

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR DA FOZ DO ITAJAÍ  
ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

**ENDRIW RAFAEL MATEUS SILVA**

**ESTUDO DE CASO UTILIZANDO DIFERENTES ABORDAGENS DE  
MODELAGEM DE PROCESSOS (*Stratigraphic Forward Modeling-SFM*)**

**BALNEÁRIO CAMBORIÚ  
2025**

**ESTUDO DE CASO UTILIZANDO DIFERENTES ABORDAGENS DE  
MODELAGEM DE PROCESSOS (*Stratigraphic Forward Modeling-SFM*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Petróleo da Universidade do Estado de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Petróleo.

Orientador: Dr. Daniel Fabian Bettú.

Coorientadora: Dra. Lindaura Maria Steffens.

**BALNEÁRIO CAMBORIÚ**

**2025**

**ENDRIW RAFAEL MATEUS SILVA**

**ESTUDO DE CASO UTILIZANDO DIFERENTES ABORDAGENS DE  
MODELAGEM DE PROCESSOS (*Stratigraphic Forward Modeling-SFM*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Petróleo da Universidade do Estado de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Petróleo.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Dr. Daniel Fabian Bettú

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

Membros:

---

Dr. João Paulo Borges Gomes

Petrobras

---

Dr. Diego Alex Mayer

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

Balneário Camboriú, 03 de junho de 2025.

## AGRADECIMENTOS

Com imenso prazer, registro aqui o meu sincero agradecimento a todos os envolvidos, que de alguma forma, seja ela direta ou indireta, fizeram parte da construção e da finalização desse trabalho.

Agradeço aos meus orientadores, por todo o conhecimento que compartilharam e toda a entrega que tiveram com o desenvolvimento do trabalho. Todas as conversas, reuniões, bate-papos e encontro nos corredores são parte da jornada.

Gostaria também de agradecer à SLB e à Beicip-FranLab, por disponibilizarem as licenças dos softwares utilizados nesse trabalho, *GPM®* e *DionisosFlow®*, e à *Westchase Software Corporation* pelo apoio e suporte recebido referente ao SedSimple.

Ao Projeto *Forward 1* (Calibração de Modelos *Forward* de Reservatório com Dados de Poços) apoiado pela Petrobras, onde tive a oportunidade de ser bolsista de iniciação científica e iniciar uma nova fase acadêmica e profissional, e onde surgiu a ideia do trabalho desenvolvido.

Agradeço de coração aos meus amigos, que conheci na faculdade, mas ficarão na minha memória para sempre, Ana Júlia e Francisco Araújo. Todos os momentos juntos, de alegria, raiva, tristeza e estresse, no final valeram a pena. E que a jornada continue, juntos, mesmo que em direções opostas.

Aos meus pais, expresso com todo carinho o meu muito obrigado, por todo o esforço que fizeram para que eu pudesse chegar até aqui, e por acreditarem na minha capacidade. Todo o esforço será recompensado.

Por fim e mais importante, quero expressar minha eterna gratidão a uma pessoa muito especial, a minha parceira de crime, de fofocas, cafezinhos, e de sinuca, a minha companhia diária, Amanda Dagostin. Você fez com que a jornada até o final fosse mais leve, divertida, alegre e emocionante. Todos os momentos juntos, todas as conversas e todo o apoio que você me deu, mudou a minha vida nos últimos anos. Meus sinceros agradecimentos por tudo, muito obrigado.

## RESUMO

Este trabalho de tem como objetivo avaliar e comparar diferentes abordagens de modelagem de processos geológicos através da Modelagem Estratigráfica *Forward* (*Stratigraphic Forward Modeling* – SFM). Foram analisadas três ferramentas computacionais: o *DionisosFlow®*, amplamente empregado na indústria para simulações de alta resolução baseadas em modelos difusivos tridimensionais; o *GPM®* (*Geological Process Modeling*), desenvolvido pela SLB com base em equações hidrodinâmicas simplificadas e voltado à modelagem regional e integração com plataformas como o Petrel; e o *SedSimple*, software de código aberto com foco didático e acadêmico, que utiliza uma abordagem baseada na capacidade de transporte sedimentar. A comparação foi realizada por meio da simulação do intervalo basal da Formação *Green River* e da bacia *Washakie Basin*, localizada na *Greater Green River Basin*, nos Estados Unidos. O estudo considerou a parametrização de processos como acomodação, aporte sedimentar, produção carbonática, transporte, erosão e compactação. Os resultados revelam diferenças entre os simuladores quanto à forma de modelagem e implementação dos processos geológicos, evidenciando limitações, potencialidades e implicações para a construção de modelos estratigráficos tridimensionais coerentes com dados reais. O trabalho contribui para a compreensão crítica dessas ferramentas e para o aprimoramento da sua aplicação na indústria e na academia, visando maior acurácia na reconstrução da história deposicional de bacias sedimentares.

**Palavras-chave:** Modelagem Estratigráfica *Forward*, *Green River Basin*, *DionisosFlow®*, *GPM®*, *SedSimple*.

## ABSTRACT

This work aims to evaluate and compare different approaches to geological process modeling through Stratigraphic Forward Modeling (SFM). Three computational tools were analyzed: *DionisosFlow®*, widely used in the industry for high-resolution simulations based on three-dimensional diffusive models; *GPM®* (Geological Process Modeling), developed by SLB and based on simplified hydrodynamic equations, designed for regional-scale modeling and integration with platforms such as Petrel; and *SedSimple*, an open-source software with an academic and didactic focus, which employs a simplified approach based on sediment transport capacity. The comparison was conducted through the simulation of the basal interval of the Green River Formation and Washakie Basin, located in the Greater Green River Basin, United States. The study considered the parametrization of key processes such as accommodation, sediment supply, carbonate production, transport, erosion, and compaction. The results reveal differences among the simulators regarding how geological processes are implemented, highlighting their limitations, capabilities, and implications for constructing stratigraphic 3D models consistent with real-world data. This study contributes to a critical understanding of these tools and supports their optimized application in both industry and academia, aiming for greater accuracy in reconstructing the depositional history of sedimentary basins.

**Keywords:** Stratigraphic Forward Modeling, Green River Formation, *DionisosFlow®*, *GPM®*, *SedSimple*.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Relação entre os processos que definem a arquitetura estratigráfica em uma bacia. No eixo y, o aporte sedimentar, e no eixo x, o potencial de acomodação. ....	25
Figura 2 - Curvas de crescimento de carbonato em função das duas principais propriedades que a limitam. A curva de cima representa o multiplicador do crescimento em função da energia de ondas, quanto a curva de baixo representa o multiplicador em função da profundidade do ambiente.	
Figura 3 - Mapa regional apresentando a localização e as características da Formação Greater Green River (FGGR), posicionado na divisa de três estados no oeste dos Estados Unidos. Números de 1 a 4 representam a posição de pseudo-poços utilizados na parametrização do modelo, conectado pela linha preta contínua marcando uma seção transversal.....	34
Figura 4 - Mapas sinópticos mostrando a configuração paleohidrológica dos lagos da Formação Green River em dois time-steps que contém o intervalo de tempo modelado. ....	36
Figura 5 - Seção transversal interligando os 4 pseudo-poços utilizados na parametrização do modelo, posicionados na bacia de acordo com a Figura 3. ....	38
Figura 6 - Mapas iniciais do modelo utilizado. Os mapas foram reproduzidos igualmente nos três softwares, com modificações em unidades requeridas por cada software. A figura (a) representa o mapa de batimetria inicial do modelo, (b) o domínio estrutural com sua discretização, e (c) o mapa de subsidência, todos extraídos do DionisosFlow®.	
Figura 7 - Curva de nível do lago parametrizada para o modelo. A curva possui uma tendência de crescimento ao decorrer da simulação para buscar reproduzir, juntamente com outros processos, o preenchimento da bacia.....	42
Figura 8 - Mapa de batimetria inicial mostrando o posicionamento das 3 fontes inseridas na parametrização, duas à oeste e um no lado leste. ....	44
Figura 9 - Mapas médios de proporção de siliciclásticos para cada simulador. Escala de cores em proporção do sedimento.	
Figura 10 - Mapas médios de proporção de carbonatos para cada simulador. Escala de cores em proporção do sedimento.	
Figura 11 - Mapas médios de espessura total para cada simulador. A escala de cor representa a espessura em metros. ....	56

Figura 12 - Mapa de batimetria apresentando as seções transversais escolhidas para realização das análises. Seção AB com um corte vertical no modelo no sentido norte-sul, e seção CD com um corte horizontal no sentido oeste-leste. ....	58
Figura 13 - Seção transversal CD, com vista para o norte da bacia. Proporção de carbonato no modelo para os três diferentes softwares. Apenas Dionisos Flow® e GPM® possuem a mesma escala vertical, e todos divergem na escala horizontal. As cores representam a proporção de sedimentos no modelo.	
Figura 14 - Seção transversal CD com vista para o norte da bacia. Aporte de siliciclástos no modelo para os três diferentes softwares. Apenas DionisosFlow® e GPM® possuem a mesma escala vertical, e todos divergem na escala horizontal. As cores representam a proporção de sedimentos no modelo. ....	61
Figura 15 - Seção transversal AB com vista para o oeste da bacia. Aporte de siliciclástos no modelo para os três diferentes softwares. Apenas DionisosFlow® e GPM® possuem a mesma escala vertical, e todos divergem na escala horizontal. As cores representam a proporção de sedimentos no modelo. ....	64
Figura 16 - Seção transversal AB com vista para o oeste da bacia. Produção de carbonato no modelo para os três diferentes softwares. Apenas DionisosFlow® e GPM® possuem a mesma escala vertical, e todos divergem na escala horizontal. As cores representam a proporção de sedimentos no modelo. ....	65

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Propriedades dos sedimentos que podem ser inseridos nos softwares para modelagem. ....	39
Tabela 2 – Parametrização do aporte sedimentar estimado para o modelo. ....	42
Tabela 3 - Curva de restrição de crescimento de carbonato em função da profundidade do ambiente. Os valores tabelados para cada sedimento representam um multiplicador do crescimento máximo na dada profundidade. ....	43
Tabela 4 -Parametrização do aporte sedimentar para cada fonte inserida no modelo. ....	45
Tabela 5 – Parametrização da concentração de sedimentos no aporte sedimentar utilizada no GPM de acordo com os cálculos de volume e espessura da bacia. ....	46
Tabela 6 - Novos valores de velocidade e concentração de sedimentos estimados para serem usados nos softwares GPM e SedSimple. Valores escolhidos a partir de uma série de testes realizados buscando o melhor ajuste de dados. ....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GGRB	<i>Greater Green River Basin</i>
IFPEN	<i>Institut Français du Pétrole et des Energies Nouvelles</i>
SMF	<i>Stratigraphic Forward Modelling</i>
$CO_2$	Dióxido de carbono
$m^2/s$	Metro ao quadrado por segundo
m	Metro
Ma	Milhões de anos
FGGR	Formação <i>Greater Green River</i>
mm	Milímetros
$g/cm^3$	Gramas por centímetros cúbicos
$m^3/m^3$	Metro cúbico por metro cúbico
mD	MiliDarcy
cm/s	Centímetros por segundo
mm/a	Milímetros por ano
m/Ma	Metros por milhões de ano
$km^3/Ma$	Quilômetro cúbico por milhões de ano
$m^3/s$	Metro cúbico por segundo
g/L	Grama por litro
$m^2/s$	Metro por segundo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS .....	14
1.1.1	OBJETIVO PRINCIPAL.....	15
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
1.2	ESTRUTURA DO TEXTO .....	15
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>20</b>
3.1	DIONISOSFLOW® .....	21
3.2	GPM®.....	22
3.3	SEDSIMPLE.....	23
3.4	PROCESSOS MODELADOS .....	24
3.4.1	ACOMODAÇÃO E APORTE SEDIMENTAR .....	25
3.4.2	PRODUÇÃO IN-SITU.....	26
3.4.3	TRANSPORTE E EROSÃO .....	27
3.4.4	COMPACTAÇÃO .....	32
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
4.1	CONTEXTO GEOLÓGICO.....	33
4.2	INTERVALO MODELADO.....	36
4.3	PARAMETRIZAÇÃO.....	37
4.3.1	SEDIMENTOS .....	38
4.3.2	DOMÍNIO ESPACIAL E SUBSTRATO.....	39
4.3.3	APORTE SEDIMENTAR E NÍVEL DO LAGO .....	41
4.3.4	SUBSIDÊNCIA.....	46
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>47</b>
5.1	RESULTADOS INCONSISTENTES .....	48
5.2	PROPORÇÃO DE SEDIMENTOS.....	49
5.2.1	TRANSPORTE DE SILICICLÁSTOS .....	50
5.2.2	PRODUÇÃO DE CARBONATOS .....	53
5.3	ESPESSURA TOTAL .....	55

5.4	SEÇÕES TRANSVERSAIS.....	57
5.4.1	SEÇÃO OESTE-LESTE .....	58
5.4.2	SEÇÕES NORTE-SUL .....	62
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....</b>	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Modelagem Estratigráfica *Forward* (*Stratigraphic Forward Modelling* – SFM) caracteriza-se como uma ferramenta de grande relevância para os estudos relacionados à história deposicional de bacias sedimentares, visto que permite simular as camadas estratigráficas e reconstruir os processos geológicos e as condições ambientais que possibilitaram sua formação. Os simuladores têm como objetivo reproduzir as sequências deposicionais em bacias sedimentares, buscando reproduzir as arquiteturas deposicionais e composições esperadas das rochas sendo, portanto, um suporte fundamental às atividades de exploração e avaliação de recursos naturais, como na indústria de óleo e gás, mas também relevantes para projetos de armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> e em projetos de aproveitamento da energia geotérmica nestes ambientes.

Nas últimas décadas, o avanço tecnológico tem sido um grande aliado da indústria, e a aplicação de modelos numéricos tornou-se recorrente na simulação e análise da deposição de unidades estratigráficas. Essas ferramentas possibilitam a integração de dados geológicos, geofísicos e sedimentológicos em ambientes computacionais. No entanto, a eficiência e a confiabilidade dessas simulações dependem diretamente da forma como os processos geológicos são parametrizados e da capacidade de reprodução dos processos nos softwares utilizados.

