \text{ Myr}$	2 $E_{405} = \Delta t \sim 0.810 \text{ Myr}$
Sq 3	MFS 3	~93.9 Ma (P-370/P-380)	
	4 $E_{405} = \Delta t \sim 1.62 \text{ Myr}$	4 $E_{405} = \Delta t \sim 1.62 \text{ Myr}$	8 $E_{405} = \Delta t \sim 3.24 \text{ Myr}$
			~97.1 Ma (this study)
SU3			$\Delta t \sim 0.120 \text{ Myr}$ (this study)
			~97.3 Ma (this study)
Sq 2	7 $E_{405} = \sim 2.83 \text{ Myr}$	8 $E_{405} = \sim 3.24 \text{ Myr}$	8 $E_{405} = \sim 3.24 \text{ Myr}$
SU2			~100.5 Ma (P-390)

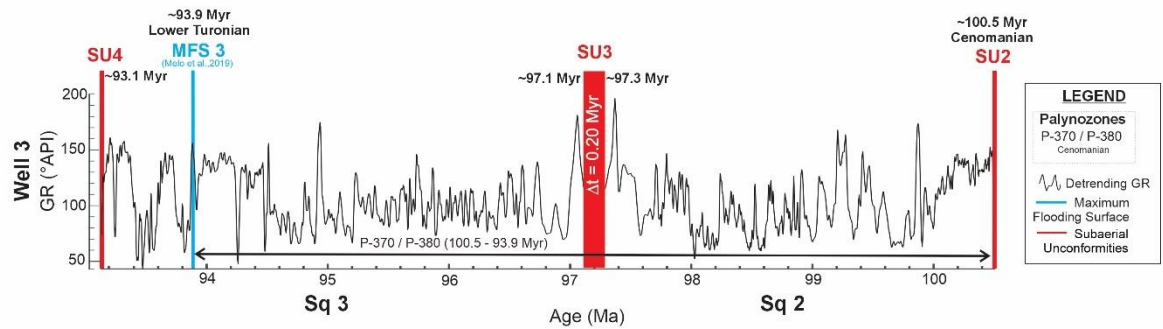


Figure 8: Floating ATS for all wells in Sequences 2 and 3, expanded using data from Well 3, which allowed estimation of the eroded interval in SU3 and identification of the lower boundary of SU4 based on long-eccentricity cycle counting and palynozone boundary surfaces.

6. Conclusions

The application of cyclostratigraphic techniques in fluvio-estuarine environments poses inherent challenges due to the dynamic interplay between autogenic and allogenic sedimentary processes. Despite these complexities, the results of this study demonstrate that orbital forcing exerts a fundamental control on the depositional architecture, corroborating previous evidence for the preservation of Milankovitch cycles in comparable sedimentary settings.

This research focused on two stratigraphic sequences preserved in two proximal wells (W1 and W2) and one distal well (W3), all associated with fluvial - estuarine deposits. The high-resolution chronostratigraphic framework developed by Melo et al. (2019), which integrates multiple wells along dip-oriented seismic lines, provided a robust basis for this analysis. Within this context, the study aimed to assess the extent to which orbital cycles influenced sediment accumulation and preservation, and to evaluate the role of erosional processes in potentially removing parts of the cyclic record.

Time-series analysis of gamma-ray (GR) logs revealed a clear orbital imprint on the sedimentary succession. These results enabled the construction of a consistent floating Astronomical Time Scale (FATS) for the Cenomanian-Turonian interval of the Potiguar Basin, initially through the correlation of W1 and W2, and subsequently extended to W3 to evaluate basinward evolution of orbital control and preservation. Correlation challenges were addressed through the application of the INPEFA technique, which proved useful for refining stratigraphic pattern recognition and extending the ATS. This also allowed the estimation of the duration of an unrecorded time interval - associated with SU3 - in the more continental wells (W1 and W2).

Furthermore, the transgressive-regressive (T-R) cycles identified in the GR data and stacking patterns, interpreted as fourth-order sequences within the regional stratigraphic framework, were shown to correspond to long eccentricity (405-kyr) cycles (Fig. 7). This correspondence supports the interpretation that fourth-order sequences are governed by E-cyclicality and can be laterally correlated across wells, thereby enhancing correlation precision.

In summary, this study confirms the influence of orbital forcing in the fluvio-estuarine deposits of the Açu Formation (Potiguar Basin, northeastern Brazil), and supports the stratigraphic correlation framework proposed by Melo et al. (2019). Furthermore, it was also possible to provide estimates for the timespan of sediment preservation and the duration of depositional hiatuses evidenced in this dynamical depositional system.

By successfully applying cyclostratigraphic methods in a fluvio–estuarine context - traditionally viewed as challenging due to high sedimentary variability - this study underscores the untapped potential of such dynamic environments to preserve astronomical signals. It reinforces that, although relatively uncommon, fluvio-estuarine settings can indeed retain astronomically forced stratigraphic patterns when approached with appropriate techniques - thereby broadening the scope of cyclostratigraphic applications and enhancing temporal resolution in marginal continental basins.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) for providing access to the data. We also acknowledge financial support from the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) through the provision of master's scholarships, the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - grants 314462/2020-1 to D.R.F. and 311182/2021-6 to J.C.), and the Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ - grants E-26/200.931/2022 to D.R.F. and 204.404/2021 to M.C.). We further thank Petrobras S.A. for allowing C.C.R. and M.M. to dedicate time to this research.

REFERENCES

- Abels, H.A., Kraus, M.J., Gingerich, P.D., 2013. Precession-scale cyclicity in the fluvial lower Eocene Willwood Formation of the Bighorn Basin, Wyoming (USA). *Sedimentology* 60, 1467–1483. <https://doi.org/10.1111/sed.12039>.
- Arai, M., 2001. Palinologia de depósitos cretáceos no Norte e Meio-Norte do Brasil: histórico e estado-de-arte. In: *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*, pp. 175–189.
- Araripe, P.T., Feijó, F.J., 1994. Bacia Potiguar. *Bol. Geociênc. Petrobras* 8, 127–141.
- Bagnoli, E., 1992. The Mossoro sandstone, Canto do Amaro oil field, Late Cretaceous of Potiguar Basin, Brazil: An example of a tidal inlet-channel reservoir. In: Rhodes, E.G., Moslow, T.F. (Eds.), *Marine and Clastic Reservoirs: Examples and Analogues*. *Frontiers in Sedimentary Geology*, Springer-Verlag, pp. 183–200.
- Bao, X., Zhang, S., Jiang, G., Wu, H., Li, H., Wang, X., An, Z., Yang, T., 2018. Cyclostratigraphic constraints on the duration of the Datangpo Formation and the onset age

