



<https://periodicos.ufba.br/index.php/cadgeo>
ISSN 2238-4960

Cadernos de Geociências da UFBA
v. 21, nº 01 (2026) e-262104

DOI: 10.9771/geocad.v20i0.72215



Artigo de Pesquisa

Carbonate Factory Systems no Quaternário: integração entre produção, hidrodinâmica e arquitetura estratigráfica

Carbonate Factory Systems in the Quaternary: integration of production, hydrodynamics, and stratigraphic architecture

RICARDO PIAZZA MEIRELES

Laboratório de Oceanografia Geológica - LOG

Universidade Federal da Bahia - UFBA

Salvador, Brasil

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2735-3493>

E-mail: ricardo.meireles@ufba.br

RESUMO - O Quaternário constitui um intervalo estratigráfico singular nas Geociências marinhas e costeiras, marcado por alta resolução temporal, elevada variabilidade ambiental e forte sensibilidade hidrodinâmica. Nesse contexto, a interpretação de sistemas carbonáticos é frequentemente limitada pela fragmentação conceitual entre produção sedimentar, processos hidrodinâmicos e preservação estratigráfica. Este artigo apresenta uma revisão integrada da estratigrafia e da hidrossedimentologia de carbonatos marinhos do Quaternário, com o objetivo de organizar conceitos, processos e escalas de análise em um arcabouço sistêmico. A partir de uma reavaliação do conceito clássico de *carbonate factories*, propõe-se o uso dos *Carbonate Factory Systems* (CFS) como uma ampliação conceitual que incorpora explicitamente a hidrodinâmica, a redistribuição sedimentar e a seletividade do registro estratigráfico. São discutidas as escalas de processo, de sistema e estratigráfica, enfatizando o papel dominante de eventos episódicos, correntes persistentes e reorganizações rápidas do nível relativo do mar na construção da arquitetura carbonática Quaternária. Demonstra-se que, em CFS, a produção carbonática é frequentemente desacoplada da acumulação estratigráfica, resultando em registros seletivos, hiatos e superfícies-chave. O Quaternário é, assim, apresentado como um intervalo privilegiado para a observação desses processos e para o desenvolvimento de modelos integrados aplicáveis a análogos estratigráficos mais antigos.

Palavras-chave: Carbonate Factory Systems; Estratigrafia do Quaternário; Hidrossedimentologia; Carbonatos marinhos; Arquitetura estratigráfica.

ABSTRACT - The Quaternary represents a singular stratigraphic interval in marine and coastal geosciences, characterized by high temporal resolution, pronounced environmental variability, and strong hydrodynamic sensitivity. In this context, the interpretation of carbonate systems is often constrained by conceptual fragmentation between sediment production, hydrodynamic processes, and stratigraphic preservation. This paper presents an integrated review of the stratigraphy and hydrosedimentology of Quaternary marine carbonates, aiming to organize concepts, processes, and scales of analysis within a systemic framework. Building upon a reassessment of the classical concept of carbonate factories, we propose the use of Carbonate Factory Systems (CFS) as a conceptual expansion that explicitly incorporates hydrodynamics, sediment redistribution, and the selective nature of the stratigraphic record. Process, system, and stratigraphic scales are examined, emphasizing the dominant role of episodic events, persistent currents, and rapid relative sea-level reorganizations in shaping Quaternary carbonate architectures. We demonstrate that, within CFS, carbonate production is frequently decoupled from stratigraphic accumulation, resulting in selective records, hiatuses, and key stratigraphic surfaces. The Quaternary is thus presented as a privileged interval for observing these processes and for developing integrated models applicable to older stratigraphic analogues.

Keywords: Carbonate Factory Systems; Quaternary stratigraphy; Hydrosedimentology; Marine carbonates; Stratigraphic architecture.

1. INTRODUÇÃO

O Quaternário ocupa uma posição singular nas Geociências costeiras e marinhas por concentrar, em um intervalo de tempo relativamente curto, mudanças ambientais de alta frequência e grande impacto sobre os sistemas sedimentares. Oscilações do nível do mar, variações climáticas, reorganizações hidrodinâmicas e alterações biogeoquímicas ocorreram em escalas temporais que permitem uma correlação direta entre processos observáveis e o registro estratigráfico preservado. Essa característica confere ao Quaternário um papel estratégico como laboratório natural para a compreensão da resposta dos sistemas deposicionais a forçantes ambientais rápidas e de baixa magnitude relativa, mas com efeitos sedimentares expressivos (Sadler, 1981; Schumer et al., 2011; Barefoot et al., 2023).

Diferentemente de intervalos mais antigos do registro geológico, nos quais a análise estratigráfica é frequentemente orientada por tendências médias de longo prazo, o Quaternário possibilita abordagens baseadas em alta resolução temporal. Essa alta resolução, entretanto, não implica continuidade do registro. Estudos clássicos e recentes demonstram que a estratigrafia é inerentemente descontínua, marcada por hiatos, erosão e deposição episódica, de modo que a preservação sedimentar reflete uma seleção temporal controlada por processos físicos e ambientais, fortemente dependente da escala de observação adotada (Sadler, 1981; Schumer et al., 2011). No contexto Quaternário, essa descontinuidade torna-se particularmente evidente, exigindo cautela na interpretação de taxas aparentes de sedimentação e na extrapolação de processos observados para escalas temporais mais longas.

Nesse cenário, a hidrodinâmica assume papel central na organização do registro sedimentar Quaternário. Ondas, marés, correntes e fluxos combinados não atuam apenas como mecanismos de transporte, mas como agentes estruturadores da arquitetura estratigráfica, condicionando padrões de empilhamento, conectividade e preservação dos depósitos. Em ambientes costeiros e marinhos rasos, pequenas variações na energia hidrodinâmica podem resultar em mudanças significativas na distribuição granulométrica, na geometria dos corpos sedimentares e na expressão estratigráfica dos sistemas deposicionais, particularmente em regimes de alta responsividade ambiental (Romans et al., 2016; Rivers & Dalrymple, 2025).