Este trabalho tem como objetivo principal investigar a parametrização de processos geológicos em três ferramentas de modelagem com diferentes perfis de desenvolvimento e aplicação, disponíveis para aplicação no setor de óleo e gás: *Diffusive Orientated Normal and Inverse Simulation of Sedimentation* (*DionisiosFlow®*) da *Beicip-Franlab*, amplamente utilizado na indústria; o *Geological Process Modeling* (*GPM®*) desenvolvido pela SLB com o propósito de uso corporativo interno e, mais recentemente, com uso acadêmico restrito em expansão; e o *SedSimple* (*Westchase Software*), uma ferramenta de código aberto disponibilizada atualmente ao ambiente de pesquisa acadêmica. A escolha desses softwares deve-se à sua relevância prática em ambientes corporativos e acadêmicos, uma vez que desempenham papel importante em projetos de exploração e avaliação de bacias sedimentares. A partir do entendimento detalhado de seus mecanismos de funcionamento, espera-se futuramente contribuir para a otimização de sua aplicação, promovendo maior eficiência e acurácia nos estudos estratigráficos.

A temática desenvolvida surgiu a partir de uma dificuldade apresentada por profissionais da indústria, em que a compreensão limitada do comportamento interno dos modelos numéricos dificulta a parametrização e compromete a interpretação dos resultados obtidos pelos simuladores.

Para validar e exemplificar os resultados obtidos nas simulações, será utilizado como estudo de caso o intervalo basal da Formação *Green River*, na bacia homônima, localizada no oeste dos Estados Unidos. Sua história deposicional foi amplamente estudada e documentada por Bohacs *et al.* (2000) e Smith *et al.* (2008). Essa bacia lacustre representa um excelente exemplo para análises estratigráficas por apresentar registros sedimentares complexos e bem preservados, que facilitam a calibração e validação dos modelos.

Além de gerar modelos tridimensionais da bacia, este trabalho busca analisar e interpretar os resultados produzidos por cada um dos softwares utilizados, com o intuito de compreender seus diferentes mecanismos internos de cálculo, limitações e potencialidades. O entendimento dos parâmetros e dos resultados representa um avanço significativo na aplicação crítica dessas ferramentas de modelagem.

Por fim, espera-se que o desenvolvimento deste estudo amplie a compreensão sobre os desafios da modelagem estratigráfica, especialmente no que se refere à construção de modelos 3D coerentes com os dados geológicos disponíveis — um desafio recorrente apontado por estudiosos da área. Assim, este trabalho visa contribuir para a construção de modelos mais robustos, comprehensíveis e aplicáveis à realidade da indústria de óleo e gás.

## 1.1 OBJETIVOS

No contexto da modelagem estratigráfica *Forward*, a definição de objetivos geológicos claros e precisos para a modelagem é crucial para assegurar a organização das análises, orientando a comparação correta entre diferentes ferramentas e proporcionar que os resultados obtidos estejam alinhados com as hipóteses propostas. Assim, os objetivos deste trabalho servem como diretriz para conduzir as etapas de interpretação de dados e parametrização, simulação e interpretação dos modelos geológicos simulados, bem como para realizar uma avaliação comparativa do desempenho dos simuladores na representação do intervalo geológico de interesse.

### 1.1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo primordial deste trabalho é avaliar as técnicas de parametrização utilizadas durante a modelagem de processos (SFM) em três diferentes ferramentas de simulação estratigráfica e apresentar o comportamento, diferenças, vantagens e limitações dos softwares, utilizando um mesmo estudo de caso sob condições de parametrização semelhantes.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o levantamento de aspectos geológicos relevantes da Bacia de *Green River*, visando à parametrização das simulações e à reprodução da história evolutiva do intervalo basal da Formação *Green River*;
- Estudar o comportamento e os processos internos de modelagem de três diferentes softwares que realizam a simulação estratigráfica, *DionisosFlow®*, *GPM®* e *SedSimple*;
- Executar a parametrização dos processos geológicos do estudo de caso nos diferentes softwares, aplicando-a às respectivas simulações;
- Avaliar os resultados das simulações quanto à reprodução de aspectos sedimentológicos e estratigráficos esperados de interesse; identificar, avaliar e interpretar as principais diferenças entre os modelos criados e simulados nos diferentes softwares, as limitações de cada um, assim como vantagens e consequências das diferenças na parametrização.

## 1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

Encerrando o Capítulo 1, no qual foram apresentadas a introdução, a contextualização do tema, as motivações e os objetivos do presente trabalho, inicia-se o Capítulo 2, que abordará o estado da arte e a fundamentação teórica, com o objetivo de proporcionar uma compreensão mais aprofundada do estudo como um todo. Serão reunidas informações sobre a SFM e sua evolução ao longo do tempo, além do detalhamento da base computacional dos softwares utilizados.

Em seguida, o Capítulo 3 tratará da metodologia adotada, contemplando a apresentação do estudo de caso e as diferentes estratégias de parametrização aplicadas em cada software de

modelagem. Dando continuidade, o Capítulo 4 apresentará os principais resultados obtidos a partir das simulações do estudo de caso da Bacia *Green River* nos diferentes ambientes computacionais, estabelecendo um comparativo com os dados extraídos da literatura, a fim de validar, interpretar e discutir os resultados.

Por fim, o Capítulo 5 reunirá as principais conclusões a respeito dos resultados obtidos, da metodologia empregada e do desenvolvimento do trabalho como um todo, além de apresentar recomendações e sugestões para futuras pesquisas relacionadas à área de estudo.

## 2 ESTADO DA ARTE

A SFM é uma abordagem numérica prospectiva que simula a erosão, transporte e deposição de sedimentos ao longo do tempo geológico. Essa metodologia modela processos deposicionais a partir de parâmetros físicos e ambientais quantificáveis, permitindo gerar geometrias estratigráficas coerentes com dados geológicos observados diretamente ou obtidos por métodos indiretos. Como destacado por Huang *et al.* (2015), a SFM oferece uma representação mais realista dos processos deposicionais ao integrar múltiplos fatores que influenciam a evolução das bacias sedimentares.

Historicamente, os modelos estratigráficos surgiram como ferramentas conceituais para sistematizar o entendimento dos principais parâmetros que condicionam a deposição sedimentar. A modelagem *Forward* tem sua base teórica e conceitual ancorada no trabalho seminal de Sloss (1962), que propôs um modelo baseado em quatro variáveis principais: suprimento sedimentar, taxa de subsidência, dispersão dos sedimentos e propriedades compostionais e texturais. Posteriormente, Schwarzacher (1966) formalizou essa concepção por meio de um modelo numérico unidimensional, considerando profundidade da água e taxa de deposição. Esses primeiros esforços, combinados, criaram a base para o desenvolvimento de modelos numéricos mais sofisticados.

Com o avanço da capacidade computacional, surgiram softwares capazes de realizar simulações bidimensionais e tridimensionais dos processos estratigráficos. Exemplos como DEPOSIM, SEDPAK, SEDFLUX, CARBONATE e SEALEX foram desenvolvidos para explorar diferentes ambientes deposicionais e modelar a geometria das camadas sedimentares pela interação de variáveis físicas e ambientais (HUANG *et al.*, 2015). Essas ferramentas oferecem aos usuários meios robustos para compreender sistemas deposicionais dinâmicos e testar hipóteses geológicas, especialmente no contexto da interpretação sísmica e correlação estratigráfica.

À medida que o uso da modelagem *forward* se expandiu na indústria e na academia, novas abordagens passaram a incorporar a complexidade dos sistemas estratigráficos e a incerteza inerente à sua parametrização. Sloss (1962) já alertava para as dificuldades em atribuir valores numéricos às variáveis estratigráficas, dadas as limitações dos dados e a complexidade natural dos sistemas geológicos. Essa problemática persiste, sobretudo para sistemas antigos cujas condições deposicionais não podem ser observadas diretamente.

Nesse sentido, Burgess *et al.* (2006) destacam a importância de incorporar a incerteza na parametrização dos modelos estratigráficos. Eles ressaltam que cenários baseados exclusivamente em parâmetros como a acomodação podem subestimar a complexidade dos controles sobre a geração dos estratos. Além disso, alertam para os riscos de tratar parâmetros incertos — como as curvas globais de nível do mar — como valores absolutos, o que pode comprometer a confiabilidade das interpretações.

A proposta de Burgess *et al.* (2006) consiste na aplicação de abordagens multivariadas e na construção de múltiplos cenários de simulação, visando capturar a variabilidade natural dos sistemas e o intervalo de incerteza dos parâmetros. A utilização da SFM em cenários diversos, combinada com análise de sensibilidade dos efeitos de parametrização, possibilita avaliar o impacto relativo de diferentes parâmetros, tais como suprimento de sedimentos, nível do mar, fisiografia da plataforma e mecanismos de transporte.

A incorporação da modelagem *forward* ao arcabouço da estratigrafia de sequências representa um avanço metodológico significativo, especialmente frente às limitações dos modelos conceituais tradicionais, que geralmente consideram variáveis isoladas e negligenciam as interações complexas entre múltiplos fatores. A modelagem tridimensional de última geração não só representa com maior precisão a arquitetura estratigráfica, como também permite considerar incertezas e explorar cenários alternativos, conforme destacado por Burgess *et al.* (2006). Além disso, simuladores SFM ajudam na redução das incertezas decorrentes do viés de amostragem em modelagem de bacias sedimentares, normalmente conduzida com base em dados de poços perfurados em áreas com maior probabilidade de encontrar reservatórios de hidrocarbonetos, ou seja, em geral, nas zonas de maior energia do ambiente deposicional.

O desempenho dos modelos *forward* está intimamente ligado à forma como os processos geológicos são modelados e traduzidos em parâmetros de entrada nos softwares de simulação. Elementos quantitativos como taxas de sedimentação, mecanismos de transporte, subsidência, oscilações eustáticas e propriedades dos sedimentos, precisam ser definidos com rigor. Huang *et al.* (2015) ressaltam que uma compreensão aprofundada do ambiente deposicional e sua evolução temporal é crucial para obter estimativas mais acuradas e precisas da geometria estratigráfica e da distribuição das fácies.

Este trabalho se insere nesse contexto de avanços e desafios da modelagem estratigráfica *forward*, investigando, de forma comparativa, como as três ferramentas de simulação — *DionisiosFlow®*, *GPM®* e *SedSimple* — implementam e operacionalizam essa modelagem e

parametrização, com o objetivo de avaliar suas potencialidades, limitações e aplicabilidades na reconstrução da história deposicional de bacias sedimentares.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será apresentada a fundamentação teórica essencial para embasar a metodologia, os desenvolvimentos, análises e conclusões que serão discutidos posteriormente. Inicialmente, são abordados conceitos sobre a Modelagem Estratigráfica *Forward* (*Stratigraphic Forward Modelling* – SFM), depois serão apresentados os três softwares selecionados para este trabalho e como os principais processos geológicos são abordados e modelados por estes.

SFM é uma abordagem matemática e numérica amplamente utilizada na pesquisa e na indústria para simular a evolução temporal de sistemas deposicionais. Essa metodologia baseia-se em modelos e simulações que incorporam parâmetros físicos e processos sedimentares bem estabelecidos, permitindo então a representação realista de padrões estratigráficos sob diferentes condições geológicas. Um dos principais desafios da área é a criação de modelos tridimensionais confiáveis que descrevam com precisão e acurácia a expectativa da geometria da bacia e da arquitetura estratigráfica dos reservatórios, especialmente em contextos em que há alta complexidade tectono-sedimentar ou lacunas significativas de dados.

Os modelos estratigráficos que seguem a abordagem *Forward* operam com base em leis físicas e empíricas que descrevem os processos de geração, transporte e deposição de sedimentos ao longo do tempo geológico. Para viabilizar as simulações, diversos parâmetros são considerados, tais como taxas de sedimentação, subsidência tectônica, variações eustáticas do nível do mar, energia do meio (ondas, correntes e marés), taxas de produtividade (para rochas carbonáticas e evaporíticas), granulometria e características do relevo original, como batimetria ou topografia. A integração desses elementos permite não apenas prever a geometria e a distribuição espacial dos depósitos sedimentares, mas também contribuir para a compreensão dos processos sedimentológicos e diagenéticos que moldaram as rochas geradoras, os reservatórios e os selos de um sistema petrolífero.

Desde o final do século XX, diversos modelos numéricos têm sido desenvolvidos com a finalidade de representar a estratigrafia de bacias sedimentares e a sua evolução temporal a partir de parâmetros físicos e geológicos mensuráveis. Os primeiros softwares de modelagem *Forward* surgiram com uma abordagem simplificada, geralmente unidimensional, com capacidades limitadas para simular processos sedimentares complexos (TETZLAFF, 2023). Com os avanços computacionais e a crescente sofisticação conceitual da estratigrafia genética, surgiram modelos mais robustos e multidimensionais, capazes de incorporar transporte

sedimentar, variação granulométrica, tectônica ativa e flutuações eustáticas do nível do mar (GRANJEON & JOSEPH, 1999; BURGESS *et al.* 2006).

Atualmente, destaca-se um conjunto de ferramentas com diferentes níveis de complexidade e aplicações específicas, dentre as quais o *DionisiosFlow®*, um dos simuladores mais completos e detalhados para simulações de alta resolução espacial e temporal; o *GPM®*, amplamente utilizado na indústria para modelagem em escala regional; e o *SedSimple*, voltado a fins didáticos e conceituais.

Nas seções a seguir, cada um dos três softwares será apresentado, detalhando sua fundamentação teórica, os principais parâmetros utilizados e a formulação matemática e numérica que modela e norteia suas simulações. Essa etapa permitirá compreender as especificidades de cada ferramenta, bem como suas vantagens e limitações no contexto da modelagem estratigráfica *Forward*.

### 3.1 DIONISOSFLOW®

Visando contribuir para a evolução da modelagem estratigráfica, os geólogos afiliados ao IFPEN (*Institut Français du Pétrole et des Energies Nouvelles*), Didier Granjeon e Philippe Joseph, desenvolveram um modelo numérico tridimensional de modelagem SFM conhecido como *DionisiosFlow® (Diffusive Orientated Normal and Inverse Simulation os Sedimentation)*. Trata-se de uma ferramenta de grande relevância para a indústria do petróleo, dada sua capacidade de simular a evolução geomorfológica e estratigráfica de bacias sedimentares, integrando processos geológicos em larga escala espacial e temporal.