- of the Nantuo (Marinoan) glaciation in South China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 483, 52–63.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.12.001>
- Batenburg, S.J., Sprovieri, M., Gale, A.S., Hilgen, F.J., Husing, S., Laskar, J., Liebrand, D., Lirer, F., Orue-Etxebarria, X., Pelosi, N., Smit, J., 2012. Cyclostratigraphy and astronomical tuning of the late Maastrichtian at Zumaia (Basque Country, Spain). *Earth Planet. Sci. Lett.* 359–360, 264–278. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.09.054>
- Bertani, R.T., Costa, I.G.D., Matos, R.M.D.D., 1990. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*, PETROBRAS, Rio de Janeiro, pp. 291–301.
- Castro, J.C., 1992. Facies, reservoirs and stratigraphic framework of the Mossoró Basin Member (Latest Cenomanian to Earliest Turonian) in Potiguar Basin, NE Brazil: An example of a tide and wave dominated delta. In: Rhodes, E.G., Moslow, T.F. (Eds.), *Marine and Clastic Reservoirs: Examples and Analogues*. *Frontiers in Sedimentary Geology*, Springer-Verlag, pp. 161–182.
- Castro, J.C., Viviers, M.C., Regali, M.S.P., 1986. A sedimentação em cânions submarinos e deltas marinhos no Cenomaniano da Bacia Potiguar. *An. Congr. Bras. Geol.* 1, 298–307.
- De Castro, D.L., Bezerra, F.H.R., Sousa, M.O.L., Fuck, R.A., 2012. Influence of Neoproterozoic tectonic fabric on the origin of the Potiguar Basin, northeastern Brazil, and its links with West Africa based on gravity and magnetic data. *J. Geodyn.* 54, 29–42.
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.09.002>
- De Jong, M., Nio, S.D., Smith, D., Böhm, A.R., 2007. Subsurface correlation in the Upper Carboniferous (Westphalian) of the Anglo-Dutch Basin using the climate stratigraphic approach. *First Break* 25, 49–59. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2007029>
- Franco, D.R., Hinnov, L.A., Ernesto, M., 2012. Millennial-scale climate cycles in Permian-Carboniferous rhythmites: Permanent feature throughout geologic time. *Geology* 40, 19–22.
<https://doi.org/10.1130/G32338.1>
- Gong, Z., 2021. Cyclostratigraphy of the Cryogenian Fiq Formation, Oman and its implications for the age of the Marinoan glaciation. *Glob. Planet. Change* 204, 103584.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103584>

- Hinnov, L.A., 2013. Cyclostratigraphy and its revolutionizing applications in the earth and planetary sciences. *GSA Bull.* 125, 1703–1734. <https://doi.org/10.1130/B30934.1>
- Hinnov, L.A., Hilgen, F.J., 2012. Cyclostratigraphy and astrochronology. In: Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D., Ogg, G.M. (Eds.), *The Geologic Time Scale*. Elsevier, pp. 63–83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00004-4>
- Kent, D.V., Olsen, P.E., Rasmussen, C., Lepre, C., Mundil, R., Irmis, R.B., et al., 2018. Empirical evidence for stability of the 405-kiloyear Jupiter–Venus eccentricity cycle over hundreds of millions of years. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 6153–6158. <https://doi.org/10.1073/pnas.1800891115>
- Kietzmann, D.A., Palma, R.M., Iglesia Llanos, M.P., 2015. Cyclostratigraphy of an orbitally-driven Tithonian-Valanginian carbonate ramp succession, southern Mendoza, Argentina: Implications for the Jurassic-Cretaceous boundary in the Neuquén Basin. *Sediment. Geol.* 315, 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2014.11.002>
- Kodama, K.P., Hinnov, L.A., 2015. *Rock magnetic cyclostratigraphy*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118561294>
- Lana, C.C., 1997. Palinologia e estratigrafia integrada da seção Cenomaniano médio-Turoniano inferior da porção centro-leste da Bacia Potiguar, NE do Brasil. M.Sc. thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- Lanci, L., Galeotti, S., Ratcliffe, K., Tohver, E., Wilson, A., Flint, S., 2022. Astronomically forced cycles in Middle Permian fluvial sediments from Karoo Basin (South Africa). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 596, 110973. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.110973>
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A.C.M., Levrard, B., 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astron. Astrophys.* 428, 261–285. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335>
- Laurin, J., Kędzior, A., Naglik, B., Nadłonek, W., Opluštil, S., 2024. Eccentricity control on fluvial sedimentation in the tropics during the Middle-Late Pennsylvanian icehouse (~306–314 Ma, Upper Silesian Basin). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 654, 112420. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2024.112420>

- Leandro, C., Savian, J., Kochhann, M., Franco, D., Coccioni, R., Frontalini, F., Gardin, S., Jovane, L., Figueiredo, M., Tedeschi, L., Janikian, L., Almeida, R., Trindade, R., 2022. Astronomical tuning of the Aptian stage and its implications for age recalibrations and paleoclimatic events. *Nat. Commun.* 13, 2941. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30075-3>
- Li, M., Hinnov, L., Kump, L., 2019. Acycle: Time-series analysis software for paleoclimate research and education. *Comput. Geosci.* 127, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.02.011>
- Li, M., Huang, C., Hinnov, L., Chen, W., Ogg, J., Tian, W., 2018. Astrochronology of the Anisian stage (Middle Triassic) at the Guandao reference section, South China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 482, 591–606. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.11.042>
- Li, M., Huang, C., Ogg, J., Zhang, Y., Hinnov, L., Wu, H., Chen, Z.-Q., Zou, Z., 2019. Paleoclimate proxies for cyclostratigraphy: Comparative analysis using a Lower Triassic marine section in South China. *Earth-Sci. Rev.* 189, 125–146. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.01.011>
- Li, M., Kump, L., Hinnov, L.A., Mann, M.E., 2018. Tracking variable sedimentation rates and astronomical forcing in Phanerozoic paleoclimate proxy series with evolutionary correlation coefficients and hypothesis testing. *Earth Planet. Sci. Lett.* 501, 165–179. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.08.041>
- Liu, W., Wu, H., Hinnov, L.A., Baddouh, M.B., Wang, P., Gao, Y., Zhang, S., Yang, T., Li, H., Wang, C., 2020. An 11-million-year-long record of astronomically forced fluvial-alluvial deposition and paleoclimate change in the Early Cretaceous Songliao synrift basin, China. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 541, 109555. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109555>
- Liu, Y., Li, H., Peng, P., Wu, M., Yan, N., Qin, X., Zhang, Y., 2024. High-resolution sequence stratigraphy research based on continuous wavelet transform and INPEFA: A case study in the Kalashayi Formation, Tarim Basin, China. *Unconv. Resour.* 4, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2024.100099>
- Liu, Z., Huang, C., Algeo, T.J., Liu, J., Hao, Y., Du, X., Lu, Y., Chen, P., Guo, L., Peng, L., 2018. High-resolution astrochronological record for the Paleocene-Oligocene (66–23 Ma) from the rapidly subsiding Bohai Bay Basin, northeastern China. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 510, 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.10.030>