Os sistemas carbonáticos marinhos inserem-se de forma destacada nesse contexto, em função de sua elevada sensibilidade às condições ambientais e hidrodinâmicas. A produção carbonática ocorre dentro de janelas ambientais específicas, controladas por fatores como energia do meio, disponibilidade de luz, temperatura, nutrientes e conectividade entre plataforma e bacia. Tradicionalmente, esses sistemas têm sido interpretados a partir do conceito de “*carbonate factories*”, formulado com base no modo de precipitação do carbonato e nas associações biológicas dominantes, conforme sistematizado por Wolfgang Schlager (Schlager, 2000; 2005). Nesse sentido clássico, as *carbonate factories* descrevem essencialmente sistemas de produção carbonática, fundamentais para compreender a variabilidade ecológica e sedimentológica dos depósitos carbonáticos ao longo do tempo geológico.

À luz de avanços recentes na estratigrafia de alta resolução, na hidrossedimentologia e nos estudos de sistemas Quaternários, este artigo propõe uma ampliação conceitual formal dessa abordagem, introduzindo o termo *Carbonate Factory Systems* (CFS). Os *Carbonate Factory Systems* são aqui definidos como sistemas sedimentares integrados, nos quais uma ou mais *carbonate factories* (*sensu* Schlager) operam acopladas a

controles hidrodinâmicos, ambientais e estratigráficos, condicionando conjuntamente a produção, a redistribuição, o retrabalhamento e a preservação dos sedimentos carbonáticos ao longo do tempo geológico. Essa proposição não substitui a terminologia clássica, mas a expande e operacionaliza no contexto do tempo geológico responsivo característico do Quaternário, permitindo uma integração mais direta entre facies sedimentares, processos físicos, controles ambientais e expressão estratigráfica (ver Reijmer, 2016; 2021- para uma leitura mais ampla).

Apesar dos avanços conceituais e metodológicos, estudos Quaternários frequentemente abordam esses elementos de forma segmentada, com ênfases isoladas em estratigrafia, processos hidrodinâmicos, geoquímica ou modelos de produção carbonática. Essa especialização, embora essencial para o aprofundamento do conhecimento, pode dificultar uma visão integrada da resposta dos Sistemas Carbonáticos Quaternários, especialmente quando se busca relacionar processos de curta duração a padrões estratigráficos observáveis em diferentes escalas (Catuneanu et al., 2011; Rivers & Dalrymple, 2025).

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo organizar conceitos, processos e escalas de análise aplicáveis à estratigrafia e à hidrossedimentologia de carbonatos marinhos Quaternários, sem a pretensão de substituir ou sobrepor a vasta e consolidada bibliografia existente sobre o tema. Parte-se do reconhecimento de que a literatura especializada, embora robusta, apresenta elevado grau de complexidade conceitual e terminológica, o que frequentemente dificulta a integração e operacionalização desses conhecimentos. Assim, ao adotar explicitamente a distinção entre *carbonate factories* (no sentido clássico) e *Carbonate Factory Systems* (CFS), busca-se oferecer uma síntese conceitual clara, integrada e operacional, capaz de facilitar a compreensão e apoiar análises em contextos costeiros, marinhos e em análogos estratigráficos mais antigos.

2. O QUATERNÁRIO COMO INTERVALO ESTRATIGRÁFICO SINGULAR

O Quaternário distingue-se no registro geológico não apenas por sua posição temporal recente, mas sobretudo por representar um regime estratigráfico caracterizado por alta resolução ambiental e elevada sensibilidade dos sistemas deposicionais às forçantes externas. Nesse intervalo, variações relativamente pequenas no clima, no nível do mar e na hidrodinâmica são capazes de produzir respostas sedimentares detectáveis, frequentemente preservadas em escalas temporais que permitem uma correlação direta entre processos e produtos estratigráficos (Sadler, 1981; Schumer et al., 2011; Barefoot et al., 2023).

Uma das principais características do Quaternário é a possibilidade de análise em escalas temporais finas, frequentemente da ordem de décadas a milênios. Essa alta resolução, contudo, não deve ser confundida com continuidade do registro. Estudos clássicos e recentes demonstram que o registro estratigráfico é inerentemente descontínuo, dominado por hiatos, erosão e deposição episódica, de modo que a preservação sedimentar reflete uma seleção temporal controlada por processos físicos e ambientais (Sadler, 1981; Schumer et al., 2011). No Quaternário, essa descontinuidade torna-se particularmente evidente, uma vez que as taxas aparentes de sedimentação variam significativamente em função da escala de observação adotada e da frequência dos eventos responsáveis pela acumulação e remoção de sedimentos.

Nesse contexto, torna-se fundamental distinguir entre o tempo geológico “longo” e o tempo geológico “responsivo”. O tempo geológico longo, tradicionalmente empregado na estratigrafia, privilegia tendências médias observadas ao longo de centenas de milhares a milhões de anos, sendo adequado para a análise de grandes arquiteturas deposicionais e para a identificação de padrões de primeira, segunda e terceira ordem. Já o tempo geológico responsivo refere-se a intervalos mais curtos, nos quais os sistemas sedimentares respondem de forma rápida e frequentemente não linear a variações ambientais relativamente sutis. No Quaternário, esse regime responsivo domina grande parte da dinâmica deposicional, exigindo abordagens que considerem explicitamente a escala temporal dos processos analisados (Romans et al., 2016; Barefoot et al., 2023).