A concepção inicial do modelo foi apresentada em uma tese de doutorado (Granjeon, 1997), e consolidada em publicações científicas a partir de 1999. O *DionisiosFlow®* tem sua base teórica fundamentada em um modelo difusivo tridimensional de múltiplas classes de sedimentos, utilizando uma abordagem empírica (*rule-based*) para simular o comportamento de sistemas sedimentares ao longo de milhares a milhões de anos. Essa abordagem inclui a representação dos principais processos deposicionais por meio de difusão gravitacional e hídrica, permitindo a compreensão e previsão da distribuição de fácies e da arquitetura interna das unidades sedimentares com base em dados geológicos, sísmicos e de poços.

Seu fluxo de trabalho tem início na definição do domínio do modelo, etapa em que se inserem a geometria da área de estudo e os dados topográficos, compostionais e estruturais iniciais, os quais servem de base para a simulação. Em seguida, são inseridos os parâmetros

geológicos e ambientais que regerão a evolução do sistema sedimentar ao longo do tempo, como subsidência, variações eustáticas e regimes de produção e aporte de sedimentos.

Com os dados de entrada inseridos, o modelo é então executado, simulando a evolução da bacia ao longo do tempo geológico, passo a passo, com base nas equações de difusão gravitacional e hídrica. Ao término da simulação, os resultados podem ser analisados por meio da visualização de superfícies, camadas acumuladas, mapas de fácies, granulometria, espessura, porosidade, entre outras variáveis geológicas relevantes.

O modelo pode ser calibrado por meio da iteração de parâmetros e da execução de múltiplos cenários, com o objetivo de ajustar os resultados simulados à realidade geológica observada em poços, reduzindo incertezas e aumentando a confiabilidade das previsões.

Por fim, o *DionisiosFlow®* tem se consolidado como uma ferramenta robusta e eficaz na análise de bacias sedimentares, na previsão da arquitetura de reservatórios e na avaliação de riscos geológicos em projetos de exploração e desenvolvimento.

### 3.2 GPM®

O *GPM®* (*Geological Process Modeling*) é um avançado modelo numérico de simulação estratigráfica direta (SFM) desenvolvido pela empresa SLB, uma das líderes mundiais em serviços e tecnologia para o setor de petróleo e gás. O software é fruto de uma longa evolução conceitual iniciada com a tese de doutorado de Daniel Tetzlaff, em 1987, onde foi apresentado o desenvolvimento do *SEDSIM*, um dos simuladores precursores na história da modelagem de processos geológicos. O *GPM®* foi concebido com o objetivo de simular a deposição, o transporte e a erosão de sedimentos ao longo do tempo geológico, fornecendo uma base quantitativa para prever a distribuição de propriedades sedimentares e petrofísicas.

Seu fluxo de trabalho reflete diretamente a lógica dos processos sedimentares, o que potencializa sua capacidade preditiva. A modelagem se inicia com a definição das condições de contorno e, em seguida, são incorporadas informações equivalentes àquelas exigidas por modelos estratigráficos *Forward*, como curvas de variação do nível do mar, taxas de subsidência e características granulométricas dos sedimentos.

Com base nesses dados de entrada, o *GPM®* simula de forma iterativa os processos de transporte, deposição e erosão ao longo de intervalos de tempo definidos (*time steps*), aplicando equações físicas associadas a mecanismos como difusão, ação de ondas, marés e fluxos gravitacionais. O resultado é a construção progressiva de um modelo tridimensional da sucessão

estratigráfica, representando espacialmente as litologias, a arquitetura deposicional e a evolução paleogeográfica.

Os modelos gerados podem ser integrados a ambientes de modelagem geológica mais amplos, como o Petrel, para análises complementares de propriedades petrofísicas, correlação com dados sísmicos e avaliação de incertezas. Como demonstrado por Otoo e Hodgetts (2021), o fluxo de trabalho utilizado no *GPM®* permite a simulação de múltiplos cenários, a partir de ajustes em parâmetros de transporte e deposição de sedimentos, possibilitando a exploração de diferentes arquiteturas e estratigráficas, e até mesmo a calibração de modelos com dados de poço e sísmica.

Por se tratar de um modelo determinístico e orientado ao tempo (*forward*), o software utiliza condições iniciais e históricas como base de entrada, sem realizar ajustes diretos aos dados observacionais atuais, como sísmica ou perfis de poço. Isso permite a geração de modelos geologicamente plausíveis que capturam de forma quantitativa a dinâmica de formação das camadas sedimentares.

### 3.3 SEDSIMPLE

Diferentemente do *DionisiosFlow®* e do *GPM®*, o *SedSimple* não é um software que fornece respostas visuais diretamente no ambiente de simulação, mas sim por meio de resultados numéricos. Criado com a proposta de oferecer uma alternativa acessível e adaptável aos pacotes comerciais, o *SedSimple* adota uma filosofia de código aberto, gratuito, voltada à modelagem estratigráfica direta, com foco no uso acadêmico e em pesquisas científicas.

Daniel M. Tetzlaff, autor do software, desenvolveu um sistema baseado em arquivos ASCII simples, o que proporciona facilidade de compreensão por parte do usuário e maior integração com outros programas. Como complemento, o *SedSimple* conta com um software auxiliar denominado *Sirius*, para pré e pós processo, que possibilita a geração de arquivos de entrada e visualização gráfica tridimensional dos resultados por meio de animações temporais, sem interferir na estrutura computacional do núcleo de simulação.

O funcionamento do *SedSimple*, assim como nos demais softwares apresentados, baseia-se em princípios determinísticos de modelagem geológica. Ele representa o espaço por grids compostas por células quadradas e camadas verticais, e o tempo por etapas sequenciais controladas automaticamente, com o objetivo de garantir a estabilidade dos cálculos numéricos. Projetado para simular diferentes tipos de ambientes sedimentares, o software adota parâmetros

comuns aos simuladores SFM, destacando-se, porém, pela introdução do conceito de “carga equivalente”, que permite tratar diferentes tipos de sedimentos com distintas propriedades de transporte em uma abordagem unificada.

O fluxo de trabalho do *SedSimple* inicia-se com a definição do domínio espacial e temporal da simulação, incluindo a extensão da área modelada, o intervalo de tempo geológico e a configuração inicial da superfície topográfica e batimétrica. Em seguida, o usuário insere os parâmetros ambientais e físicos que controlam os processos sedimentares, como taxas de subsidência e variações eustáticas. A produção de sedimentos é definida por pontos-fonte, nos quais se especifica a quantidade total de material introduzido por intervalo de tempo, além de sua composição granulométrica.

Como resultado, o software gera saídas numéricas que descrevem o ambiente sedimentar simulado, incluindo mapas de topografia final, espessura sedimentar acumulada e distribuição por classe de sedimento. Esses dados podem ser utilizados para interpretar padrões de preenchimento de bacia, geometrias estratigráficas e a dinâmica sedimentar ao longo do tempo geológico. O modelo é iterativo e computacionalmente eficiente, permitindo a execução de múltiplos cenários com diferentes combinações de parâmetros de entrada.

Dada sua abordagem dinâmica, leve e flexível, o *SedSimple* mostra-se ideal para fins didáticos e investigações científicas voltadas à compreensão conceitual da evolução de sistemas deposicionais sob controle combinado de tectônica, eustasia e sedimentação.

### 3.4 PROCESSOS MODELADOS

A modelagem de processos geológicos pode adotar diferentes abordagens, variando desde a implementação de equações físicas complexas até métodos heurísticos mais simplificados. No entanto, a modelagem estratigráfica *Forward* tem como principal propósito a reconstrução da morfologia e estrutura interna dos corpos sedimentares por meio da simulação dos processos físicos, biológicos e químicos que atuam em escalas de tempo geológicas (WATNEY *et al.*, 1999 *apud* DUCROS *et al.*, 2023).

Na SFM, essa reconstrução é geralmente realizada com base em seis processos principais: (1) a geração de espaço de acomodação, controlada pela deformação da bacia, variações do nível do mar e pela própria deposição de sedimentos; (2) o aporte sedimentar, proveniente de fontes internas ou externas; (3) a produção *in situ* de carbonatos ou matéria orgânica; (4) o

transporte e a erosão dos sedimentos; (5) a diagênese; e (6) a compactação (DUUCROS *et al.*, 2023).

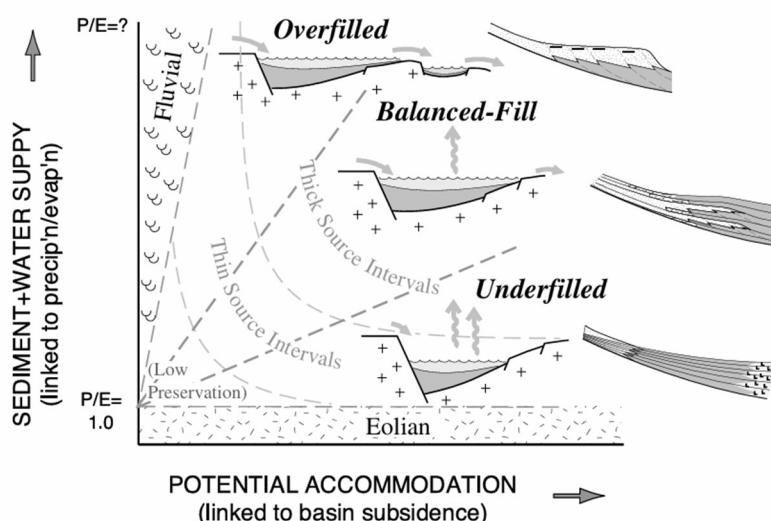
Dentre os seis processos mencionados, cinco são efetivamente representados nos três softwares utilizados neste trabalho – com exceção da compactação e diagênese, que ainda são tratadas de forma limitada ou até mesmo ausente no caso da diagênese. Esses processos são incorporados de maneira distinta por cada ferramenta, podendo variar quanto à forma de modelagem e implementação, ao detalhamento de parâmetros envolvidos e à resolução temporal e espacial adotada. Ainda assim, todos eles compartilham do mesmo objetivo: representar a evolução de estratigrafia deposicional a partir da integração entre os processos sedimentares e os controles externos.

### 3.4.1 ACOMODAÇÃO E APORTE SEDIMENTAR

O processo de acomodação, definido como a diferença de elevação entre o ponto mais baixo da bacia e seu ponto de transbordamento, determina o espaço máximo disponível para a acumulação de sedimentos dentro de uma bacia. Diferentes ocorrências, características e distribuições estratigráficas em ambientes lacustres, caso da Formação Green River, resultam de distintas relações entre o fornecimento de sedimentos, o nível do lago e a acomodação (BOHACS *et al.*, 2000).

Figura 1 – Relação entre os processos que definem a arquitetura estratigráfica em uma bacia.

No eixo y, o aporte sedimentar, e no eixo x, o potencial de acomodação.



Fonte – Bohacs *et al.* (2000, p. 16).

Três tipos principais de bacias lacustres são comumente descritos, cada um associado a diferentes condições de acomodação, aporte sedimentar e nível do lago: os ambientes *overfilled*, *balanced-fill* e *underfilled*. Como ilustrado na Figura 1 cada um desses ambientes dá origem a distintas associações de fácies e sequências estratigráficas.

- Ambientes *overfilled* se caracterizam por alto aporte sedimentar e baixo potencial de acomodação, apresentando hidrologia aberta e baixa flutuação do nível do lago. Como consequência, formam-se camadas espessas e contínuas, marcadas por forte progradação (avanço da linha de costa para o interior da bacia).
- Nos ambientes *balance-fill* o aporte sedimentar encontra-se em equilíbrio com a capacidade de acomodação, resultando em uma hidrologia alternada entre condições fechadas e abertas, dependendo diretamente das oscilações do nível do lago. Do ponto de vista estratigráfico, observa-se uma alternância entre diferentes tipos de depósitos, refletindo esse equilíbrio dinâmico.
- Já os ambientes *underfilled* ocorrem quando a acomodação excede o aporte sedimentar disponível, originando lagos com hidrologia predominantemente fechada. Esse ambiente favorece o empilhamento vertical de camadas de menor espessura e mais contínuas.

A acomodação é representada nos diferentes softwares por meio da simulação do movimento tectônico, que modela a criação ou redução do espaço disponível na bacia por meio de soerguimento ou subsidência da topografia. Além disso, as variações do nível do lago e o aporte sedimentar – definidos pelo volume de água e carga sedimentar que adentram a bacia – também são considerados como parâmetros fundamentais na modelagem.

### 3.4.2 PRODUÇÃO IN-SITU

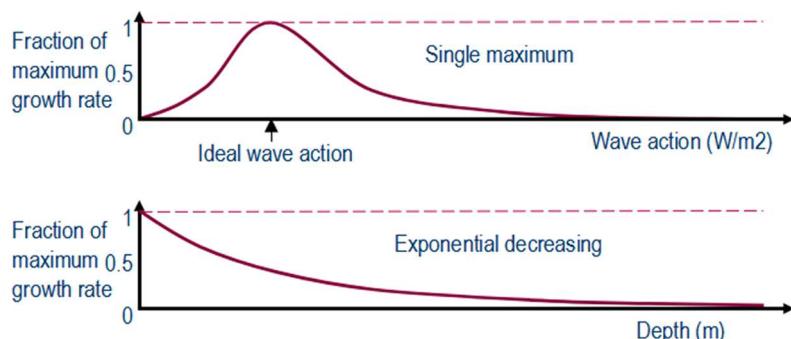
O crescimento de carbonatos, ou a precipitação de rochas evaporíticas, ocorre por meio de processos químicos, físicos e biológicos controlados por condições ambientais. Uma vez formados, esses sedimentos podem ser erodidos, transportados e depositados da mesma forma que os sedimentos siliciclásticos (TETZLLAF, 2023).

Nos simuladores SFM, o crescimento de carbonatos é comumente modelado em função do tempo, da profundidade da água e de variáveis ambientais, como energia das ondas, temperatura e fluxo de sedimentos.

Nas simulações, os três softwares analisados consideram dois fatores ambientais principais como controladores do crescimento carbonático: a profundidade da água, que determina a disponibilidade de luz no fundo, e a ação das ondas, diretamente relacionada à dissipação de energia no ambiente lacustre. Esses fatores são representados por curvas de produção (Figura 2), as quais descrevem o crescimento individual em função da profundidade da lâmina d'água e da energia de onda do ambiente.