- Mann, M.E., Lees, J.M., 1996. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. *Clim. Change* 33, 409–445. <https://doi.org/10.1007/BF00142586>
- Matos, R.M.D., 1987. Sistema de “rifts” cretáceos do Nordeste Brasileiro. *Semin. Tectônica Petrobras* 1, 126–159.
- Matos, R.M.D., 1992. The northeast Brazilian rift system. *Tectonics* 11, 766–791. <https://doi.org/10.1029/91TC03092>
- Matos, R.M.D., 1999. History of the northeast Brazilian rift system: Kinematic implications for the break-up between Brazil and West Africa. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 153, 55–73. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.153.01.04>
- Matos, R.M.D., 2000. Tectonic evolution of the equatorial South Atlantic. In: Mohriak, W.U., Talwani, M. (Eds.), *Atlantic Rifts and Continental Margins*, Vol. 115. AGU Geophys. Monogr., pp. 331–354. <https://doi.org/10.1029/GM115p0331>
- Melo, A.H., Andrade, P.R.O., Magalhães, A.J.C., Fragoso, D.G.C., Lima-Filho, F.P., 2019. Stratigraphic evolution from the early Albian to late Campanian of the Potiguar Basin, Northeast Brazil: An approach in seismic scale. *Basin Res.* 1–27. <https://doi.org/10.1111/bre.12414>
- Melo, A.H., Magalhães, A.J.C., Menegazzo, M.C., Fragoso, D.G.C., Florencio, C.P., 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. *Mar. Pet. Geol.* 130, 105124. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105124>
- Meyers, S.R., 2019. Cyclostratigraphy and the problem of astrochronologic testing. *Earth-Sci. Rev.* 190, 190–223. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.11.015>
- Nainggolan, H.B., Winardhi, S., 2019. Geophysical approach to improve well correlation and stratigraphy package in the frontier area: Example case of Upper Jurassic Fm. Semai Basin, Eastern Indonesia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 311, 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/311/1/012054>
- Nascimento, L.R., 2013. Palinoestratigrafia e paleoecologia da sequência lacustre do cretáceo inferior em Serra Negra-PE, Bacia sedimentar do Jatobá, NE do Brasil Ph.D. thesis. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil.

- Nio, S.D., Brouwer, J., Smith, D.G., De Jong, M., Böhm, A., 2005. Spectral trend attribute analysis: Applications in the stratigraphic analysis of wireline logs. *First Break* 23, 71–75. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.23.4.26503>
- Pas, D., Hinnov, L.A., Day, J., Kodama, K., Sinnesael, M., Liu, W., 2018. Cyclostratigraphic calibration of the Famennian Stage (Late Devonian, Illinois Basin, USA). *Earth Planet. Sci. Lett.* 488, 102–114. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.02.010>
- Peng, C., Zou, C., Zhang, S., Shu, J., Wang, C., 2024. Geophysical logs as proxies for cyclostratigraphy: Sensitivity evaluation, proxy selection, and paleoclimatic interpretation. *Earth-Sci. Rev.* 104735. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104735>
- Neto, O. P., Soares, U.M., Silva, J.G.F., Roesner, E.H., Florencio, C.P., Souza, C.A.V., 2007. Bacia Potiguar. *Bol. Geociênc. Petrobras* 15, 357–369.
- Neto, O. P., 2003. Estratigrafia de sequências da plataforma mista Neogênica na Bacia Potiguar, margem equatorial brasileira. *Rev. Bras. Geociênc.* 33, 263–278.
- Pratama, I.P., Helnasi, L., Ranjani, R., 2016. Applying cyclostratigraphy for better correlation result and comparison with sequence stratigraphy. In: *Proc. Indones. Pet. Assoc., 40th Annu. Conv. Exhib., May 2016, Jakarta, Indonesia.*
- Qayyum, F., Smith, D., 2014. Integrated sequence stratigraphy using trend logs and densely mapped seismic data. *First Break* 32, 75–84. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.32.12.78856>
- Santos, S.C.N., 2009. Análise estratigráfica e caracterização faciológica de depósitos sedimentares neocretácicos pertencentes à Formação Açú, Bacia Potiguar emersa e RN. M.Sc thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil.
- Schwarzacher, W., 1993. *Cyclostratigraphy and the Milankovitch theory.* Elsevier, Amsterdam.
- Sevillano, A., Bádenas, B., Rosales, I., Barnolas, A., López-García, J.M., 2020. Orbital cycles, differential subsidence and internal factors controlling the high-frequency sequence architecture in a Sinemurian shallow carbonate platform (Mallorca island, Spain). *Sediment. Geol.* 407, 105729. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105729>
- Shi, M., Wu, H., Ferré, E.C., Satolli, S., Fang, Q., Nie, Y., Qin, Y., Zhang, S., Yang, T., Li, H., 2022. Middle Miocene-Pleistocene magneto-cyclostratigraphy from IODP Site U1501 in the Northern South China Sea. *Front. Earth Sci.* 10, 882617. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.882617>