A hidrodinâmica desempenha papel central nesse regime estratigráfico responsivo. Ondas, marés, correntes e fluxos combinados controlam não apenas o transporte sedimentar, mas também a redistribuição, o retrabalhamento e a preservação dos depósitos. Em ambientes costeiros e marinhos rasos, a alternância entre períodos de baixa e alta energia pode gerar arquiteturas estratigráficas complexas, nas quais eventos episódicos exercem influência desproporcional sobre o registro final. Assim, a hidrodinâmica atua como um dos principais filtros entre a produção sedimentar e sua efetiva preservação no registro Quaternário (Romans et al., 2016; Rivers & Dalrymple, 2025).

A compreensão do Quaternário como intervalo estratigráfico singular também requer atenção às relações entre escala de processo e escala de preservação. Processos que operam em escalas temporais curtas, como tempestades, eventos extremos ou reorganizações hidrodinâmicas sazonais, podem dominar a arquitetura sedimentar observada, enquanto períodos mais longos de relativa estabilidade podem deixar registros pouco expressivos ou mesmo ausentes. Essa assimetria implica que o registro Quaternário não representa uma média contínua das condições ambientais, mas sim a superposição seletiva de eventos e fases de maior eficiência deposicional (ver Sadler, 1981; Schumer et al., 2011, para uma visão geral).

Nos sistemas carbonáticos, essas características assumem relevância ainda maior. O conceito clássico de *carbonate factories* (*sensu* Schlager) descreve os sistemas de produção carbonática que operam dentro de janelas ambientais específicas, controladas por fatores como luz, temperatura, nutrientes, salinidade e saturação carbonática, com implicações para a textura, composição e alguns padrões estratigráficos associados (Schlager, 2000, 2005; Reijmer, 2016; 2021; Michel et al., 2019).

Entretanto, em contextos Quaternários, marcados por alta responsividade e forte controle hidrodinâmico, a interpretação estratigráfica demanda explicitar como essa produção se acopla aos mecanismos de redistribuição, retrabalhamento e preservação. Por essa razão, e em alinhamento com a proposição apresentada na Introdução, este trabalho enfatiza os *Carbonate Factory Systems* (CFS) como unidade analítica integrada: sistemas sedimentares nos quais uma ou mais *carbonate factories* (no sentido clássico) funcionam acopladas a controles hidrodinâmicos e estratigráficos, condicionando conjuntamente a geração e a expressão arquitetural do registro carbonático no tempo geológico responsivo do Quaternário.

Dessa forma, o Quaternário deve ser compreendido como um intervalo estratigráfico no qual tempo, processo e preservação estão fortemente acoplados. A análise de sucessões Quaternárias, especialmente em contextos carbonáticos marinhos, exige abordagens integradas que reconheçam explicitamente a influência das

escalas temporais, da hidrodinâmica e da natureza episódica do registro sedimentar. Nesse enquadramento, os *Carbonate Factory Systems* (CFS) oferecem uma ponte operacional entre produção carbonática, dinâmica de transporte/retrabalhamento e preservação estratigráfica, tornando mais robusta a interpretação de arquiteturas Quaternárias.

3. PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS EM CARBONATE FACTORY SYSTEMS (CFS) QUATERNÁRIOS

Nos *Carbonate Factory Systems* (CFS) Quaternários, os processos hidrossedimentológicos desempenham papel central na conexão entre a produção carbonática e sua expressão estratigráfica. Diferentemente de abordagens que tratam a hidrodinâmica apenas como mecanismo de transporte, neste trabalho ela é considerada um controle estruturante do sistema, responsável por modular a redistribuição, o retrabalhamento e a preservação dos sedimentos gerados pelas *carbonate factories* (no sentido clássico). Em regimes de alta responsividade temporal, como o Quaternário, essa mediação hidrodinâmica é determinante para a arquitetura final dos depósitos carbonáticos (Fig. 1).



Figura 1. Representação conceitual dos *Carbonate Factory Systems* (CFS) no Quaternário, destacando o papel central dos processos hidrossedimentológicos na mediação entre produção carbonática e arquitetura estratigráfica. As *carbonate factories* (*sensu* Schlager), responsáveis pela produção biogênica de carbonato em ambientes rasos e eufóticos, operam acopladas a regimes hidrodinâmicos controlados por ondas, marés, correntes costeiras e correntes de fundo. Esses processos regulam o retrabalhamento, a redistribuição e a exportação sedimentar, promovendo desacoplamento espacial e temporal entre produção e preservação. A arquitetura estratigráfica resultante reflete a ação seletiva da hidrodinâmica ao longo do tempo geológico responsivo, sendo fortemente influenciada por eventos episódicos e pela conectividade entre compartimentos rasos e profundos do sistema. Fonte: o Autor.

A ação combinada de ondas, marés e correntes estabelece padrões espaciais e temporais de energia que condicionam tanto a eficiência da produção carbonática quanto a permanência dos sedimentos no sistema. Em ambientes rasos, variações relativamente pequenas na energia hidrodinâmica podem promover alternância entre fases de acumulação, retrabalhamento intenso e exportação sedimentar, resultando em registros descontínuos e

fortemente controlados por eventos episódicos. Assim, a hidrodinâmica atua como um filtro seletivo entre a produção primária de carbonato e sua efetiva incorporação ao registro estratigráfico dos CFS Quaternários (Romans et al., 2016; Rivers & Dalrymple, 2025).

Um aspecto fundamental desses sistemas é o papel dos processos episódicos. Tempestades, eventos extremos, variações sazonais acentuadas e reorganizações hidrodinâmicas de curta duração exercem influência desproporcional sobre o balanço sedimentar, frequentemente dominando a arquitetura observada em escalas estratigráficas mais amplas. Em CFS Quaternários, esses eventos controlam a redistribuição lateral e vertical dos sedimentos, promovendo mistura de fácies, erosão localizada e formação de superfícies-chave que estruturam o empilhamento estratigráfico (Sadler, 1981; Schumer et al., 2011).