A combinação dos fatores ambientais varia entre os softwares. O *SedSimple* e o *GPM®* permitem a entrada de curvas de multiplicadores de taxa de crescimento, tanto para profundidade quanto para energia de onda, podendo ser aplicada de forma aditiva ou multiplicativa. Já o *DionisiosFlow®* possui uma abordagem distinta, restringindo diretamente o crescimento de carbonatos com base em valores-limite predefinidos de energia de onda.

Figura 2 - Curvas de crescimento de carbonato em função das duas principais propriedades que a limitam. A curva de cima representa o multiplicador do crescimento em função da energia de ondas, quanto a curva de baixo representa o multiplicador em função da profundidade do ambiente.



**Fonte:** Tetzlaff (2023, p. 32).

### 3.4.3 TRANSPORTE E EROSÃO

O transporte de sedimentos através de longas distâncias em ambientes fluviais é predominantemente controlado pela ação do fluxo de água, desde a origem do canal até o fundo da bacia. Canais são formados, mantidos e alterados por dois fatores: fluxo de água e concentração de sedimentos (GRANJEON, 2019).

A maneira mais simples de modelar o movimento de sedimentos dentro de um canal fluvial é assumir que eles são transportados em função do gradiente, das características dos sedimentos

e de condições ambientais, como a turbulência da água, o meio no qual estão emersos, o processo causador do movimento e o tipo de sedimento sendo trabalhado (TETZLLAF, 2023).

Os softwares abordados no presente trabalho são ferramentas determinísticas, cada qual com uma abordagem distinta para modelar o transporte de sedimentos. De acordo com Hawie (2019), os modelos determinísticos numéricos classificam-se em três categorias, considerando a abordagem de cálculo do transporte de sedimentos adotada:

- Modelos geométricos, onde assumem que a morfologia da bacia coincide com o perfil deposicional influenciado por variações de acomodação, modelos esses, bidimensionais;
- Modelos baseados em hidrodinâmica, que utilizam de aproximações das equações de Navier-Stokes para obter padrões sedimentares realistas, porém apresentam um alto custo computacional;
- Modelos baseados em difusão, onde equações de difusão representam os processos de transporte de sedimentos, possibilitando simulações em grandes escalas temporais, considerando as limitações relacionadas à não unicidade das soluções.

No *GPM®*, o movimento de sedimentos remete a equações originárias do simulador *SEDSIM* (HARBAUGH, 1993 *apud* OTOO & HODGETTS, 2021), no qual os processos de transporte, erosão e deposição são regidos por uma forma simplificada das equações de Navier-Stokes. Tal simplificação, implica na utilização do modelo “*shallow-water free-surface flow*”, que indica um modelo onde a velocidade vertical pode ser desprezível, dado o fato de que a profundidade da água é muito menor do que as dimensões horizontais e, neste caso, em vez de modelar o fluxo tridimensional completo, o modelo considera apenas dimensões horizontais, trabalhando com a velocidade média do fluxo e uma profundidade média (OTOO & HODGETTS, 2021).

Dois tipos de fluxos são modelados no *GPM®*, o fluxo permanente, utilizado quando a velocidade de fluxo e a profundidade não sofrem alterações abruptas ao longo do tempo, e o fluxo transiente, usado quando a velocidade e profundidade variam com o tempo, como, por exemplo, em correntes turbidíticas (TETZLAFF *et al.*, 2014). Ambos os métodos utilizam a abordagem *shallow water* para simular o fluxo, possibilitando a modelagem dos processos de erosão, transporte e deposição.

Numericamente, o fluxo permanente é solucionado numericamente por meio do método de diferenças finitas (MDF), enquanto o fluxo transiente considera o “*particle-in-cell*”

(TETZLAFF *et al.*, 2014), um método de partícula derivado do SEDSIM3 para resolver a concentração e a capacidade de transporte de sedimentos (TETZLAFF & HARBAUGH, 1989 *apud* OTOO & HODGETTS, 2021).

As equações fundamentais responsáveis por reger o fluxo, tanto o transiente quanto o permanente, no *GPM®*, são apresentadas nas Equações 1 e 2, equação da continuidade e do momento, respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{Q} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + (\vec{Q} \cdot \nabla) \vec{Q} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \mu U + \rho(\vec{g} + \Omega \vec{Q}), \quad (2)$$

sendo  $\rho$  a densidade da água,  $\vec{g}$  a gravidade,  $t$  o tempo,  $\vec{Q}$  o vetor de velocidade,  $P$  a pressão,  $U$  o tensor de *Navier-Stokes*,  $\mu$  a viscosidade do fluido e  $\Omega$  a aceleração de Coriolis. Aplicando a simplificação, assumindo que a densidade  $\rho$  e a viscosidade  $\mu$  são constantes, e a aceleração de Coriolis  $\Omega$  vale 0, as Equações 1 e 2 podem ser expressas pelas Equações 3 e 4, dadas por:

$$\nabla \cdot \vec{Q} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + (\vec{Q} \cdot \nabla) \vec{Q} = -\nabla \phi + \nu \nabla^2 \vec{Q} + \vec{g}, \quad (4)$$

sendo  $\phi = P/\rho$  a razão entre a pressão e a densidade, e  $\nu = \mu/\rho$  a viscosidade cinemática.

O sistema de equações resultante, que modela o fluxo é baseado nas seguintes simplificações da equação de Navier-Stokes aplicadas as seguintes hipóteses nas Equações 3 e 4: (1) o fluxo é sempre confinado entre uma superfície rígida impermeável e uma superfície livre (fundo ou topo); (2) a velocidade é constante em qualquer seção vertical durante o fluxo; (3) a fricção nos contornos é proporcional ao quadrado da velocidade do fluxo; (4) a distribuição da pressão é hidrostática. Tais simplificações resultam nas equações:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = -\nabla \cdot (d \vec{Q}), \quad (5)$$

$$\left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right) = -(g\nabla)H + \frac{c_2}{\rho}\nabla^2Q - \frac{c_1Q|Q|}{d}, \quad (6)$$

sendo  $H$  a elevação da superfície da água,  $c_2$  o coeficiente de fricção do fluido,  $c_1$  o coeficiente de fricção da água,  $d$  a profundidade do fluxo.

Ao contrário do *GPM®*, o *SedSimple* utiliza uma abordagem distinta chamada “*whole-channel modeling*”, que combina os efeitos do fluxo e transporte de múltiplos sedimentos para modelar a origem, migração e abandono de canais sob diversas condições ambientais (TETZLAFF, 2023). Essa abordagem acompanha a trajetória do canal desde sua nascente até o ponto terminal, utilizando princípios de canais sinuosos, incluindo a modelagem do perfil longitudinal e da seção transversal (TETZLAFF, 2023).

A Equação 7 descreve o algoritmo adotado pelo *SedSimple* para modelar canais de transporte, em que a quantidade de sedimentos erodidos, transportados e depositados é calculada utilizando o conceito de capacidade de transporte, uma medida da quantidade máxima de sedimentos que o fluxo consegue transportar sob determinadas condições hidrodinâmicas:

$$r = \int_0^S [ck_c e^{-q_c(S-s)} + (1 - \cos(\alpha))sign(\sin(\alpha))k_s e^{-q_s(S-s)}] ds. \quad (7)$$

Nela,  $r$  representa a razão do movimento lateral do canal,  $c$  a curvatura com sinal, e  $k_c$ ,  $k_s$ ,  $q_c$ ,  $q_s$  são constantes que definem as amplitudes, decaimentos da curvatura efetiva e a intensidade do efeito do gradiente, respectivamente. O ângulo  $\alpha$  representa a inclinação entre o vale e o eixo do canal.

No *SedSimple* e no *GPM®*, o conceito de capacidade de transporte determina o quanto de cada sedimento será transportado e/ou depositado, considerando: (1) a mistura de sedimentos, em termos de tamanho e densidade; (2) a transportabilidade, relacionada a velocidade do fluxo; (3) o conceito de carga equivalente, descrito posteriormente nessa sessão, que consiste de uma maneira de converter as diferentes misturas do fluxo dos sedimentos em uma única mistura hipotética. Caso a concentração de sedimentos for menor que a capacidade de transporte, o meio irá sofrer erosão, enquanto se a concentração de sedimentos for maior que a capacidade de transporte, o meio sofrerá deposição.

O *DionisiosFlow®*, por sua vez, utiliza uma abordagem difusiva baseada no modelo dinâmico proposto por Lane (1955), onde a capacidade de transporte é controlada pela energia

do canal, em função da inclinação e do fluxo de água. Esse conceito estabelece um equilíbrio entre a concentração de sedimentos e a capacidade de transporte ( $Q_s$ ), em função do tamanho dos grãos ( $D$ ), do fluxo de água ( $Q_w$ ) e da inclinação do canal ( $S$ ) (GRANJEON, 2019), conforme representado na Equação 8:

$$Q_s D \propto Q_w S. \quad (8)$$

O seu algoritmo se baseia em um modelo de difusão modificado onde a razão de transporte é dividida em dois termos, o “*long-term gravity driven*”, onde a proporcionalidade do fluxo com a inclinação implica em uma equação difusiva não linear, ativa principalmente em regiões altas com um gradiente maior, e o “*short-term water-driven*”, considerado mais eficiente pois permite o transporte rápido de sedimentos da fonte para o sumidouro (GRANJEON, 2019).

O termo de transporte *long-term gravity-driven*, impulsionado pela gravidade, é proporcional a inclinação local, resultando em uma equação difusiva não linear, como na Equação 9:

$$\overrightarrow{q_{ss,k}} = -K_{g,k} \sigma_k \left| \nabla h \right|^{n_{g,k}-1} \nabla h, \quad (9)$$

sendo  $\overrightarrow{q_{ss,k}}$  é o fluxo impulsionado pela gravidade para cada sedimento  $k$  [ $m^2/s$ ],  $K_{g,k}$  o coeficiente de difusão [ $m^2/s$ ],  $\sigma_k$  a concentração de sedimento,  $h$  a elevação da topografia [ $m$ ],  $\nabla h$  o gradiente e  $n_{g,k}$  uma constante.

Já o termo *short-term water-driven*, explícito na Equação 10, tem seu impulso através da água:

$$\overrightarrow{q_{sw,k}} = -K_{w,k} \sigma_k \varepsilon_w^{m_w} \left| \nabla h \right|^{n_{w,k}-1} \nabla h, \quad (10)$$

sendo  $\overrightarrow{q_{sw,k}}$  é o fluxo impulsionado pela água para cada sedimento  $k$  [ $m^2/s$ ],  $K_{w,k}$  o coeficiente de difusão em função da profundidade da água [ $m^2/s$ ],  $\sigma_k$  a concentração de sedimento,  $\varepsilon_w$  a descarga local de água [-],  $m_w$  e  $n_{w,k}$  duas constantes.

### 3.4.4 COMPACTAÇÃO

Compactação é a deformação da rocha causada pelo peso excessivo de sedimentos nas camadas superiores , e mesmo que sem modificar o espaço para acomodação de sedimentos, a compactação influencia o preenchimento sedimentar a partir da modificação da espessura das camadas sedimentares (GRANJEON, 2019).

*DionisosFlow®* utiliza um modelo mecânico de compactação, que relaciona diretamente a porosidade do sedimento com o seu rebaixamento máximo. Isso significa que se uma camada sofrer muita erosão, o rebaixamento da camada irá diminuir, a fim de evitar a descompactação de sedimentos nessa região.

NO *GPM®*, a compactação é modelada considerando apenas o peso das rochas, sem a interferência da pressão de poros, a partir da porosidade e permeabilidade dos sedimentos, possibilitando a simulação do aumento no espaço de acomodação, a mudança na geometria e espessura e mudanças no padrão de sedimentação.

Dentre os três softwares, *SedSimple* é o único que não possui ferramentas para a modelagem do processo de compactação.

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta para o desenvolvimento deste trabalho. Apresentando primeiramente o contexto geológico do estudo de caso dado pela bacia do *Green River*, o intervalo modelado para a realização das simulações e a parametrização do modelo conceitual realizada.