- Strasser, A., Hilgen, F.J., Heckel, P.H., 2006. Cyclostratigraphy—concepts, definitions, and applications. *Newsl. Stratigr.* 42, 75–114. <https://doi.org/10.1127/0078-0421/2006/0042-0075>
- Thomson, D., 1982. Spectrum estimation and harmonic analysis. *IEEE Proc.* 70, 1055–1096. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12433>
- Tibana, P., Terra, G.J.S., 1981. Sequências carbonáticas no Cretáceo da Bacia Potiguar. *Bol. Téc. Petrobras* 24, 174–183.
- Vasconcelos, E.P., Lima Neto, F.F., Roos, S., 1990. Unidades de correlação da Formação Açú – Bacia Potiguar. In: *Congr. Bras. Geol.* 36, 227–240.
- Viviers, M.C., Regali, M.S.P., 1987. Estudo paleoambiental preliminar do Cretáceo da Bacia Potiguar. *Rev. Bras. Geociênc.* 17, 123–130.
- Wang, M., Li, M., Hajek, E.A., Kemp, D.B., Wu, Y., Zhu, H., Jin, Z., 2024. Assessing the preservation of orbital signals across different sedimentary environments: insights from stochastic sedimentation modeling. *Earth Planet. Sci. Lett.* 642, 118866. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.118866>
- Wang, R., Xie, J., Ran, A.H., Wang, S.C., Wang, J.K., Hu, X., Zhou, Y.W., 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. *J. Pet. Explor. Prod. Technol.* 12, 3213–3225. <https://doi.org/10.1007/s13202-022-01523-z>
- Weedon, G.P., 2003. Time-series analysis and cyclostratigraphy: examining stratigraphic records of environmental cycles. Cambridge University Press, Cambridge.
- Wu, H., Zhang, S., Hinnov, L.A., Jiang, G., Feng, Q., Li, H., Yang, T., 2013. Time-calibrated Milankovitch cycles for the late Permian. *Nat. Commun.* 4, 2451. <https://doi.org/10.1038/ncomms3452>
- Wu, H., Zhang, S., Jiang, G., Huang, Q., 2009. The floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation from the Songliao Basin of Northeast China and its stratigraphic and paleoclimate implications. *Earth Planet. Sci. Lett.* 278, 308–323. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.016>
- Yang, W., Wan, M., Crowley, J.L., Wang, J., Luo, X., Tabor, N., Angielczyk, K.D., Gastaldo, R., Geissman, J., Liu, F., Roopnarine, P., Sidor, C.A., 2021. Paleoenvironmental and paleoclimatic evolution and cyclo- and chrono-stratigraphy of upper Permian–Lower

- Triassic fluvial lacustrine deposits in Bogda Mountains, NW China – implications for diachronous plant evolution across the Permian-Triassic boundary. *Earth-Sci. Rev.* 222, 103741. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103741>
- Yuan, R., Zhu, R., Qu, J., Wu, J., You, X., Sun, Y., Zhou, Y., 2018. Utilizing integrated prediction error filter analysis (INPEFA) to divide base-level cycle of fan-deltas: a case study of the Triassic Baikouquan Formation in Mabei Slope Area, Mahu Depression, Junggar Basin, China. *Open Geosci.* 10, 79–86. <https://doi.org/10.1515/geo-2018-0007>
- Zhang, Y., Yi, L., Ogg, J.G., 2019. Pliocene-Pleistocene magneto-cyclostratigraphy of IODP Site U1499 and implications for climate-driven sedimentation in the Northern South China Sea. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 527, 118–132. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.04.029>
- Zulivandama, S.R., Razi, F., Taslim, J.N., Winardhi, I.S., 2018. Sequence analysis on carbonate formation using integrated prediction error filter analysis (INPEFA) approach. In: *The 43rd Annu. Sci. Meet. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia*, Semarang, 24–27.

6. Considerações finais

A aplicação de técnicas ciclostratigráficas em ambientes flúvio-estuarinos apresenta desafios inerentes, decorrentes da natureza dinâmica da sedimentação, a qual é influenciada por processos autogênicos e alogênicos. Apesar dessas dificuldades, os resultados deste estudo confirmam a presença de forçantes orbitais como controle fundamental sobre o registro deposicional, corroborando trabalhos anteriores que demonstraram a preservação de ciclos de Milankovitch em contextos semelhantes. Este estudo analisa duas sequências deposicionais observadas em dois poços proximais (poços 1 e 2) e um poço transicional (poço 3), associados a depósitos flúvio-estuarinos. O arcabouço cronoestratigráfico de alta resolução estabelecido por Melo et al. (2019), que integra múltiplos poços ao longo de seções sísmicas orientadas no sentido do mergulho, forneceu uma base sólida para o desenvolvimento desta pesquisa. Considerando a natureza dinâmica do ambiente deposicional, o objetivo foi avaliar se os ciclos orbitais influenciaram a preservação sedimentar e se processos erosivos removeram partes do registro cíclico.

A análise ciclostratigráfica, realizada por meio de avaliação de séries temporais dos dados de perfil gama (GR), revelou a assinatura das forçantes orbitais no registro deposicional. Inicialmente, essas análises permitiram a identificação de uma escala de tempo astronômica flutuante consistente para os depósitos Cenomanianos–Turonianos da Bacia Potiguar, com base na correlação entre dois poços. Posteriormente, um terceiro poço foi analisado com o intuito de compreender como a influência orbital e a preservação sedimentar evoluem em direção ao depocentro. As dificuldades na correlação entre ciclos foram superadas com o uso do método INPEFA, que se mostrou uma ferramenta auxiliar eficaz no reconhecimento de padrões estratigráficos. Como resultado, a ATS foi expandida, possibilitando a identificação de um intervalo temporal não registrado nos poços 1 e 2, além da estimativa da duração dos hiatos associados à superfície de inconformidade SU3 em ambiente continental (Fig. 8).

Adicionalmente, os ciclos transgressivo-regressivos (T-R), identificados a partir dos padrões de raios gama (GR) e das tendências de empilhamento — e interpretados como ciclos de quarta ordem no arcabouço estratigráfico — foram associados à escala da excentricidade de longo período (E405) (Fig. 7). Esse resultado reforça a hipótese de que os ciclos de quarta ordem são controlados por variações orbitais de excentricidade longa, evidenciam correlação lateral consistente entre os poços e contribuem de forma significativa para o aumento da resolução nas correlações estratigráficas.

Dessa forma, este estudo confirma a influência das forçantes orbitais sobre o registro deposicional flúvio-estuarino da Formação Açu, aprimora as correlações estratigráficas e permite a estimativa dos intervalos temporais preservados. Esses resultados contribuem de maneira significativa para os estudos ciclostratigráficos em ambientes altamente dinâmicos e demonstram a aplicabilidade dessa abordagem para correlação entre poços e interpretação do preenchimento de bacias, especialmente no desenvolvimento de arcabouços cronoestratigráficos mais precisos em bacias exploratórias.