A hidrossedimentologia dos CFS também está intimamente associada à conectividade entre diferentes compartimentos do sistema, particularmente entre a plataforma carbonática e áreas adjacentes mais profundas. Processos de exportação sedimentar (e.g. correntes de fundo, fluxos induzidos por tempestades e redistribuição associada a marés), permitem que sedimentos produzidos em ambientes rasos sejam transportados e preservados fora das áreas de maior retrabalhamento. Essa conectividade plataforma–bacia é um elemento-chave para compreender a distribuição espacial dos depósitos carbonáticos Quaternários e a relação entre produção local e preservação distal (Michel et al., 2019; Rivers & Dalrymple, 2025).

No interior dos CFS, a interação entre hidrodinâmica e propriedades sedimentares resulta em padrões complexos de seleção granulométrica e organização de fácies. O retrabalhamento recorrente tende a favorecer a preservação de sedimentos mais resistentes ou retrabalhados, enquanto frações mais finas ou menos estáveis podem ser removidas ou redistribuídas repetidamente antes de sua incorporação ao registro. Esse processo contribui para a formação de arquiteturas estratigráficas nas quais a assinatura hidrodinâmica pode ser mais evidente do que a variabilidade original da produção carbonática, reforçando a necessidade de interpretações integradas nos CFS Quaternários (Reijmer, 2016; 2021).

A análise hidrossedimentológica dos CFS Quaternários também evidencia a importância da escala temporal na interpretação dos depósitos. Em escalas curtas, a variabilidade hidrodinâmica pode gerar padrões aparentemente caóticos; em escalas mais longas, esses mesmos sistemas podem revelar tendências organizadas, controladas pela recorrência de eventos e pela eficiência diferencial dos processos de preservação. Essa dependência da escala reforça a distinção entre tempo geológico longo e tempo geológico responsivo discutida anteriormente, destacando que a arquitetura dos CFS resulta da superposição seletiva de processos operando em diferentes escalas temporais (Romans et al., 2016; Barefoot et al., 2023).

Dessa forma, os processos hidrossedimentológicos constituem o elo fundamental entre *carbonate factories* e a expressão estratigráfica integrada dos CFS. No Quaternário, compreender essa mediação é essencial para interpretar corretamente a arquitetura dos depósitos carbonáticos, avaliar sua variabilidade espacial e temporal e utilizar esses sistemas como análogos robustos para contextos estratigráficos mais antigos.

A partir desse enquadramento sistêmico, torna-se possível detalhar os principais processos hidrossedimentológicos que controlam a sedimentação carbonática Quaternária em diferentes contextos ambientais.

4. PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS EM SISTEMAS CARBONÁTICOS QUATERNÁRIOS

A sedimentação carbonática Quaternária é controlada por um conjunto integrado de processos hidrodinâmicos, biogeoquímicos e estratigráficos que operam em escalas temporais e espaciais altamente resolvidas. Diferentemente de sistemas siliciclásticos, nos quais a produção sedimentar é majoritariamente alóctone e episódica, os sistemas carbonáticos são caracterizados por produção *in situ*, fortemente acoplada à hidrodinâmica, à disponibilidade de luz, à química da água do mar e à arquitetura do relevo pré-existente (Schlager, 1981; 2005; Reijmer, 2016; 2021).

4.1 Produção carbonática, hidrodinâmica e limiares de acumulação

Nos sistemas carbonáticos rasos, a produção biogênica ocorre predominantemente dentro da zona eufótica, sendo controlada por comunidades bentônicas (corais, algas calcárias, foraminíferos, moluscos, briozoários) sensíveis à energia hidrodinâmica, à turbidez e à estabilidade do substrato. A taxa de acumulação efetiva resulta do balanço entre produção, retrabalhamento, exportação lateral e perda por dissolução, e não pode ser interpretada apenas como função do crescimento biológico (Schlager, 1981; 2005).

O clássico “paradoxo do afogamento” de plataformas carbonáticas demonstra que, mesmo diante de altas taxas potenciais de crescimento ($>1.000 \mu\text{m/ano}$), sistemas carbonáticos podem ser afogados quando a taxa de criação de acomodação, por subida relativa do nível do mar, subsidência tectônica ou reorganização hidrodinâmica, supera a capacidade de manutenção da produção bentônica (Schlager, 1981). No Quaternário, esse paradoxo assume relevância particular devido às rápidas oscilações eustáticas, com taxas de variação do nível do mar da ordem de metros por milênio durante transições glacial–interglacial.

4.2 Hidrodinâmica costeira, eventos extremos e redistribuição sedimentar

A hidrodinâmica em sistemas carbonáticos Quaternários é altamente variável e inclui a ação combinada de ondas, correntes de maré, correntes residuais e eventos extremos. Gradientes espaciais de energia de onda controlam diretamente a zonation ecológica, a granulometria dos sedimentos e a morfologia dos recifes e ilhas carbonáticas (Kench et al., 2006). Em atóis e plataformas isoladas, como nas Maldivas, contrastes sistemáticos entre margens a barlavento e sotavento geram padrões assimétricos de produção, transporte e acumulação sedimentar.

Eventos de alta energia, como tempestades e tsunamis, atuam como agentes de reorganização rápida do estoque sedimentar, promovendo erosão localizada, quebra de estruturas recifais e redistribuição maciça de detritos carbonáticos. Estudos sobre o tsunami do Oceano Índico de 2004 demonstram que a resposta dos recifes depende fortemente da geometria dos canais, da profundidade da plataforma e da interação entre ondas incidentes e correntes focadas, resultando tanto em amortecimento quanto em amplificação local da energia (Lahcene et al., 2023).