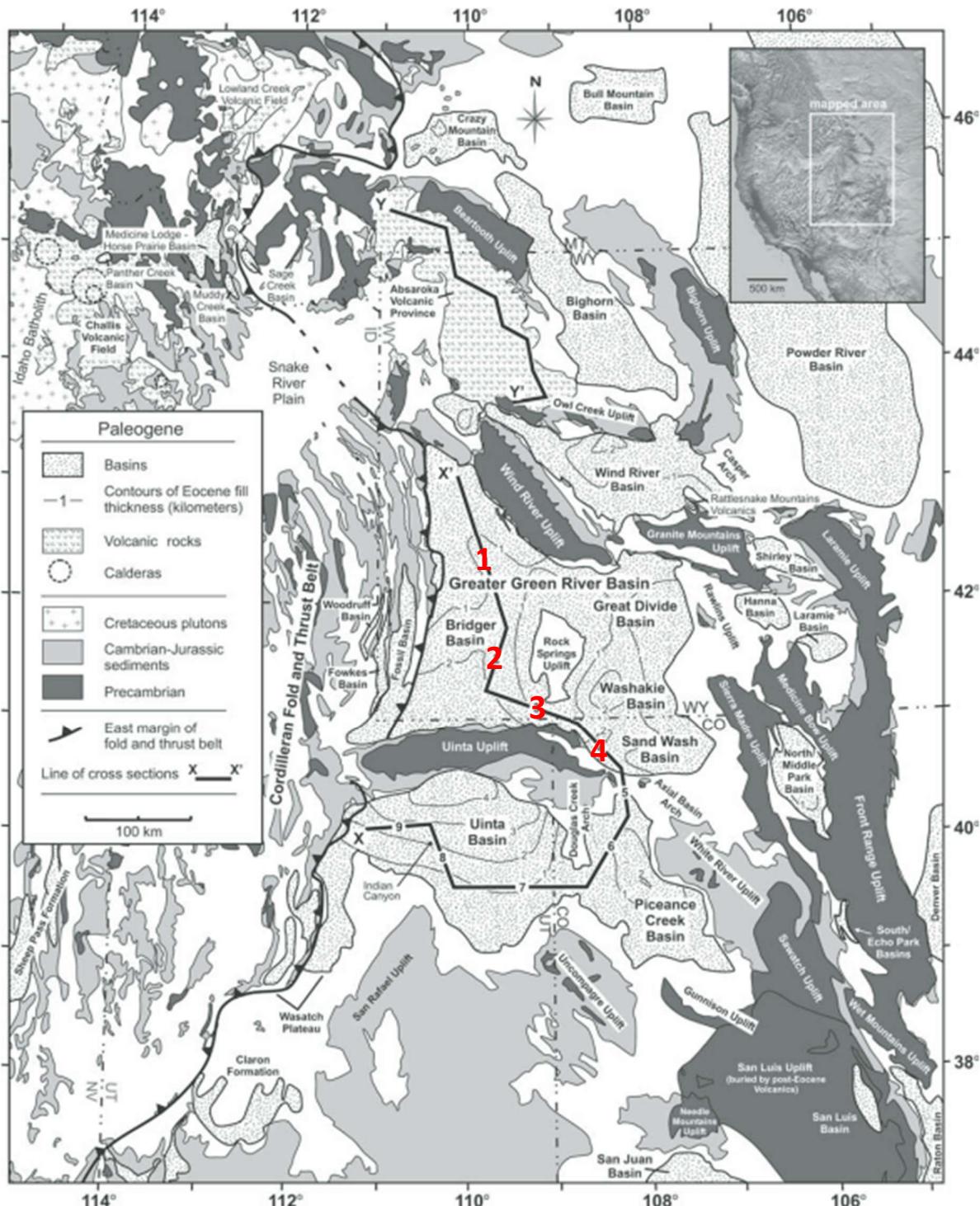
### 4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

A fim de testar o comportamento das simulações diante dos parâmetros calculados e estimados, foi escolhido o intervalo basal da sedimentação da *Greater Green River Basin* (GGRB), no estado do *Wyoming* (Estados Unidos), como aplicação prática do estudo de caso. Trata-se de um conjunto de sub-bacias do Eoceno, amplamente reconhecidas por sua relevância para análises estratigráficas, devido aos registros sedimentares complexos e excepcionalmente preservados, o que facilita a validação dos modelos executados nos simuladores.

A história geológica da GGRB - da qual fazem parte as Formações *Green River* e *Wasatch* abordadas nesse trabalho - representa um exemplo notável de interação entre os fenômenos de tectonismo, sedimentação e mudanças climáticas durante o Eoceno (53–48 Ma). Situada no oeste dos Estados Unidos, como ilustra a Figura 3, essa bacia intramontanhosa abrigou um complexo sistema de lagos interconectados, cuja evolução reflete tanto os controles locais quanto os regionais, sob forte influência da elevação tectônica das Montanhas Rochosas.

Desde o início da deposição do Membro *Wilkins Peak* (Formação *Green River*), por volta de 51 Ma, a GGRB passou por uma transformação significativa, tornando-se uma bacia lacustre fechada. Esse fenômeno ocorreu em resposta ao soerguimento de um divisor de drenagem a montante, responsável pelo redirecionamento de importantes cursos d'água provenientes do batólito de *Idaho* e do sudoeste de *Montana*. Essa reorganização da drenagem impediu que os conglomerados quartzíticos fossem transportados até a sub-bacia *Bridger*, estabelecendo o Lago *Gosiute* como um sistema subpreenchido isolado (SMITH *et al.*, 2008). Por volta de 49,5 Ma, a reintegração parcial da drenagem restaurou conexões fluviais entre bacias, promovendo o transbordamento da GGRB para a Bacia de *Piceance Creek*, mais a sul (Figura 3), agora em um estado de equilíbrio hidrológico (SMITH *et al.*, 2008).

Figura 3 - Mapa regional apresentando a localização e as características da Formação Greater Green River (FGGR), posicionado na divisa de três estados no oeste do Estado Unidos. Números de 1 a 4 representam a posição de pseudo-poços utilizados na parametrização do modelo, conectado pela linha preta contínua marcando uma seção transversal.



Fonte: Adaptada de Smith *et al.*, 2008, p. 55.

No decorrer da deposição das Formações *Green River* e *Wasatch*, lateralmente interdigitadas, observa-se um padrão de sedimentação altamente sensível ao balanço hidrológico. Durante o Eoceno, lagos hipersalinos de longa duração acumularam sedimentos orgânicos ricos, como folhelhos carbonáticos, e evaporitos, o que indica que a redução no aporte clástico — mais do que mudanças climáticas — foi o principal fator de controle na evolução dos lagos (CARROLL *et al.*, 2006). Isso demonstra que a evaporação superava a precipitação apenas devido à configuração morfológica da bacia, e não por uma mudança efetiva para um clima árido. A sedimentação seguiu padrões distintos conforme o nível de preenchimento das bacias. Em fases subpreenchidas (*underfilled*), os sedimentos se concentravam no centro da bacia, sob forte controle da subsidência. Já em fases superpreenchidas (*overfilled*) com sedimentos, resultando na predominância de fáceis aluviais e paludosas, com deposição clástica intensa próxima às fontes de aporte (CARROLL *et al.*, 2006). Tais padrões são confirmados por variações na distribuição das laminações e na composição química dos carbonatos e evaporitos entre as margens e o centro da bacia.

Um fenômeno geológico crucial para a dinâmica da bacia foi o vulcanismo. A atividade nas províncias vulcânicas de *Absaroka* e *Challis* resultou na construção de grandes edifícios vulcânicos, que modificaram a topografia regional, deformaram a crosta, alteraram os padrões de drenagem e aumentaram o fornecimento de sedimentos e nutrientes para os lagos (SMITH *et al.*, 2008). A presença de espessos leitos de cinzas vulcânicas entre 49,6 e 48,4 Ma evidencia esse impacto. Contudo, esse aporte cessou abruptamente após 47,2 Ma, indicando um fim súbito da atividade vulcânica regional.

Outro fator determinante para a evolução da bacia foi o papel dos divisores de drenagem interbacias, responsáveis por controlar os fluxos de entrada e saída de água. Esses divisores atuavam como filtros naturais, separando áreas de sedimentação clástica a montante das áreas de sedimentação química a jusante. A reconfiguração da drenagem após 49,5 Ma promoveu a conexão evolutiva entre as bacias da *Greater Green River*, *Piceance Creek* e *Uinta*, gerando uma transição progressiva de ambientes salinos para sistemas dulcíclicos e eventualmente superpreenchidos. Esse processo coincidiu com um período de resfriamento climático global e mudanças nas direções dos ventos predominantes, o que influenciou diretamente os padrões de precipitação na região (SMITH *et al.*, 2008).

Em suma, a evolução da *Greater Green River Basin* e da Formação *Green River* reflete uma complexa e interdependente interação entre subsidência tectônica, reorganizações hidrológicas, vulcanismo e mudanças climáticas — fatores que justificam plenamente sua escolha como

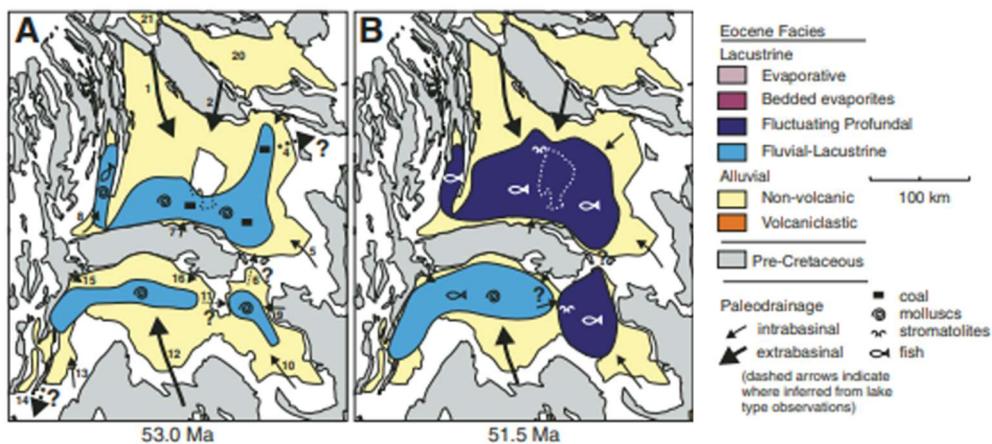
estudo de caso neste trabalho, dada sua aplicabilidade na análise de simulações estratigráficas *Forward*.

#### 4.2 INTERVALO MODELADO

O período selecionado para a realização da modelagem, ocorreu durante o intervalo entre 52.5 e 51.9 Ma, onde a *Greater Green River Basin* encontrava-se em uma transição significativa de seu regime deposicional, passando de um estado predominantemente *overfilled* para um estágio de *balanced-filled*. A região principal a ser modelada são as bacias internas *Bridger Basin*, posicionada a oeste de um alto regional (*Rock Springs Uplift*), e *Washakie Basin*, posicionada a sudoeste, Figura 3.

Esse período marca o final da dominância dos lagos *overfilled* na região, que ocorreram aproximadamente entre 53.5 e 52.0 Ma, possivelmente associados a altas taxas de erosão de rochas remanescentes do Cretáceo nas áreas de soerguimento adjacentes à bacia (SMITH *et al.*, 2008). É representado pela presença de fácies aluviais e fluviais lacustres, depositados a partir de lagos em bacias transbordadas, como visto na Figura 4.

Figura 4 - Mapas sinópticos mostrando a configuração paleohidrológica dos lagos da Formação Green River em dois time-steps que contém o intervalo de tempo modelado.



Fonte – Adaptada de Smith *et al.*, 2008, p. 74.

A partir de 52.0 até cerca de 51.3 Ma, iniciou-se a expansão de lagos *balanced-filled* em todas as sub-bacias da Formação *Green River*, como evidenciado pela ocorrência de fácies *fluctuating profundal*, depositados por lagos salinos que ocupavam bacias equilibradas, onde a

água oscilava perto do nível de base (SMITH *et al.*, 2008). Como pode ser visto na Figura 4, o período inicial deste intervalo geológico possui predominantemente fácies aluviais, compostas por depósitos de areia e lama oriundos do influxo de água e sedimento de rios, exibindo uma sequência estratigráfica progradacional. Já o final do intervalo modelado, apresenta uma sequência de fácies fluvial lacustre, que preservam fosseis abundantes de moluscos e peixes, tendo sido depositados a partir de lagos de água doce em bacias transbordadas (*overfilled*).

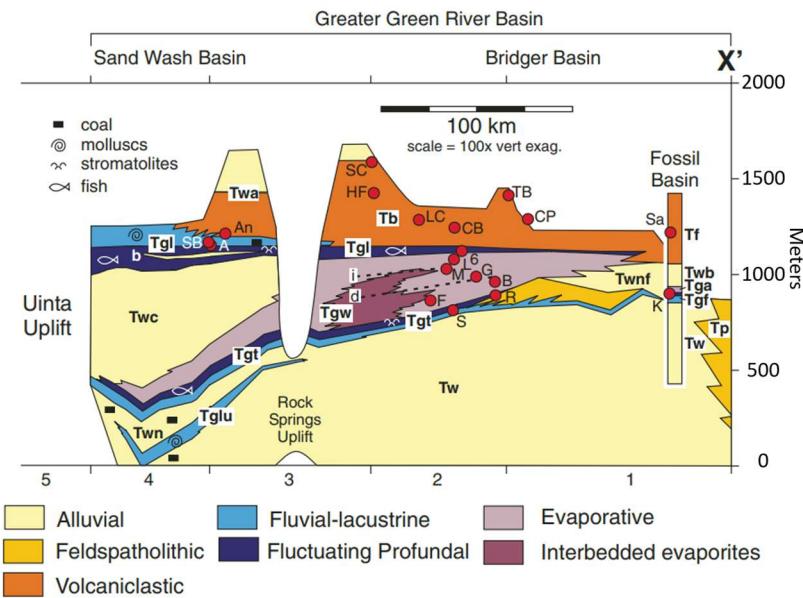
#### 4.3 PARAMETRIZAÇÃO

A criação do modelo conceitual da Bacia *Green River*, delimitada para o intervalo de tempo geológico entre 52,5 Ma e 51,9 Ma, foi fundamentada na interpretação de dados disponíveis e em referências bibliográficas relevantes, em especial nas reconstruções paleohidrológicas de Smith *et al.* (2008). Concluída essa etapa inicial, foi possível definir um conjunto de características fundamentais para a estruturação do modelo, tais como: (1) o tipo de ambiente deposicional predominante; (2) os tipos de sedimentos esperados para ocorrer nos ambientes envolvidos; (3) as sequências estratigráficas esperadas ao longo do intervalo; (4) os principais pontos-fonte responsáveis pelo fornecimento de sedimentos; e (5) os processos geológicos dominantes que atuaram durante a evolução da área modelada.

Com essas características conceitualmente estabelecidas, teve início a etapa de parametrização, a qual desempenha um papel crucial no desenvolvimento das simulações numéricas. Essa fase da modelagem tem como objetivo traduzir, de forma quantitativa e física, o comportamento dos processos interpretados no modelo conceitual. Por meio da parametrização, torna-se possível quantificar os principais parâmetros que controlam a dinâmica dos processos sedimentares e estratigráficos. A definição desses parâmetros é realizada com base em uma análise crítica de dados previamente consolidados na literatura científica, especialmente aqueles referentes à região estudada, conferindo maior embasamento e realismo à simulação dos cenários geológicos.

Parte da parametrização do modelo foi realizada com base em informações extraídas de 4 pseudo-poços, posicionados de acordo com a Figura 3. A seção transversal que interliga esses pseudo-poços está apresentada na Figura 5, onde a partir da análise de espessura, identificação de fácies presentes e da estimativa da proporção relativa entre elas, foi possível estimar valores de propriedades necessário para parametrizar o modelo, como por exemplo, a quantificação do aporte sedimentar.

Figura 5 - Seção transversal interligando os 4 pseudo-poços utilizados na parametrização do modelo, posicionados na bacia de acordo com a Figura 3.