7. Bibliografia

- ABELS, A., KRAUS, M.J., GINGERICH, P.D., 2013. Precession-scale cyclicity in the fluvial lower Eocene Willwood Formation of the Bighorn Basin, Wyoming (USA). *Sedimentology*, 60(5), 1467–1483. <https://doi.org/10.1111/sed.12039>.
- ARAI, M., 2001. Palinologia de depósitos cretáceos no Norte e Meio-Norte do Brasil: Histórico e estado-da-arte. In: Rossetti, D.F., Truckenbrodt, W., Góes, A.M. (Eds.), *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, pp. 175–189.
- ARARIPE, P. T., & FEIJÓ, F. J., 1994. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8(1), 127–141.
- BAGNOLI, E., 1992. The Mossoro sandstone, Canto do Amaro oil field, Late Cretaceous of Potiguar Basin, Brazil: An example of a tidal inlet-channel reservoir. In E. G. Rhodes & T. F. Moslow (Eds.), *Marine and clastic reservoirs: Examples and analogues*. Springer-Verlag, pp. 183–200.
- BAO, X., ZHANG, S., JIANG, G., WU, H., LI, H., WANG, X., AN, Z., & YANG, T., 2018. Cyclostratigraphic constraints on the duration of the Datangpo Formation and the onset age of the Nantuo (Marinoan) glaciation in South China. *Earth and Planetary Science Letters* 483, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.12.001>
- BATENBURG, S. J., SPROVIERI, M., GALE, A. S., HILGEN, F. J., HUSING, S., LASKAR, J., LIEBRAND, D., LIRER, F., ORUE-ETXEBARRIA, X., PELOSI, N., & SMIT, J., 2012. Cyclostratigraphy and astronomical tuning of the late Maastrichtian at Zumaia (Basque Country, Spain). *Earth and Planetary Science Letters*, 359–360, 264–278. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.09.054>
- BERGER, A., LOUTRE, M. F., & DEHANT, V., 1989. Influence of the changing lunar orbit on the astronomical frequencies of pre-Quaternary insolation patterns. *Paleoceanography*, 4(5), 555–564. <https://doi.org/10.1029/PA004i005p00555>
- BERGER, A., LOUTRE, M. F., & LASKAR, J., 1992. Stability of the astronomical frequencies over the Earth's history for paleoclimatic studies. *Science*, 255(5044), 560–566. <https://doi.org/10.1126/science.255.5044.560>
- BERGER, A., LOUTRE, M. F., DE BOER, P. L., & SMITH, D. G., 1994. Astronomical forcing through geological time. In: De Boer, P.L., Smith, D.G. (Eds.), *Orbital forcing and cyclic sequences*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 15–24.
- BERTANI, R. T., COSTA, I. G., & MATOS, R. M. D., 1990. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo da Bacia Potiguar. In Raja Gabaglia, G. P., & Milani, E. J. (Eds.), *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Petrobras, pp. 273–286.
- CASTRO, J. C., 1992. Facies, reservoirs and stratigraphic framework of the Mossoró Basin Member (Latest Cenomanian to Earliest Turonian) in Potiguar Basin, NE Brazil: An example of a tide and wave dominated delta. In E. G. Rhodes & T. F. Moslow (Eds.), *Marine and clastic reservoirs: Examples and analogues* Springer-Verlag, pp. 161–182.

- CASTRO, J.C., VIVIERS, M.C., REGALI, M.S.P., 1986. A sedimentação em cânions submarinos e deltas marinhos no Cenomaniano da Bacia Potiguar. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Geologia*, Vol. 1, pp. 298–307.
- CASTRO, J.C., VIVIERS, M.C., REGALI, M.S.P., 1988. Stratigraphic analysis of the marine Cretaceous in the eastern margin of the Potiguar Basin. *Rev. Bras. Geociênc.*, 18(2), 231–236.
- CÓRDOBA, V.C., 2001. *A evolução da plataforma carbonática Jandaíra durante o Neocretáceo da Bacia Potiguar: Análise paleoambiental, diagenética e estratigráfica*. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista.
- DE CASTRO, D.L., BEZERRA, F.H.R., SOUSA, M.O.L., FUCK, R.A., 2012. Influence of Neoproterozoic tectonic fabric on the origin of the Potiguar Basin, northeastern Brazil and its links with West Africa based on gravity and magnetic data. *J. Geodyn.*, 54, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.09.002>
- DE JONG, M. G. G., NIO, S. D., SMITH, D. G., & BÖHM, A. R., 2007. Subsurface correlation in the Upper Carboniferous (Westphalian) of the Anglo-Dutch Basin using the climate stratigraphic approach. *First Break*, 25: 49–59.
- DINARÈS-TURELL, J., WESTERHOLD, T., PUJALTE, V., RÖHL, U., KROON, D., 2014. Astronomical calibration of the Danian stage (Early Paleocene) revisited: Settling chronologies of sedimentary records across the Atlantic and Pacific Oceans. *Earth and Planet Sci. Lett.*, 405, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.08.027>
- FRAGOSO, D.G.C., RAJA GABAGLIA, G.P., MAGALHÃES, A.J.C., SCHERER, C.M.S., 2021. Cyclicity and hierarchy in sequence stratigraphy: An integrated approach. *Braz. J. of Geol.*, 51, 1–32.
- FRANCO, D.R., 2007. *Magnetoestratigrafia e análise espectral de ritmitos permocarboníferos da Bacia do Paraná: Influências dos ciclos orbitais no regime deposicional*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.1130/G32338.1>
- FRANCO, D.R., HINNOV, L.A., ERNESTO, M., 2012. Millennial-scale climate cycles in Permian–Carboniferous rhythmites: Permanent feature throughout geologic time. *Geology*, 40(1), 19–22.
- HILGEN, F., ZEEDEN, C., & LASKAR, J., 2020. Paleoclimate records reveal elusive ~200-kyr eccentricity cycle for the first time. *Global and Planetary Change*, 194, 103296. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103296>
- HILGEN, F.J., HINNOV, L.A., ABDUL AZIZ, H., ABELS, H.A., BATENBURG, S., BOSMANS, J.H. C., ZEEDEN, C., 2015. Stratigraphic continuity and fragmentary sedimentation: The success of cyclostratigraphy as part of integrated stratigraphy. *Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, 404(1), 157–197.
- HILGEN, F.J., SCHWARZACHER, W., STRASSER, A., 2004. Concept and definitions in cyclostratigraphy (Second Report of the Cyclostratigraphy Working Group). *Int. Subcomm. Stratigr. Nomencl. IUGS Comm. Stratigr.*