4.3 Exportação nerítica, correntes de fundo e sedimentação em águas profundas

A compreensão moderna dos sistemas carbonáticos Quaternários reconhece que uma parcela significativa da produção rasa é exportada para águas profundas por meio de processos hidrodinâmicos persistentes. Correntes de fundo e correntes de contorno desempenham papel central na redistribuição de sedimentos carbonáticos ao longo das margens e bacias adjacentes, formando corpos deposicionais como depósitos de deriva (*drifts*), clinoformas e deltas de deriva (*delta drift*) (Lüdmann et al., 2013; 2018; 2022).

O conceito de delta drift carbonático representa um avanço importante ao demonstrar que a sedimentação controlada por correntes pode gerar geometrias organizadas, com empilhamento loboide e padrões clinoformais, mesmo em contextos tradicionalmente interpretados como dominados por controle eustático (Lüdmann et al., 2018). Nessas configurações, a hidrodinâmica de fundo passa a ser o principal agente de organização estratigráfica, marcando uma transição de regimes controlados pelo nível do mar para regimes dominados por correntes.

4.4 Integração com a estratigrafia de sequências e sistemas modernos

Estudos recentes baseados em sistemas modernos demonstram que os modelos clássicos de estratigrafia de sequências em carbonatos, fundamentados quase exclusivamente em ciclos regressivos e sucessões “*shallowing-upward*”, são insuficientes para explicar a diversidade de arquiteturas observadas no Quaternário (Rivers & Dalrymple, 2025). Depósitos transgressivos preservados, abandono lagunar, migração de barreiras e acoplamento com processos hidrodinâmicos costeiros são componentes fundamentais da estratigrafia carbonática recente.

Nesse contexto, os CFS, conforme proposto neste artigo, oferecem uma estrutura conceitual capaz de integrar produção carbonática, hidrodinâmica costeira e profunda, redistribuição sedimentar e organização estratigráfica em um único arcabouço sistêmico. O Quaternário, pela sua alta resolução temporal e pela disponibilidade de análogos modernos bem documentados, constitui o intervalo ideal para observar e formalizar essas interações de maneira empiricamente fundamentada.

5. ESCALAS DE ANÁLISE EM CARBONATE FACTORY SYSTEMS (CFS) QUATERNÁRIOS

A interpretação de sistemas carbonáticos Quaternários exige uma abordagem multiescala explícita, na qual processos, produtos e arquiteturas estratigráficas são analisados de forma coerente com as escalas temporais e espaciais em que operam. Nos CFS, essa necessidade é particularmente crítica, uma vez que a produção carbonática, a hidrodinâmica e a preservação estratigráfica respondem de maneira não linear às forçantes ambientais, sobretudo no regime de tempo geológico responsivo característico do Quaternário.

5.1 Escala de processo: eventos, fluxos e respostas imediatas

Na escala de processo, que abrange intervalos de horas a anos e extensões espaciais locais a subquilométricas, dominam os mecanismos hidrossedimentológicos responsáveis pela redistribuição imediata dos

sedimentos carbonáticos. Ondas de tempestade, correntes de maré, ressacas, fluxos induzidos por eventos extremos e variações sazonais de energia controlam a mobilização, o retrabalhamento e a exportação do material produzido pelas *carbonate factories* (*stricto sensu*).

No Quaternário, essa escala é fundamental para compreender por que eventos de curta duração exercem controle desproporcional sobre o registro sedimentar. Estudos clássicos e modernos demonstram que grande parte do empilhamento estratigráfico resulta da superposição seletiva de eventos preservados, enquanto longos períodos de relativa estabilidade hidrodinâmica pode deixar registros mínimos ou inexistentes (Sadler, 1981; Schumer et al., 2011; Romans et al., 2016). Em CFS Quaternários, a escala de processo define o filtro primário entre produção e preservação.

A relação entre escala temporal, processos hidrossedimentológicos e seletividade da preservação estratigráfica em CFS Quaternários é sintetizada na Figura 2.