**Fonte** – Adaptada de Smith *et al.*, 2008, p. 57.

#### 4.3.1 SEDIMENTOS

A tomada de decisão para a escolha dos tipos de sedimentos utilizados no modelo foi realizada em base da análise dos dados apresentados por Smith *et al.* (2008), após identificadas as unidades estratigráficas envolvidas no intervalo de tempo simulado. Essa seleção feita permitiu a definição de propriedade físicas e hidrodinâmicas de extrema relevância para a execução das simulações, tais como: diâmetro médio dos grãos, densidade, transportabilidade, porosidade e permeabilidade, conforme apresentado na Tabela 1. Esses atributos influenciam diretamente os mecanismos de transporte, deposição e retrabalhamento dos sedimentos ao longo do tempo geológico representado na modelagem.

Foram selecionados dois tipos de sedimentos siliciclásticos – *sandstone* e *lutite* – e dois carbonáticos – *mudstone* e *limestone* – para compor o aporte sedimentar nos modelos. Os siliciclásticos representam o aporte externo da bacia, com sedimentos transportados por sistemas fluviais, enquanto os carbonáticos representam o aporte interno, caracterizado pelo crescimento *in situ* desses sedimentos. As propriedades atribuídas a cada tipo, conforme expostas na Tabela 1, foram obtidas a partir de dados da literatura científica. No entanto, nem todas essas propriedades são utilizadas como parâmetros de entrada pelos softwares analisados.

Parâmetros como condutividade hidráulica e capacidade de infiltração são exigidos apenas pelo software *DionisosFlow®*, juntamente com o diâmetro e a densidade dos sedimentos. O *SedSimple*, por sua vez, requer apenas a definição do diâmetro das partículas, a partir do qual realiza cálculos internos para estimar o coeficiente de transportabilidade. Já o *GPM®* permite que todos os parâmetros apresentados sejam definidos diretamente pelo usuário como entradas do modelo.

Tabela 1 - Propriedades dos sedimentos que podem ser inseridos nos softwares para modelagem.

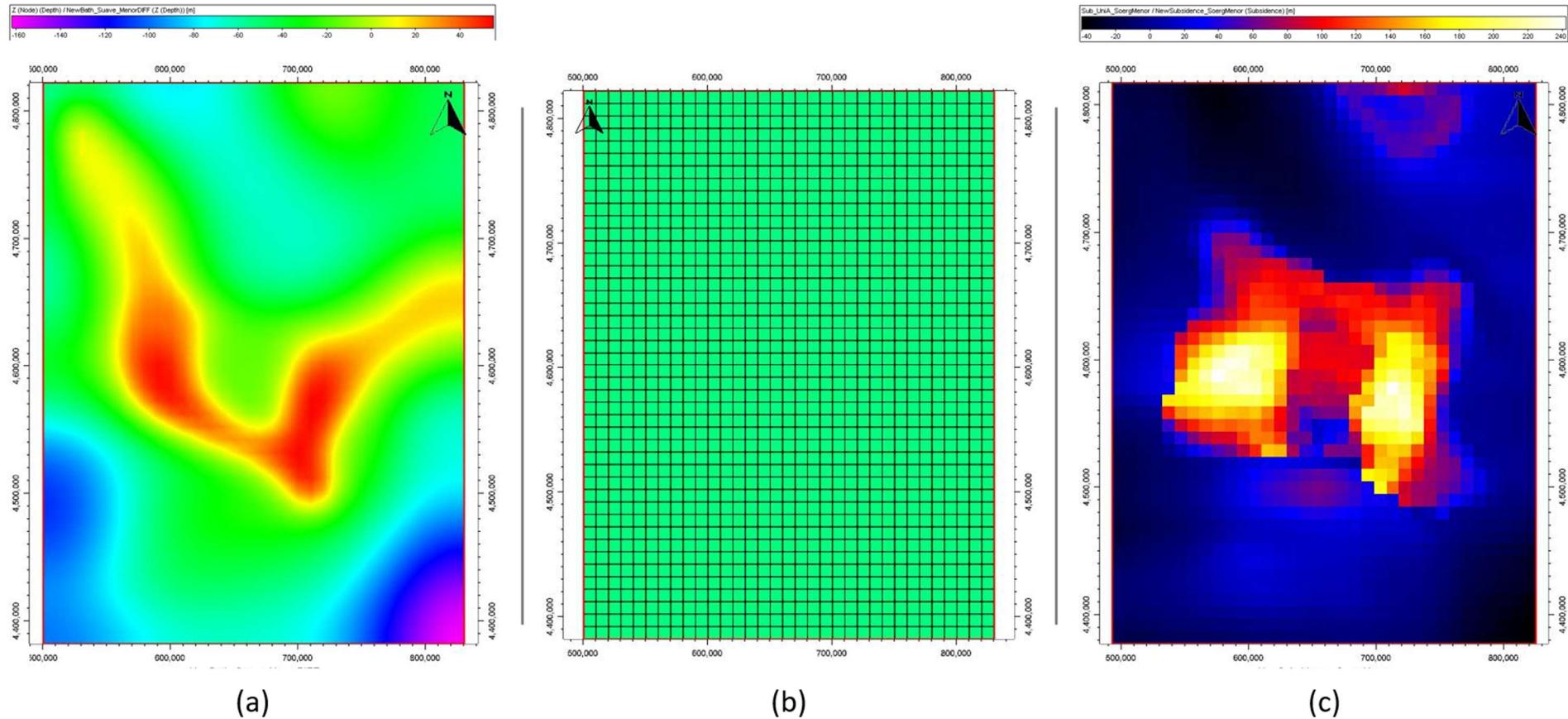
Propriedade	<i>SandStone</i>	<i>Lutites</i>	<i>MudStone</i>	<i>LimeStone</i>
Diâmetro [mm]	0.2	0.004	0.04	0.2
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	2.63	2.7	2.7	2.66
Transportabilidade [-]	1.2	6.4	6.4	1.2
Porosidade [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.4	0.7	0.7	0.7
Permeabilidade [mD]	55	0.01	0.01	0.01
Condutividade hidráulica [cm/s]	0.1	0.1	0.1	0.1
Capacidade de infiltração [mm/a]	100	100	100	100
Coeficiente de erosão [-]	1	1	1	0

Fonte – Elaborada pelo autor.

#### 4.3.2 DOMÍNIO ESPACIAL E SUBSTRATO

A definição da configuração do domínio espacial da modelagem é uma etapa comum à maioria dos softwares de SFM. Essa definição relaciona o estabelecimento dos limites espaciais (coordenadas iniciais e finais do plano *xy*), bem como o número total de células e suas dimensões. No modelo apresentado neste trabalho, o domínio foi estruturado com 33 x 44 células, cada uma com 10.000 metros em ambas as direções, totalizando 330.000 metros no eixo x e 440.000 metros no eixo y. A Figura 6 apresenta a representação gráfica do domínio espacial e da superfície inicial adotada nos três softwares analisados. Considerando o intervalo temporal total de 600 mil anos para o intervalo modelado, foi adotado um *time-step* de 50000 anos, resultando em modelos simulados com 12 camadas.

Figura 6 - Mapas iniciais do modelo utilizado. Os mapas foram reproduzidos igualmente nos três softwares, com modificações em unidades requeridas por cada software. A figura (a) representa o mapa de batimetria inicial do modelo, (b) o domínio estrutural com sua discretização, e (c) o mapa de subsidência, todos extraídos do *DionisosFlow®*.



**Fonte** – Elaborado pelo autor.

O tamanho da célula é considerado um parâmetro crítico no contexto da simulação numérica, visto que influencia diretamente a resolução e a acurácia do modelo. Células menores permitem um maior detalhamento geomorfológico, porém aumentam significativamente o custo computacional.

A fidelidade na representação da batimetria de origem, também denominada substrato, é fundamental para demonstrar a confiabilidade da modelagem, uma vez que essa superfície atua como ponto de partida para todos os processos subsequentes que serão simulados, representando a topografia da bacia no início do intervalo de tempo considerado. A elaboração dessa superfície baseia-se em mapas topográficos da região e é ajustada conforme o modelo conceitual previamente definido. Neste trabalho, dada a incerteza e limitação de dados diretos para sua definição, foi adotada uma superfície regionalmente suavizada, buscando reproduzir as áreas elevadas associadas às regiões sujeitas à soerguimentos e as depressões onde estavam instaladas as sub-bacias da GGRB (Figura 6-a).

Em modelagens mais complexas, torna-se necessário representar com maior detalhamento a área a ser simulada, incluindo o espaço de acomodação, os altos estruturais e topográficos, bem como zonas canalizadas. Ainda assim, ajustes e refinamentos na superfície inicial podem ser requeridos após as simulações preliminares, conforme os resultados obtidos.

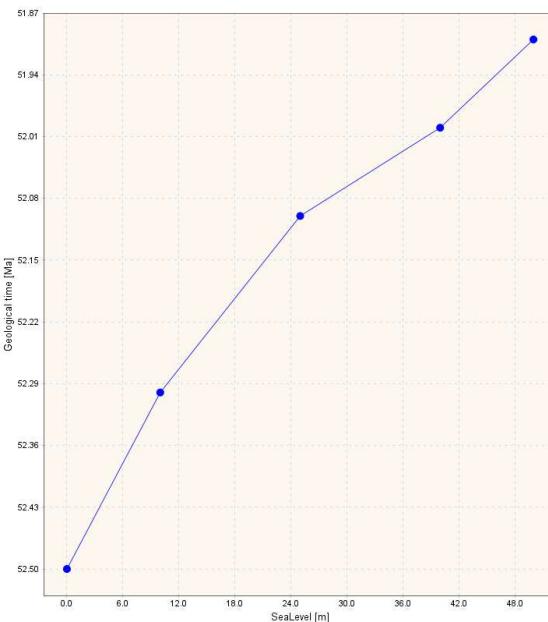
#### 4.3.3 APORTE SEDIMENTAR E NÍVEL DO LAGO

O aporte sedimentar e a variação do nível do lago estão diretamente relacionados à dinâmica deposicional da bacia, sendo considerados parâmetros-chave para a execução das simulações. A curva de variação do nível do lago ao longo do tempo (Figura 7) foi definida com base no trabalho desenvolvido por Smith *et al.* (2008), a partir da interpretação das sequências estratigráficas observadas na bacia durante o intervalo de tempo geológico analisado. A definição dessa curva não é construída de forma isolada, mas sim, em conjunto com a interpretação de outros processos fundamentais, como o aporte de sedimentos e a atividade tectônica da região. A variação da curva possui uma tendência de crescimento ao decorrer do tempo, buscando favorecer o avanço da sedimentação sobre novas áreas, sustentando o caráter de agradação de fácies, mantendo o ambiente transbordado de uma bacia *overfilled*.

O aporte de sedimentar foi estimado por meio do cálculo do volume total de sedimentos presentes na unidade modelada. Esse cálculo foi viabilizado a partir de dados de espessura obtidos em quatro pseudo-poços previamente definidos a partir do trabalho de Smith *et al.*

(2008), considerando a área de bacia delimitada a partir da atual área de ocorrência da GGRB, aliados à análise da proporção das unidades estratigráficas identificadas nesses registros, permitindo que seja gerada uma estimativa média do volume correspondente para cada tipo de sedimento.

Figura 7 - Curva de nível do lago parametrizada para o modelo. A curva possui uma tendência de crescimento ao decorrer da simulação para buscar reproduzir, juntamente com outros processos, o preenchimento da bacia.



Fonte – Elaborado pelo autor.

A distribuição dos sedimentos entre as fácies foi realizada com base na análise de seções estratigráficas extraídas e interpretadas a partir dos estudos de Bohacs (2000), o que possibilitou estimar a contribuição relativa de sedimentos siliciclásticos e carbonáticos. Com essas informações, foi possível executar a parametrização do aporte de cada tipo de sedimento no modelo – dado essencial para a simulação assertiva da evolução estratigráfica da bacia. A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros de aporte estimados.

Tabela 2 – Parametrização do aporte sedimentar estimado para o modelo.

Suprimento Total de Siliciclastos [km <sup>3</sup> /Ma]	Crescimento de <i>MudStone</i> [m/Ma]	Crescimento de <i>LimeStone</i> [m/Ma]
51780	40	60

Fonte – Elaborado pelo autor.

Além dos valores apresentados na Tabela 2, os cálculos de parametrização indicaram uma proporção de 51,625% de *sandstone* em relação ao total de sedimentos siliciclásticos. Essa proporção foi considerada como base para definir a concentração de sedimentos no aporte fluvial. No entanto, ajustes nos valores ainda se fazem necessários, uma vez que os diferentes softwares aplicam lógicas distintas na simulação dos processos de entrada sedimentar.

Alguns parâmetros, como taxa de crescimento de carbonato, podem ser utilizados nos três softwares analisados neste trabalho, exigindo apenas com a conversão de unidades para adequação. O sedimento *limestone* corresponde a um carbonato típico de ambientes mais rasos, com maior disponibilidade de luz, oxigênio e menor profundidade, sendo assim, sua produção restrita a regiões rasas da bacia, próximas às bordas e regiões marginais. Por outro lado, o *mudstone* representa carbonatos finos que se formam em ambientes mais calmos e profundos, sendo sua produção limitada às porções centrais e mais profundas da bacia, onde a subsidência tectônica cria um espaço de acomodação adequado. A Tabela 3 apresenta a restrição do crescimento desses carbonatos em função da profundidade.

Tabela 3 - Curva de restrição de crescimento de carbonato em função da profundidade do ambiente. Os valores tabelados para cada sedimento representam um multiplicador do crescimento máximo na dada profundidade.

Profundidade da água (m)	<i>Limestone</i>	<i>Mudstone</i>
0	1	0
40	1	0
50	1	1
60	0	1
100	0	1

Fonte – Elaborado pelo autor.

Para o *DionisiosFlow®* e o *SedSimple*, foi estimada uma vazão de descarga de água com base no suprimento total de sedimentos ( $\text{km}^3/\text{Ma}$ ) e na concentração total de sedimentos ( $\text{g/L}$ ). Essa estimativa é realizada internamente pelo *DionisiosFlow®*, que gera como resposta uma vazão média de 36.476  $\text{m}^3/\text{s}$ , posteriormente distribuída entre as diferentes fontes do modelo.