- HINNOV, L. A., & HILGEN, F. J., 2012. Cyclostratigraphy and astrochronology. In: *The Geological Time Scale*, pp. 63–83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00004-4>
- HINNOV, L. A., 2000. New perspectives on orbitally forced stratigraphy. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1), 419–475. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.419>
- HINNOV, L. A., 2013. Cyclostratigraphy and its revolutionizing applications in the Earth and planetary sciences. *GSA Bulletin*, 125, 1703–1734. <https://doi.org/10.1130/B30934.1>
- HINNOV, L. A., 2018. Cyclostratigraphy and astrochronology in 2018. In: *Stratigraphy & Timescales*, vol. 3, pp. 1–80. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.sats.2018.08.001>
- HUANG, H., GAO, Y., JONES, M. M., TAO, H., CARROLL, A. R., IBARRA, D. E., WU, H., & WANG, C., 2020. Astronomical forcing of Middle Permian terrestrial climate recorded in a large paleolake in northwestern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 550, 109735. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109735>
- KIETZMANN, D. A., PALMA, R. M., & IGLESIA LLANOS, M. P., 2015. Cyclostratigraphy of an orbitally-driven Tithonian–Valanginian carbonate ramp succession, southern Mendoza, Argentina: Implications for the Jurassic–Cretaceous boundary in the Neuquén Basin. *Sedimentary Geology*, 315, 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2014.11.002>
- KODAMA, K. P., & HINNOV, L. A., 2015. *Rock magnetic cyclostratigraphy*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118561294>
- KODAMA, L. A. H. K. P., 2014. *Rock magnetic cyclostratigraphy* (1st ed.). Wiley-Blackwell. (Analytical Methods in Earth and Environmental Science). ISBN 1118561287, 9781118561287.
- LANA, C. C., 1997. Palinologia e estratigrafia integrada da seção Cenomaniano médio-Turoniano inferior da porção centro-leste da Bacia Potiguar, NE do Brasil [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul].
- LANCI, L., GALEOTTI, S., RATCLIFFE, K., TOHVER, E., WILSON, A., & FLINT, S., 2022. Astronomically forced cycles in Middle Permian fluvial sediments from Karoo Basin (South Africa). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 596, 110973. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.110973>
- LASKAR, J., 1990. The chaotic motion of the Solar System: A numerical estimate of the size of the chaotic zones. *Icarus*, 88(2), 266–291. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(90\)90084-M](https://doi.org/10.1016/0019-1035(90)90084-M)
- LASKAR, J., 2008. Chaotic diffusion in the Solar System. *Icarus*, 196(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2008.02.017>
- LASKAR, J., 2015. Stability of the Solar System. http://www.scholarpedia.org/article/Stability_of_the_solar_system

- LASKAR, J., FIENGA, A., GASTINEAU, M., & MANCHE, H., 2011. La2010: A new orbital solution for the long-term motion of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 532, A89. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116836>
- LASKAR, J., ROBUTEL, P., JOUTEL, F., GASTINEAU, M., CORREIA, A. C. M., & LEVRARD, B., 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 428, 261–285. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335>
- LEANDRO, C., SAVIAN, J., KOCHHANN, M., FRANCO, D., COCCIONI, R., FRONTALINI, F., GARDIN, S., JOVANE, L., FIGUEIREDO, M., TEDESCHI, L., JANIKIAN, L., ALMEIDA, R., & TRINDADE, R., 2022. Astronomical tuning of the Aptian stage and its implications for age recalibrations and paleoclimatic events. *Nature Communications*, 13, Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30075-3>
- LI, M., HINNOV, L., & KUMP, L., 2019a. Acycle: Time-series analysis software for paleoclimate research and education. *Computers & Geosciences*, 127, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.02.011>
- LI, M., HUANG, C., HINNOV, L., CHEN, W., OGG, J., & TIAN, W., 2018b. Astrochronology of the Anisian stage (Middle Triassic) at the Guandao reference section, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 482, 591–606. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.11.042>
- LI, M., HUANG, C., OGG, J., ZHANG, Y., HINNOV, L., WU, H., CHEN, Z.-Q., & ZOU, Z., 2019. Paleoclimate proxies for cyclostratigraphy: Comparative analysis using a Lower Triassic marine section in South China. *Earth-Science Reviews*, 189, 125–146. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.01.011>
- LI, M., KUMP, L., HINNOV, L. A., & MANN, M. E., 2018a. Tracking variable sedimentation rates and astronomical forcing in Phanerozoic paleoclimate proxy series with 81 evolutionary correlation coefficients and hypothesis testing. *Earth and Planetary Science Letters*, 501, 165–179. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.08.041>
- LI, X., FENG, J., MENG, Y., HAN, Q., WU, F., & LI, J., 2019b. A unified MRC framework for named entity recognition. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1910.11476>
- LIU, W., WU, H., HINNOV, L. A., BADDOUH, M. B., WANG, P., GAO, Y., ZHANG, S., YANG, T., LI, H., & WANG, C., 2020. An 11 million-year-long record of astronomically forced fluvial-alluvial deposition and paleoclimate change in the Early Cretaceous Songliao synrift basin, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 541, 109555. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109555>
- LIU, Y., LI, H., PENG, P., WU, M., YAN, N., QIN, X., & ZHANG, Y., 2024. High-resolution sequence stratigraphy research based on continuous wavelet transform and INPEFA: A case study in the Kalashayi Formation, Tarim Basin, China. *Unconventional Resources*, 4, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2024.100099>
- LIU, Z., HUANG, C., ALGEO, T. J., LIU, J., HAO, Y., DU, X., LU, Y., CHEN, P., GUO, L., & PENG, L., 2018. High-resolution astrochronological record for the Paleocene-Oligocene (66–23 Ma) from the rapidly subsiding Bohai Bay Basin, northeastern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 510, 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.01.019>