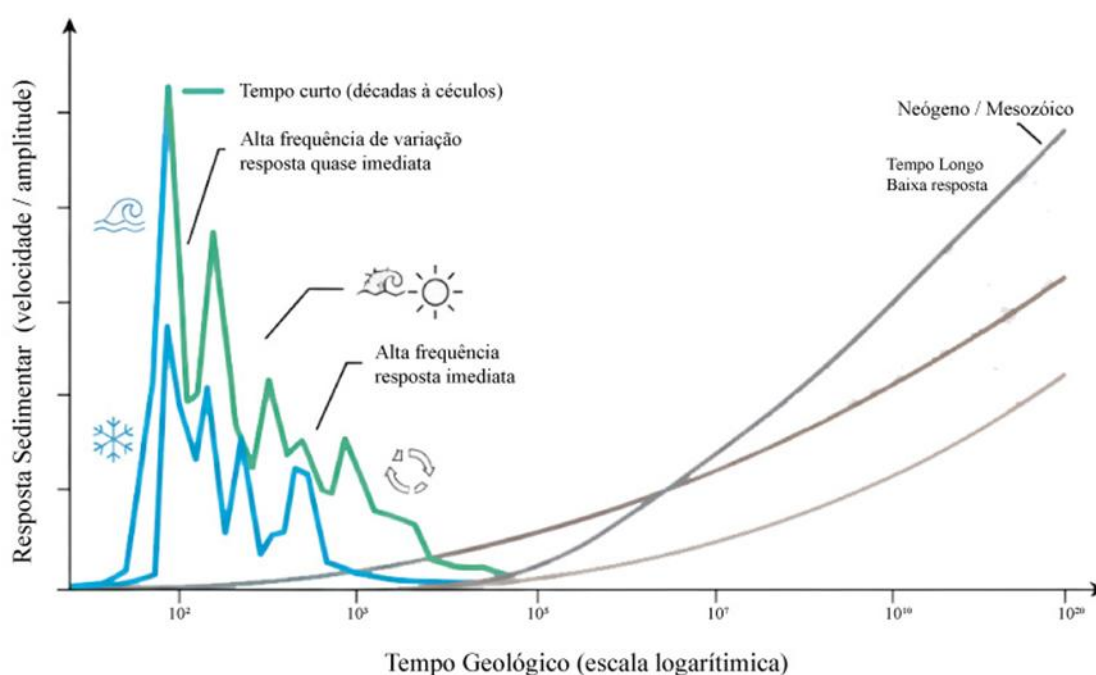


Figura 2. Representação conceitual da relação entre escalas temporais, processos hidrossedimentológicos e preservação estratigráfica em *Carbonate Factory Systems* (CFS) no Quaternário. Na escala de processo, eventos de curta duração (tempestades, pulsos de corrente e reorganizações hidrodinâmicas episódicas) controlam a mobilização, o retrabalhamento e a exportação dos sedimentos carbonáticos. Na escala do sistema, a conectividade entre compartimentos produtores rasos e áreas de acumulação mais profundas regula a redistribuição sedimentar e a eficiência de preservação. Na escala estratigráfica, o empilhamento observado resulta da superposição seletiva desses processos ao longo do tempo geológico responsivo, produzindo registros descontínuos, hiatos e superfícies-chave. A figura enfatiza que, em CFS Quaternários, a produção carbonática pode ser contínua, enquanto a preservação estratigráfica é intrinsecamente episódica e seletiva. Fonte: o Autor.

5.2 Escala do sistema: organização espacial dos CFS

Na escala do sistema, que integra centenas de anos a milênios e extensões quilométricas a regionais, emergem os padrões espaciais e funcionais dos Carbonate Factory Systems. Nessa escala, a análise passa a

considerar a conectividade entre zonas produtoras rasas, áreas de retrabalhamento intenso e compartimentos de acumulação mais estáveis, tanto em ambientes neríticos quanto em contextos mais profundos.

A dissociação espacial entre produção e preservação é uma característica recorrente dos CFS Quaternários. Sedimentos produzidos em recifes, plataformas e rampas rasas podem ser sistematicamente exportados para lagunas, taludes ou bacias adjacentes, onde a energia hidrodinâmica é menor e a preservação estratigráfica é favorecida. Essa organização sistêmica é bem documentada em plataformas isoladas e margens dominadas por correntes, como nas Maldivas, onde a atuação persistente de correntes de fundo condiciona tanto a arquitetura rasa quanto os depósitos profundos associados (Droxler & Jorjy, 2020).

5.3 Escala estratigráfica: empilhamento, arquitetura e tempo

Na escala estratigráfica, que envolve milhares a dezenas de milhares de anos, os CFS Quaternários revelam arquiteturas resultantes da interação cumulativa entre produção carbonática, hidrodinâmica e variações do nível relativo do mar. É nessa escala que se manifestam padrões de empilhamento, superfícies-chave, fases de *keep-up*, *catch-up* e *give-up*, bem como episódios de afogamento ou abandono de sistemas produtores (Schlager, 2000; 2005; Gischler et al., 2008).

No Quaternário, a alta resolução temporal do registro permite observar transições rápidas entre esses modos de crescimento, frequentemente associadas a pulsos eustáticos, reorganizações hidrodinâmicas ou mudanças climáticas abruptas. Contudo, mesmo nessa escala, o registro estratigráfico permanece seletivo e incompleto, refletindo a eficiência diferencial dos processos de preservação ao longo do tempo (Schumer et al., 2011; Barefoot et al., 2023).

5.4 Integração multiescala e implicações interpretativas

A principal implicação da abordagem multiescala aplicada aos CFS Quaternários é o reconhecimento de que nenhuma escala isolada é suficiente para explicar a arquitetura carbonática observada. Interpretações baseadas exclusivamente em processos de curta duração tendem a superestimar a variabilidade ambiental, enquanto análises restritas à escala estratigráfica podem mascarar o papel dominante de eventos episódicos e da hidrodinâmica.

A integração entre escala de processo, escala do sistema e escala estratigráfica permite compreender o Quaternário como um intervalo no qual o registro sedimentar resulta de uma superposição hierárquica de respostas, e não de um simples empilhamento progressivo. Nesse enquadramento, os CFS constituem uma unidade conceitual particularmente adequada para articular processos observáveis no presente, registros Quaternários de alta resolução e extrapolações para análogos estratigráficos mais antigos.

6. IMPLICAÇÕES ESTRATIGRÁFICAS DOS CARBONATE FACTORY SYSTEMS (CFS) QUATERNÁRIOS

O enquadramento dos sistemas carbonáticos Quaternários como CFS possui implicações diretas e profundas para a interpretação estratigráfica, tanto em contextos recentes quanto na extrapolação para o registro

geológico mais antigo. Ao integrar produção carbonática, hidrodinâmica e preservação em um arcabouço sistêmico, o conceito de CFS permite reinterpretar arquiteturas estratigráficas não como respostas lineares a forçantes únicas (eustasia ou produção), mas como produtos emergentes de interações multiescalas e não lineares.

6.1 Superfícies estratigráficas, hiatos e seletividade do registro

Em CFS Quaternários, superfícies estratigráficas (*e.g.* superfícies de inundação, condensação, erosão ou abandono), refletem, em muitos casos, reorganizações hidrodinâmicas e mudanças na eficiência de preservação, mais do que variações graduais na produção carbonática. A alta resolução temporal do Quaternário evidencia que hiatos estratigráficos podem se formar em escalas de tempo relativamente curtas, associadas à remoção seletiva de sedimentos ou à exportação eficiente para compartimentos adjacentes.