O *GPM®*, por sua vez, diferencia-se dos demais por utilizar a velocidade do fluxo de água no lugar da vazão. Por esse motivo, foi necessário estimar a velocidade média da água para

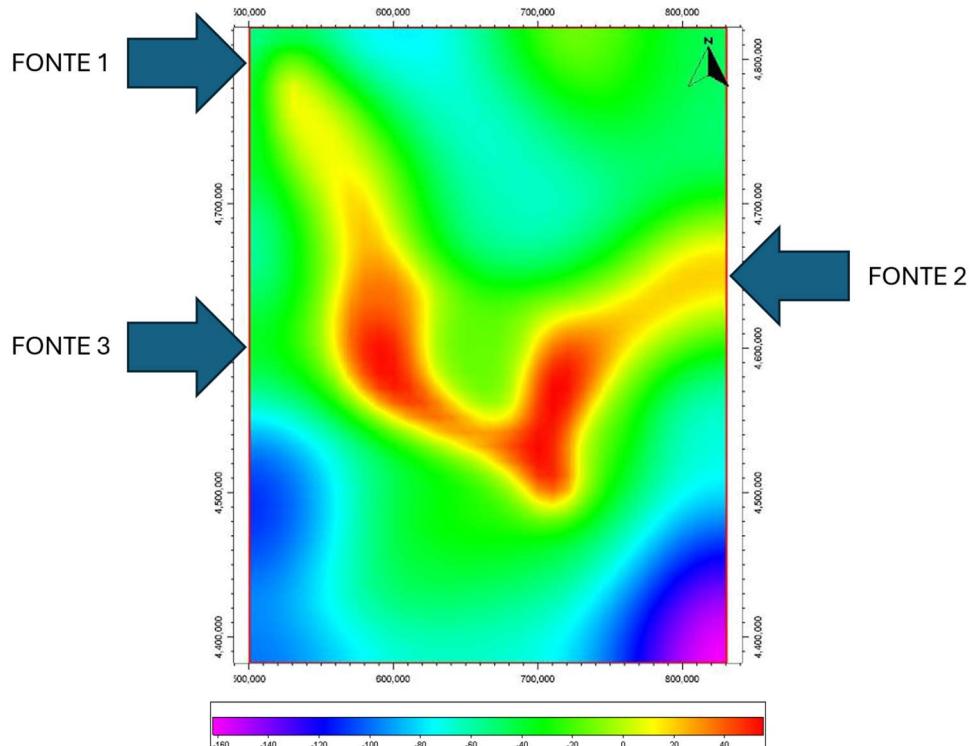
cada fonte, baseando-se na vazão total já calculada, nas dimensões das células e na quantidade de células que compõem cada fonte. A Equação 11 descreve esse cálculo:

$$Q_T = nL_xL_yv \quad (11)$$

com  $Q_T$  a vazão total de descarga da fonte ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $n$  é o número de células da fonte,  $L_x$  e  $L_y$  são os comprimentos das células nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente, e  $v$  a velocidade do fluxo ( $\text{m}/\text{s}$ ).

A Figura 8 ilustra o posicionamento das três fontes de sedimento no modelo, bem como suas respectivas proporções de aporte. A Fonte 1, localizada no canto noroeste do domínio (superior esquerdo), apresenta a maior taxa de fluxo de sedimentos, responsável por 42% da descarga total. A Fonte 2, única posicionada no lado leste da bacia, contribui com 40%, apresentando descarga semelhante à da Fonte 1. Já a Fonte 3, localizada na porção centro-oeste (meio esquerdo), caracteriza-se como a fonte de menor proporção, com apenas 18% da vazão total.

Figura 8 - Mapa de batimetria inicial mostrando o posicionamento das 3 fontes inseridas na parametrização, duas à oeste e um no lado leste.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Os softwares analisados apresentam abordagens distintas para a inserção das fontes sedimentares no modelo. O *DionisiosFlow®* permite apenas a inserção de fontes nas bordas do domínio e não admite fontes pontuais internas, sendo a inserção realizada a por meio da especificação da posição e dimensão da fonte no contorno do modelo. Em contrapartida, o *SedSimple* e o *GPM®* possibilitam a inserção tanto de fontes externas quanto internas, por meio da seleção de células específicas. No entanto, ambos os softwares exigem que as fontes sejam definidas como pontos discretos, o que demanda a seleção de múltiplas células para representar áreas maiores, como exemplo, de canais amplos.

Todas as fontes utilizadas no modelo possuem cinco células de comprimento, equivalentes a 50 km de largura. No *DionisiosFlow®*, as fontes 1 e 3 foram posicionadas, respectivamente, centradas nas posições 410.000 e 200.000 no eixo y da borda oeste, enquanto a fonte 2 foi posicionada centrada na coordenada 250.000 na borda leste. Já no *SedSimple* e no *GPM®*, as fontes foram inseridas em posições equivalentes às do modelo estruturado no *DionisiosFlow®*, porém deslocadas uma célula para dentro do domínio, a fim de evitar inconsistências numéricas nas modelagens.

A Tabela 4 apresenta vazões de descarga atribuídas a cada fonte durante todo o tempo de simulação, bem como as concentrações associadas a cada tipo de sedimento. As taxas de crescimento de carbonato mantiveram-se constantes ao longo intervalo modelado, conforme os valores definidos na Tabela 2. As velocidades médias menores utilizadas no *GPM®* devem-se às grandes dimensões das células no modelo, consideradas acima do ideal para esse tipo de aplicação.

Tabela 4 -Parametrização do aporte sedimentar para cada fonte inserida no modelo.

Fontes	Descarga Fluvial ( $m^3/s$ )	Velocidade da Água (m/s)	Concentração de <i>SandStone</i> (g/L)	Concentração de <i>Lutites</i> (g/L)
1	2188,57	0,0000306	0,0465	0,0435
2	2084,35	0,0000292	0,0465	0,0435
3	937,96	0,0000131	0,0465	0,0435

Fonte – Elaborado pelo autor.

O *GPM®* ainda se distingue dos demais visto que não utiliza concentrações específicas de sedimentos na água, mas sim uma taxa de sedimentação, expressa em milímetros por ano

(mm/ano). Esse valor representa a quantidade de sedimento efetivamente depositado a cada ano. A Tabela 5 indica valores dessa taxa para cada uma das fontes, calculados com base no volume estimado de sedimentos e na área total da bacia modelada.

Tabela 5 – Parametrização da concentração de sedimentos no aporte sedimentar utilizado no GPM de acordo com os cálculos de volume e espessura da bacia.

Fonte	Concentração de <i>SandStone</i> (mm/a)	Concentração de <i>Lutites</i> (mm/a)
1	2,223	2,088
2	2,123	1,989
3	0,955	0,895

Fonte – Elaborado pelo autor.

#### 4.3.4 SUBSIDÊNCIA

A influência tectônica foi incorporada ao modelo através da elaboração de um mapa de subsidência, derivado da relação entre superfícies topográficas correspondentes à base e ao topo da unidade estratigráfica mapeada, bem como da espessura da unidade, conforme expresso na Equação 12. Esse mapa foi utilizado com o foco de estimar os efeitos de subsidência e soerguimento, que impactam diretamente a criação ou destruição do espaço de acomodação ao longo do tempo geológico.

$$\text{Subsídia} = w^t + b^t - b^{t-1}, \quad (12)$$

sendo que  $w$  representa o mapa de espessura da unidade e  $b$  os mapas de batimetria, no tempo atual ( $t$ ) e em um tempo anterior ( $t - 1$ ), representando topo e base da unidade.

A Figura 6-c apresenta o mapa de subsidência utilizado na modelagem. Assim como a batimetria inicial, a subsidência é um parâmetro que pode ser ajustado conforme necessário, permitindo maior refinamento do modelo a partir da calibração dos efeitos tectônicos simulados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o desenvolvimento do trabalho apresentado, foram executadas simulações *Forward* nos três softwares de modelagem analisados, possibilitando que, nesta seção, sejam discutidos os resultados obtidos. A condução da análise será realizada com base em critérios definidos a partir do modelo conceitual e das hipóteses formuladas para os principais processos deposicionais atuantes na *Greater Green River Basin* durante o intervalo modelado, compreendido entre 52.5 e 51.9 Ma.

Os resultados extraídos de cada software foram organizados de modo a possibilitar uma comparação direta entre os modelos simulados, com o objetivo de avaliar como cada ferramenta foi capaz de modelar os processos de sedimentação, produção, transporte e acomodação da bacia, através da identificação da reprodução de aspectos compostionais e de arquitetura estratigráfica esperados para os ambientes simulados.

Os principais resultados foram agrupados em três categorias. O primeiro conjunto de dados corresponde aos mapas médios de proporção de sedimentos ao longo do tempo de simulação, com o objetivo de identificar, para cada tipo de sedimento presente no modelo, quais regiões da bacia apresentaram maior concentração relativa ao longo do tempo. Essa visualização permite avaliar a assertividade do transporte dos sedimentos siliciclásticos a partir das fontes fluviais externas e validar a previsão da produção *in situ* dos sedimentos carbonáticos, permitindo, assim, inferir a eficácia de cada software na representação dos processos de transporte e produção sedimentar.

Em seguida, a análise foi direcionada aos mapas médios de espessura resultantes das simulações, os quais indicam as regiões da bacia que receberam maior volume de sedimentos ao longo do tempo. Esse tipo de resultado é adequado para avaliar se os modelos foram capazes de simular corretamente os processos de acomodação, incluindo a subsidência e a evolução do espaço disponível para deposição, e se conseguiram gerar padrões de espessura compatíveis com os observados no registro geológico da bacia.

Por fim, foram analisadas seções transversais extraídas em posições específicas da área simulada. Essas seções são fundamentais para investigar a arquitetura estratigráfica das fácies geradas por cada modelo, a partir da distribuição vertical e lateral dos sedimentos depositados ao longo do perfil. Essa etapa permite validar se os processos deposicionais estão de acordo com o esperado, especialmente no que diz respeito à interação entre acomodação, nível do lago

e transporte de sedimentos, que em conjunto geram condições específicas de arquitetura estratigráfica.

Vale ressaltar que, além das diferenças quanto à forma de entrada de dados em cada um dos softwares, existem também variações nos modos de visualização dos resultados. Embora essas diferenças não afetem diretamente a resolução numérica dos dados, podem influenciar a interpretação visual e a validação comparativa dos modelos. Por exemplo, o *SedSimple* não oferece ao usuário alternativas de personalização gráfica, como diferentes paletas de cores para identificação das propriedades do modelo, dispondo apenas de uma paleta de cores fixa. Por outro lado, o *DionisosFlow®* e o *GPM®* disponibilizam diversas opções de paletas, voltadas a diferentes tipos de análise. Devido a isso, durante a apresentação dos resultados por meio das seções transversais, a interface do *SedSimple* exibirá uma escala de cores distinta da utilizada nos demais softwares, ainda que respeite a mesma escala numérica — aspecto que deve ser considerado com atenção na interpretação dos resultados.

Outro ponto importante a ser considerado nos resultados do *SedSimple* refere-se à geração dos mapas médios das propriedades do modelo. Enquanto o *DionisosFlow®* e o *GPM®* realizam esses cálculos internamente e apresentam os mapas diretamente em suas interfaces, o *SedSimple* não possui essa funcionalidade gráfica. Assim, foi necessário extrair os dados dos arquivos de saída do *SedSimple* e realizar os cálculos em ambiente externo. Para isso, foi desenvolvido um código em linguagem *Python*, responsável por ler os arquivos extraídos, tratar e pós processar estes dados para construir os mapas médios utilizados na análise comparativa.

## 5.1 RESULTADOS INCONSISTENTES

Durante a parametrização e as primeiras simulações realizadas, foram obtidos resultados inconsistentes nos softwares *GPM®* e *SedSimple*, quando utilizado os mesmos valores de entrada do *DionisosFlow®*, devidamente convertidos e adaptados às unidades exigidas de cada simulador. No *GPM®*, a velocidade calculada a partir da Equação 11, utilizando a vazão estimada no *DionisosFlow®* e as dimensões das células do modelo, resultou em um valor muito baixo quando aplicada em conjunto com a concentração de sedimentos definida. Como consequência, o canal fluvial não teve energia o suficiente para transportar os sedimentos siliciclásticos, resultando em acúmulo excessivos nas fontes e ausência de deposição significativa no restante do modelo.

No *SedSimple*, a dificuldade esteve relacionada com a conversão da concentração de sedimentos, que é expressa em unidades diferentes das utilizadas no *DionisosFlow®*. A conversão desses valores resultou em valores muito baixos de sedimentos na água, não gerando transporte de areia para o modelo. Nos dois casos, foi necessário realizar uma série de simulações utilizando diferentes valores dessas propriedades da parametrização para um ajuste adequado de acordo com o objetivo da modelagem. Os novos valores de velocidade para o *GPM®* e concentração de sedimentos para o *SedSimple* estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Novos valores de velocidade e concentração de sedimentos estimados para serem usados nos softwares *GPM®* e *SedSimple*. Valores escolhidos a partir de uma série de testes realizados buscando o melhor ajuste de dados.

	GPM	SedSimple	
Propriedade	Velocidade [m/s]	Concentração de <i>sandstone</i> [ $m^3/m^3$ ]	Concentração de <i>Lutite</i> [ $m^3/m^3$ ]
Valor	0.005	0.17	0.16

Fonte – Elaborado pelo autor.

## 5.2 PROPORÇÃO DE SEDIMENTOS

Os mapas médios de proporção de sedimentos, extraídos das simulações realizadas com os três softwares, demonstraram uma consistência geral quanto à representação dos principais processos sedimentares, notadamente o transporte de sedimentos siliciclásticos e a produção de sedimentos carbonáticos. De modo geral, os modelos apresentaram padrões espaciais bastante semelhantes, em conformidade com as restrições definidas na etapa de parametrização.

No que diz respeito à produção de sedimentos carbonáticos, todos os três softwares simularam com êxito a geração de *limestone* em regiões mais rasas da bacia, assim como a produção de *mudstone* em ambientes mais profundos. Essas distribuições refletem os critérios definidos durante a construção do modelo conceitual e os parâmetros atribuídos a cada ambiente deposicional. A limitação espacial da produção carbonática — controlada por fatores como profundidade e condições ambientais específicas — foi corretamente respeitada em todas as simulações, evidenciando a capacidade dos algoritmos em representar de forma acurada e precisa os mecanismos de produção *in situ*.