- LOVEJOY, S., & SCHERTZER, D., 2013. *The weather and climate: Emergent laws and multifractal cascades*. Cambridge University Press.
- MASLIN, M. A., 2016. In retrospect: Forty years of linking orbits to ice ages. *Nature*, 540: 208a. <https://doi.org/10.1038/540208a>
- MATOS, R. M. D., 1987. Sistema de “rifts” cretáceos do Nordeste Brasileiro. In: Atas do Seminário de Tectônica da Petrobras, 1: 126–159. Petrobras/Depex.
- MATOS, R. M. D., 1992. The northeast Brazilian rift system. *Tectonics*, 11(4): 766–791. <https://doi.org/10.1029/92TC00410>
- MATOS, R. M. D., 1999. History of the northeast Brazilian rift system: Kinematic implications for the break-up between Brazil and West Africa. *Geological Society, London, Special Publications*, 153(1): 55–73. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.153.01.04>
- MATOS, R. M. D., 2000. Tectonic evolution of the equatorial South Atlantic. In: MOHRIAK, W. U., & TALWANI, M. (Eds.), *Atlantic Rifts and Continental Margins*, 115: 331–354. AGU Geophysical Monograph. <https://doi.org/10.1029/GM115p0331>
- MELO, A. H., ANDRADE, P. R. O., MAGALHÃES, A. J. C., FRAGOSO, D. G. C., & LIMA-FILHO, F. P., 2019. Stratigraphic evolution from the early Albian to late Campanian of the Potiguar Basin, Northeast Brazil: An approach in seismic scale. *Basin Research*, 1–27. <https://doi.org/10.1111/bre.12414>
- MELO, A.H., MAGALHÃES, A.J.C., MENEGAZZO, M.C., FRAGOSO, D.G.C., FLORENCIO, C.P., 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. *Mar. Pet. Geol.* 130, 105124. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105124>
- MEYERS, S. R., 2019. Cyclostratigraphy and the problem of astrochronologic testing. *Earth-Science Reviews*, 190: 190–223. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.11.015>
- MITCHELL, J. M., 1976. An overview of climatic variability and its causal mechanisms. *Quaternary Research*, 6(4): 481–493. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(76\)90021-1](https://doi.org/10.1016/0033-5894(76)90021-1)
- MURPHY, M. A., & SALVADOR, A., 1999. International stratigraphic guide – An abridged version. *Episodes*, 22(4): 255–271. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1999/v22i4/002>
- MURRAY, M., BULLARD, M., & GRAFSTEIN, E., 2004. Revisions to the Canadian emergency department triage and acuity scale implementation guidelines. *Canadian Journal of Emergency Medicine*, 6(6): 421–427.
- NAINGGOLAN, H., & WINARDHI, S., 2019. Geophysical approach to improve well correlation and stratigraphy package in the frontier area: Example case of Upper Jurassic Fm. Semai Basin, Eastern Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 311: 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/311/1/012054>

- NASCIMENTO, L. R., 2013. Palinoestratigrafia e paleoecologia da sequência lacustre do Cretáceo Inferior em Serra Negra-PE, Bacia sedimentar do Jatobá, NE do Brasil. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.
- NEWMAN, P. A., COY, L., PAWSON, S., & LAIT, L. R., 2016. The anomalous change in the QBO in 2015–2016. *Geophysical Research Letters*, 43(16): 8791–8797. <https://doi.org/10.1002/2016GL070373>
- NIO, S. D., BROUWER, J., SMITH, D. G., DE JONG, M., & BÖHM, A., 2005. Spectral trend attribute analysis: Applications in the stratigraphic analysis of wireline logs. *First Break*, 23(4): 71–75. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.23.4.26503>
- PARIZZI, M. G., 1993. A gênese e a dinâmica da Lagoa Santa com base em estudos palinológicos, geomorfológicos e geológicos de sua bacia. Relatório técnico, 60 p., Departamento de Geologia, IGC-UFMG.
- PAS, D., HINNOV, L. A., DAY, J., KODAMA, K., SINNESAEEL, M., & LIU, W., 2018. Cyclostratigraphic calibration of the Famennian Stage (Late Devonian, Illinois Basin, USA). *Earth and Planetary Science Letters*, 488: 102–114. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.02.010>
- PAYTON, C. E., 1977. Seismic stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration. In: *Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration*. Memoir 26: 5–16. American Association of Petroleum Geologists.
- PENG, C., ZOU, C., ZHANG, S., SHU, J., & WANG, C., 2024. Geophysical logs as proxies for cyclostratigraphy: Sensitivity evaluation, proxy selection, and paleoclimatic interpretation. *Earth-Science Reviews*, 247: 104735. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104735>
- PEREIRA, J. L. G., BATISTA, G. T., THALÊS, M. C., ROBERTS, D. A., & VENTURIERI, A., 2001. Métricas da paisagem na caracterização da evolução da ocupação da Amazônia. *Geografia*: 59–90.
- PERLMUTTER, M. A., & AZAMBUJA FILHO, N. C., 2005. Cyclostratigraphy. In: KOUTSOUKOS, E. A. M. (Ed.), *Applied Stratigraphy*: 301–338. Elsevier.
- PESSOA NETO, O. C., SOARES, U. M., SILVA, J. G. F., ROESNER, E. H., FLORENCIO, C. P., & SOUZA, C. A. V., 2007. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 357–369.
- PESSOA, O. C., 2003. Estratigrafia de sequências da plataforma mista Neogênica na Bacia Potiguar, margem equatorial brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(3): 263–278.
- PHILANDER, S. G. H., 1990. *El Niño and the Southern Oscillation*. Academic Press.
- PILLANS, B., 2007. Chronostratigraphy. In: *Encyclopedia of Quaternary Science*: xxx–xxx. Elsevier.