Essa constatação reforça que a ausência de registro não deve ser interpretada automaticamente como ausência de produção ou de atividade ecológica. Em CFS, hiatos e superfícies-chave são frequentemente assinaturas de processos, e não simples lacunas temporais, exigindo cautela na correlação estratigráfica e na reconstrução paleoambiental.

6.2 Arquitetura deposicional e desacoplamento produção–acumulação

Uma das implicações centrais do conceito de CFS é o reconhecimento do desacoplamento espacial e temporal entre produção e acumulação. No Quaternário, esse desacoplamento é amplamente documentado em sistemas onde sedimentos produzidos em ambientes rasos são sistematicamente retrabalhados e exportados, contribuindo para a construção de corpos deposicionais distais, enquanto os ambientes produtores permanecem estratigraficamente condensados ou erosivos.

Do ponto de vista estratigráfico, isso implica que arquiteturas observadas em taludes, bacias rasas ou depósitos controlados por correntes podem registrar de forma mais contínua a história do sistema do que os próprios ambientes de produção. Essa lógica é fundamental para a interpretação de clinoformas carbonáticas, *drifts*, deltas de deriva e outros corpos deposicionais associados a margens Quaternárias dominadas por hidrodinâmica persistente.

6.3 CFS como análogos para sistemas carbonáticos antigos

O Quaternário oferece um conjunto excepcional de análogos naturais para a interpretação de sistemas carbonáticos do passado, justamente por permitir a observação direta dos processos que controlam a arquitetura estratigráfica. A aplicação do conceito de CFS a registros antigos possibilita reinterpretar sucessões carbonáticas que tradicionalmente foram analisadas sob modelos excessivamente simplificados, baseados apenas em ciclos eustáticos ou em mudanças na taxa de produção.

Ao reconhecer a importância de correntes de fundo, eventos extremos, exportação nerítica e reorganizações hidrodinâmicas, os CFS Quaternários fornecem um arcabouço robusto para compreender arquiteturas complexas no registro Fanerozóico, incluindo plataformas parcialmente afogadas, depósitos profundos ricos em carbonato e sucessões aparentemente desacopladas do nível do mar.

Nesse contexto, sistemas e/ou sucessões heterozoárias, aqui entendidos como sistemas carbonáticos dominados por produtores não fotossintetizantes, fortemente acoplados à hidrodinâmica e frequentemente caracterizados por desacoplamento entre produção e preservação, podem ser reinterpretados como expressões completas de CFS, e não como sistemas marginais ou incompletos.

6.4 Implicações para correlação, modelos e previsibilidade estratigráfica

A adoção do conceito de CFS implica uma mudança de paradigma na correlação estratigráfica de sistemas carbonáticos. Em vez de buscar correlações rígidas baseadas exclusivamente em superfícies regionais ou em ciclos globais, torna-se necessário incorporar a variabilidade hidrodinâmica e a conectividade sistêmica como elementos interpretativos centrais.

Essa abordagem reduz o risco de correlações espúrias e aumenta a previsibilidade de arquiteturas deposicionais em contextos aplicados, como a análise de reservatórios carbonáticos, a reconstrução paleoambiental de margens continentais e a avaliação de mudanças ambientais rápidas no Quaternário. Nesse sentido, os *Carbonate Factory Systems* não constituem apenas uma ferramenta conceitual, mas um instrumento operacional para a estratigrafia carbonática moderna.

7. CONCLUSÃO E SÍNTESE CONCEITUAL

Este artigo propôs uma sistematização conceitual da estratigrafia e da hidrossedimentologia de carbonatos marinhos do Quaternário, partindo do reconhecimento de que esse intervalo representa um regime singular de tempo geológico responsivo, no qual processos de curta duração exercem controle desproporcional sobre a arquitetura estratigráfica preservada. A partir da integração de evidências empíricas e modelos conceituais consolidados na literatura, buscou-se organizar conceitos, processos e escalas de análise de forma coerente e operacional.

A principal contribuição do trabalho reside na proposição dos CFS como um arcabouço conceitual integrador, que busca ampliar o conceito clássico de *carbonate factories* (*sensu* Schlager, 2000, 2005) ao incorporar explicitamente a hidrodinâmica, a redistribuição sedimentar e a seletividade do registro estratigráfico. Nesse sentido, o artigo se configura principalmente como uma síntese conceitual clara, integrada e operacional, voltada a facilitar a compreensão e apoiar análises em contextos costeiros, marinhos e em análogos estratigráficos mais antigos. Ao invés de tratar a produção carbonática como um componente isolado, os CFS enfatizam a natureza sistêmica dos ambientes carbonáticos, nos quais produção, transporte e preservação são interdependentes e controlados por interações não lineares.

A análise multiescala demonstrou que interpretações estratigráficas robustas em sistemas carbonáticos Quaternários dependem da articulação entre escalas de processo, de sistema e estratigráfica. Eventos hidrodinâmicos episódicos, correntes persistentes e reorganizações rápidas do nível relativo do mar moldam a conectividade entre zonas produtoras e compartimentos de acumulação, gerando arquiteturas complexas e

frequentemente desacopladas da produção local. Nesse contexto, superfícies estratigráficas e hiatos não devem ser interpretados apenas como marcadores temporais, mas como expressões diretas da dinâmica do sistema.