- POSAMENTIER, H. W., JERVEY, M. T., & VAIL, P. R., 1988. Eustatic controls on clastic deposition I – Conceptual framework. In: WILGUS, C. K. et al. (Eds.), *Sea-level changes: An integrated approach*: 109–124. SEPM Special Publications No. 42.
- QAYYUM, F., & SMITH, D., 2014. Integrated sequence stratigraphy using trend logs and densely mapped seismic data. *First Break*, 32: 75–84.
- REGALI, M. S. P., UESUGUI, N., & SANTOS, A. S., 1974. Palinologia dos sedimentos meso-cenozóicos do Brasil. *Boletim Técnico da Petrobras*, 17(3): 177–191.
- RUDDIMAN, W. F., 2008. *Earth's climate: Past and future*. 2nd ed., W. H. Freeman and Company.
- SALVADOR, A. (Ed.), 1994. *International stratigraphic guide*, second ed. Geological Society of America, p. 214.
- SAMPAIO, A.V., SCHALLER, H., 1968. Introdução à estratigrafia cretácea da Bacia Potiguar. *Boletim Técnico da Petrobras* 11(1), 19–44.
- SANTOS, S.C.N., 2009. Análise estratigráfica e caracterização faciológica de depósitos sedimentares neocretácicos pertencentes à Formação Açu, Bacia Potiguar emersa e RN. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SCHWARZACHER, W., 1975. *Sedimentation models and quantitative stratigraphy*. Elsevier, Amsterdam.
- SCHWARZACHER, W., 1993. *Cyclostratigraphy and the Milankovitch theory*. Elsevier, Amsterdam.
- SHI, M., WU, H., FERRÉ, E.C., SATOLLI, S., FANG, Q., NIE, Y., QIN, Y., ZHANG, S., YANG, T., LI, H., 2022. Middle Miocene–Pleistocene magneto-cyclostratigraphy from IODP Site U1501 in the Northern South China Sea. *Frontiers in Earth Science* 10, 882617. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.882617>
- SINNESAEI, M., DE VLEESCHOUWER, D., ZEEDEN, C., BATENBURG, S.J., DA SILVA, A.-C., DE WINTER, N.J., CLAEYS, P., 2019. The Cyclostratigraphy Intercomparison Project (CIP): Consistency, merits and pitfalls. *Earth-Science Reviews* 199, 102965.
- SLOSS, L.L., KRUMBEIN, W.C., DAPPLES, E.C., 1949. Integrated facies analysis. In: LONGWELL, C.R. (Ed.), *Sedimentary facies in geologic history*. Geological Society of America Memoir 39, pp. 91–124.
- STRASSER, A., HILGEN, F.J., HECKEL, P.H., 2006. Cyclostratigraphy – Concepts, definitions, and applications. *Newsletters on Stratigraphy* 42(2), 75–114. <https://doi.org/10.1127/0078-0421/2006/0042-0075>
- THOMSON, D., 1982. Spectrum estimation and harmonic analysis. *Proceedings of the IEEE* 70(9), 1055–1096. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12433>

- TIBANA, P., TERRA, G.J.S., 1981. Sequências carbonáticas no Cretáceo da Bacia Potiguar. *Boletim Técnico da Petrobras* 24(3), 174–183.
- TRAVERSE, A., 2007. *Paleopalynology*, second ed. Springer, Dordrecht.
- VAN WAGONER, J.C., POSAMENTIER, H.W., MITCHUM, R.M., VAIL, P.R., SARG, J.F., LOUTIT, T.S., HANDERBOL, J., 1988. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. In: WILGUS, C.K., et al. (Eds.), *Sea-level changes: An integrated approach*. SEPM Special Publication 42, pp. 39–45.
- VASCONCELOS, E.P., LIMA NETO, F.F., ROOS, S., 1990. Unidades de correlação da Formação Açú – Bacia Potiguar. In: 36º Congresso Brasileiro de Geologia, Natal, Anais, vol. 36, pp. 227–240.
- VIVIERS, M.C., BEURLIN, G., 1987. Sobre alguns níveis de correlação bioestratigráfica regional (foraminíferos planctônicos) no Cretáceo brasileiro. *Revista Brasileira de Geociências* 17(2), 106–110.
- VON DER HEYDT, A.S., ASHWIN, P., CAMP, C.D., CRUCIFIX, M., DIJKSTRA, H.A., DITLEVSEN, P., LENTON, T.M., 2020. Quantification and interpretation of the climate variability record. *Global and Planetary Change* 103399. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103399>
- WALLACE, J.M., 1973. General circulation of the tropical lower stratosphere. *Reviews of Geophysics* 11(2), 191–222. <https://doi.org/10.1029/RG011i002p00191>
- WALTHAM, D., 2015. Milankovitch period uncertainties and their impact on cyclostratigraphy. *Journal of Sedimentary Research* 85, 990–998. <https://doi.org/10.2110/jsr.2015.66>
- WEEDON, G.P., 2003. *Time-series analysis and cyclostratigraphy: Examining stratigraphic records of environmental cycles*. Cambridge University Press, Cambridge.
- WU, H., ZHANG, S., FENG, Q., JIANG, G., LI, H., YANG, T., 2012. Milankovitch and sub-Milankovitch cycles of the early Triassic Daye Formation, South China and their geochronological and paleoclimatic implications. *Gondwana Research* 22(2), 748–759.
- WU, H., ZHANG, S., HINNOV, L.A., JIANG, G., FENG, Q., LI, H., YANG, T., 2013. Time-calibrated Milankovitch cycles for the late Permian. *Nature Communications* 4, 2451. <https://doi.org/10.1038/ncomms3452>
- WU, H., ZHANG, S., JIANG, G., HUANG, Q., 2009. The floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation from the Songliao Basin of Northeast China and its stratigraphic and paleoclimate implications. *Earth and Planetary Science Letters* 278(3–4), 308–323. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.016>
- YANG, W., WAN, M., CROWLEY, J.L., WANG, J., LUO, X., TABOR, N., ANGIELCZYK, K.D., GASTALDO, R., GEISSMAN, J., LIU, F., ROOPNARINE, P., SIDOR, C.A., 2021. Paleoenvironmental and paleoclimatic evolution and cyclo- and chrono-stratigraphy of Upper Permian–Lower Triassic fluvial lacustrine deposits in Bogda Mountains, NW China –

Implications for diachronous plant evolution across the Permian–Triassic boundary. *Earth-Science Reviews* 222, 103741. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103741>

YUAN, R., ZHU, R., QU, J., WU, J., YOU, X., SUN, Y., ZHOU, Y., 2018. Utilizing Integrated Prediction Error Filter Analysis (INPEFA) to divide base-level cycle of fan-deltas: A case study of the Triassic Baikouquan Formation in Mabei Slope Area, Mahu Depression, Junggar Basin, China. *Open Geosciences* 10, 79–86. <https://doi.org/10.1515/geo-2018-0007>

ZACHOS, J., PAGANI, M., SLOAN, L., THOMAS, E., BILLUPS, K., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science* 292(5517), 686–693. <https://doi.org/10.1126/science.1059412>

ZHANG, Y., YI, L., OGG, J.G., 2019. Pliocene–Pleistocene magneto-cyclostratigraphy of IODP Site U1499 and implications for climate-driven sedimentation in the northern South China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 527, 118–132. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.04.029>

ZULIVANDAMA, S.R., RAZI, F., TASLIM, J.N., WINARDHI, I.S., 2018. Sequence analysis on carbonate formation using integrated prediction error filter analysis (INPEFA) approach. In: *The 43rd Annu. Sci. Meet. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia*, Semarang, 24–27.