O Quaternário se destaca, assim, como um intervalo privilegiado para o desenvolvimento e a validação de modelos integrados de sedimentação carbonática. A alta resolução temporal do registro e a disponibilidade de análogos modernos permitem observar diretamente os processos que governam a formação de arquiteturas estratigráficas, fornecendo bases sólidas para extrapolações fundamentadas ao registro geológico mais antigo. A aplicação do conceito de CFS a sistemas pré-Quaternários oferece, portanto, uma via promissora para reinterpretar sucessões carbonáticas complexas, reduzir ambiguidades correlativas e aprimorar a previsibilidade estratigráfica.

Em síntese, ao organizar conceitos e escalas de análise sob a perspectiva dos *Carbonate Factory Systems*, este trabalho contribui para uma leitura mais integrada e realista da estratigrafia carbonática, alinhada aos avanços recentes da hidrossedimentologia e da estratigrafia de sequências. Espera-se que essa abordagem funcione como um texto-guia para estudos Quaternários e como uma ponte conceitual entre observações modernas e interpretações do registro estratigráfico profundo.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Universidade Federal da Bahia (UFBA) pelo apoio institucional, na condição de Docente Permanente, especialmente no âmbito do Curso de Oceanografia e do Programa de Pós-Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente (POSPETRO). Agradece à CAPES-Brasil pelo suporte à pesquisa. Reconhece, igualmente, o apoio institucional do Projeto nº 2.8921 (8921) – UFRGS-IPH/Consórcio Libra (COQUINAS II), cujo financiamento tem contribuído para o desenvolvimento das investigações do autor em sistemas carbonáticos marinhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barefoot, E.A.; Nittrouer, J.A.; Straub, K.M., 2023.** Sedimentary processes and the temporal resolution of sedimentary strata. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL103925.
- Catuneanu, O.; Galloway, W.E.; Kendall, C.G.St.C.; Miall, A.D.; Posamentier, H.W.; Strasser, A.; Tucker, M.E., 2011.** Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy* 44, 173–245.
- Droxler, A.W.; Jorjy, S.J., 2020.** The origin of modern atolls: challenging Darwin's deeply ingrained theory. *Annual Review of Marine Science* 12, 177–209.
- Gischler, E.; Hudson, J.H.; Pisera, A., 2008.** Late Quaternary reef growth and sea-level history in the Maldives (Indian Ocean). *Marine Geology* 250 (1-2): 104-113.
- Kench, P.S.; Brander, R.W.; Parnell, K.E.; McLean, R.F., 2006.** Wave energy gradients across a Maldivian atoll: implications for island geomorphology. *Geomorphology*, 81 (1-2): 1–17.
- Lahcene, E.; Suppasri, A.; Pakoksung, K.; Imamura, F., 2023.** Coral reef response in the Maldives during the 2004 Indian Ocean tsunami. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 96 (1): 103952.
- Lüdmann, T.; Kalvelage, C.; Betzler, C.; Fürstenau, J.; Hübscher, C., 2013.** The Maldives, a giant isolated carbonate platform dominated by bottom currents. *Marine and Petroleum Geology*, 43: 326-340.

- Lüdmann, T.; Betzler, C.; Eberli, G.P.; Reolid, J.; Reijmer, J.J.G.; Sloss, C.R.; Bialik, O.M.; Alvarez-Zarikian, C.A.; Alonso-García, M.; Blättler, C.L.; Guo, J.A.; Haffen, S.; Horozal, S.; Inoue, M.; Jovane, L.; Kroon, D.; Lanci, L.; Laya, J.C.; Mee, A.L.H.; Nakakuni, M.; Nath, B.N.; Niino, K.; Petruny, L.M.; Pratiwi, S.D.; Slagle, A.L.; Su, X.; Swart, P.K.; Wright, J.D.; Yao, Z.; Young, J.R., 2018.** Carbonate delta drift: A new sediment drift type. *Marine Geology*, 401 (1): 98-111.
- Lüdmann, T.; Betzler, C.; Lindhorst, S., 2022.** The Maldives, a key location of carbonate drifts. *Marine Geology*, 450: 106838.
- Michel, J.; Laugié, M.; Pohl, A.; Lanteaume, C.; Masse, J.-P.; Donnadieu, Y.; Borgomano, J., 2019.** Marine carbonate factories: a global model of carbonate platform distribution. *International Journal of Earth Sciences*, 108: 1773-1792.
- Reijmer, J.J.G., 2016.** Carbonate Factories. *Encyclopedia of Marine Geosciences*. (Eds J. Harff, M. Meschede, S. Petersen and J. Thiede), pp. 80-84. Springer Netherlands.
- Reijmer, J.J.G., 2021.** Marine carbonate factories: Review and update. *Sedimentology*, 68 (5): 1729–1796.
- Rivers, J.M.; Dalrymple, R.W., 2025.** The reconstruction of coastal carbonate sequence stratigraphy: A modern-systems approach. *Geology*, 53 (3): 232–237.
- Romans, B.W.; Castelltort, S.; Covault, J.A.; Fildani, A.; Walsh, J.P., 2016.** Environmental signal propagation in sedimentary systems across timescales. *Earth-Science Reviews* 153, 7–29.
- Sadler, P.M., 1981.** Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections. *The Journal of Geology* 89 (5): 569–584.
- Schumer, R.; Jerolmack, D.; Mcelroy, B., 2011.** The stratigraphic filter and bias in measurement of geologic rates, *Geophysical Research Letters*, 38, L11405.
- Schlager, W., 2000.** Sedimentation rates and growth potential of tropical, cool-water and mud-mound carbonate systems. *In: Carbonate Platform Systems: components and interactions* (Eds E. Insalaco, P.W. Skelton and Y.J. Palmer), Special Publication 178, pp. 217-227. Geological Society, London.
- Schlager, W., 2005.** Carbonate Sedimentology and Sequence Stratigraphy. *SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology* No. 8, Tulsa, 200 pp.