De forma semelhante, os sedimentos siliciclásticos — cuja origem foi associada a fontes externas e processos fluviais — foram transportados e depositados em regiões coerentes entre os diferentes modelos. Observa-se que os padrões de dispersão desses sedimentos seguiram trajetórias comparáveis, indicando certo grau de concordância entre os mecanismos de transporte, erosão e difusão empregados nos três softwares.

Apesar das semelhanças gerais, foram observadas diferenças pontuais quanto à magnitude da concentração de determinados tipos de sedimentos em áreas específicas, bem como em padrões secundários de erosão e dispersão. Essas variações serão detalhadas nas subseções seguintes, com foco individual em cada tipo de sedimento e na forma como cada simulador representou os processos envolvidos.

### 5.2.1 TRANSPORTE DE SILICICLÁSTOS

A análise dos mapas médios de proporção dos sedimentos siliciclásticos, apresentados na Figura 9, revelou uma boa concordância geral entre os três softwares utilizados na modelagem. A deposição de *sandstone* ocorreu predominantemente nas proximidades das fontes, com progressão em direção à entrada da bacia — fato que se explica principalmente pelo aumento do nível do lago durante o intervalo de simulação, o que favoreceu o avanço do sistema deposicional, porém sem permitir o transporte da areia para regiões muito distantes, dado seu maior diâmetro de grão, o que implica, consequentemente, em um menor coeficiente de transportabilidade.

Na simulação executada pelo *SedSimple*, foi possível observar um acúmulo adicional de areia na porção sul da área modelada. Esse comportamento não reflete uma deposição ativa de novos sedimentos oriundos das fontes marginais, mas sim o resultado do processo de erosão do substrato, que removeu frações mais finas e transportáveis, deixando uma proporção residual mais elevada de areia na região. No entanto, trata-se de uma área com espessura sedimentar muito baixa, o que reforça a interpretação de que tal ocorrência está associada à dinâmica erosiva.

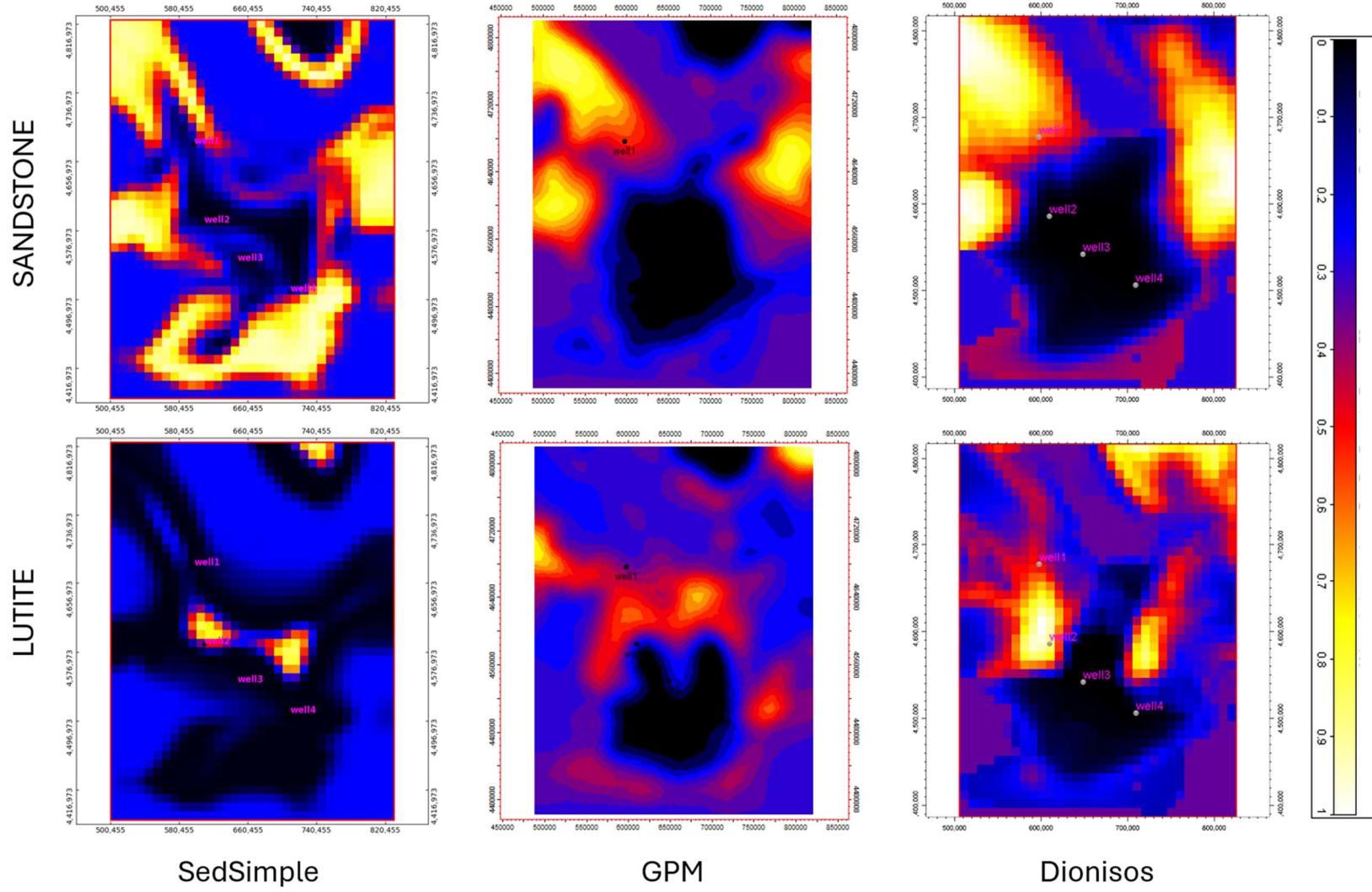
Um fenômeno semelhante foi identificado em uma sub-bacia localizada ao norte do domínio, onde também houve concentração de areia nos modelos do *SedSimple*. Porém, nas simulações realizadas com o *DionisosFlow®* e o *GPM®*, a presença de *sandstone* e *lutite* nessa região está mais claramente associada a um desvio no canal fluvial proveniente da fonte 2, resultando no transporte efetivo de sedimentos arenosos até essa área. Isso sugere que ambos

os softwares, *DionisosFlow®* e *GPM®*, foram mais eficazes no que diz respeito à representação do comportamento hidrodinâmico do sistema de entrada de sedimentos, evidenciando a influência de alterações no curso do canal sobre a distribuição dos depósitos — diferentemente do *SedSimple*, que apresentou problemas de acúmulo de sedimentos nas fontes.

Quanto aos sedimentos mais finos, os três modelos apresentaram padrões coerentes com o comportamento previsto: foram transportadas para regiões mais profundas da bacia, ultrapassando a extensão alcançada pelos sedimentos arenosos. Esse comportamento ocorre devido ao menor diâmetro de grão das *lutite*, o que lhes confere maior transportabilidade e permite que sejam conduzidas a distâncias maiores pelo sistema lacustre. Novamente, os softwares *DionisosFlow®* e *GPM®* demonstraram capacidade superior de simular esse transporte eficiente, com o *lutite* alcançando áreas mais afastadas do ponto de entrada.

Já no caso do *SedSimple*, a modelagem desse sedimento apresentou limitações mais evidentes: a taxa de proporção transportada foi significativamente menor e, em sua maior parte, os sedimentos foram depositados diretamente no fundo da bacia, sem apresentar dispersão significativa ao longo do domínio. Além disso, não foi observada nenhuma concentração de *lutite* associada à fonte 3, gerando resultados inesperados em termos da arquitetura de fácies nessa região — aspecto que será discutido posteriormente.

Figura 9 - Mapas médios de proporção de siliciclástos para cada simulador. Escala de cores em proporção do sedimento.



Fonte – Elaborado pelo autor.

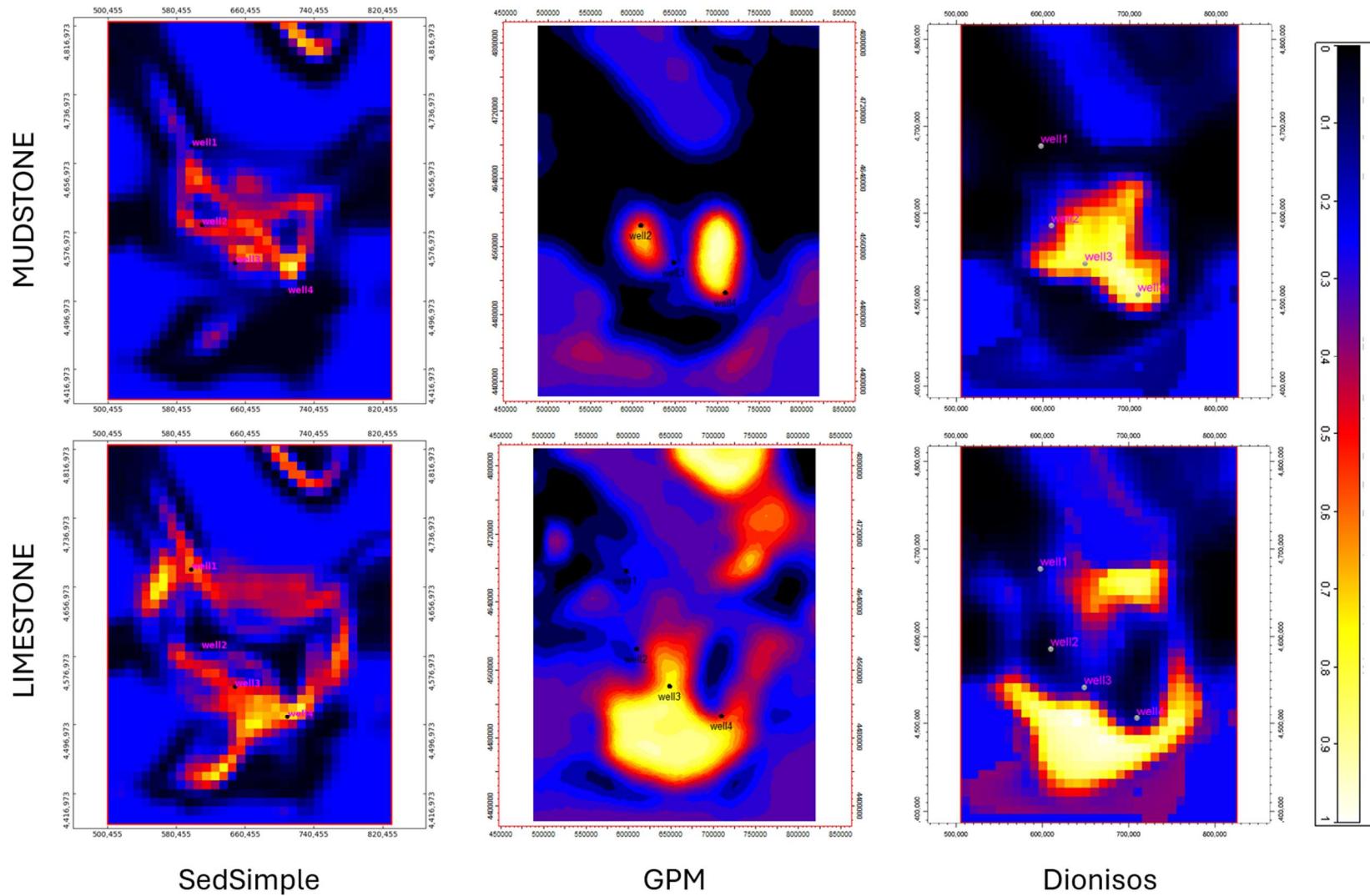
### 5.2.2 PRODUÇÃO DE CARBONATOS

A análise dos mapas médios de proporção de sedimentos carbonáticos, Figura 10, mostra uma coerência geral entre os três softwares nas simulações da produção de *limestone* e *mudstone*, respeitando as restrições ambientais impostas na parametrização. Em todos os modelos, o *limestone*, foi gerado predominantemente nas bordas da bacia, em regiões mais rasas, como esperado para esse tipo de sedimento carbonático que depende de iluminação, oxigenação e águas mais calmas e rasas para sua produção.

As diferenças observadas na distribuição espacial do *limestone* estão diretamente relacionadas ao espaço disponível em cada modelo, uma vez que a presença de outros sedimentos, como os siliciclásticos, interfere na ocupação do ambiente deposicional. Cada software apresentou ligeiras variações nesse aspecto, o que justifica as discrepâncias pontuais na proporção de carbonatos observadas entre eles.

Uma dessas diferenças ocorreu na sub-bacia ao norte, onde tanto o *SedSimple* quanto o *GPM®* apresentaram crescimento de *limestone*, enquanto o *DionisosFlow®* não indicou significativa presença desse sedimento. No caso do *SedSimple*, a ausência de siliciclásticos nessa região, devido à limitação no transporte desses sedimentos, permitiu o crescimento do carbonato. No *GPM®*, por sua vez, a presença reduzida de sedimentos siliciclásticos também favoreceu a produção de *limestone*, apesar de ainda haver algum aporte para essa sub-bacia. Essa variação ilustra como a competição por espaço deposicional entre diferentes tipos de sedimentos influencia diretamente a produção carbonática nos modelos.

Figura 10 - Mapas médios de proporção de carbonatos para cada simulador. Escala de cores em proporção do sedimento.



Fonte – Elaborado pelo autor

Outro ponto de destaque foi a ausência significativa de *limestone* na região sul do domínio no modelo gerado com o *SedSimple*, comportamento que não se repetiu nos outros dois softwares. Esse resultado pode ser atribuído ao processo de erosão do substrato, anteriormente mencionado, que levou ao acúmulo de *sandstone* residual nessa área. Com isso, o *limestone* teve seu espaço de crescimento limitado, resultando em menores concentrações quando comparado aos modelos do *GPM®* e *DionisosFlow®*.

A diferença mais evidente entre os modelos foi observada na região próxima ao poço 1, onde o *SedSimple* indicou uma proporção anormalmente elevada de *limestone*. Essa ocorrência é atribuída à baixa concentração de siliciclásticos nesse ponto, consequência da limitação do software em transportar esse tipo de sedimento. A ausência de competição sedimentar nessa área permitiu o crescimento carbonático, mesmo fora das zonas onde tal produção era originalmente esperada.

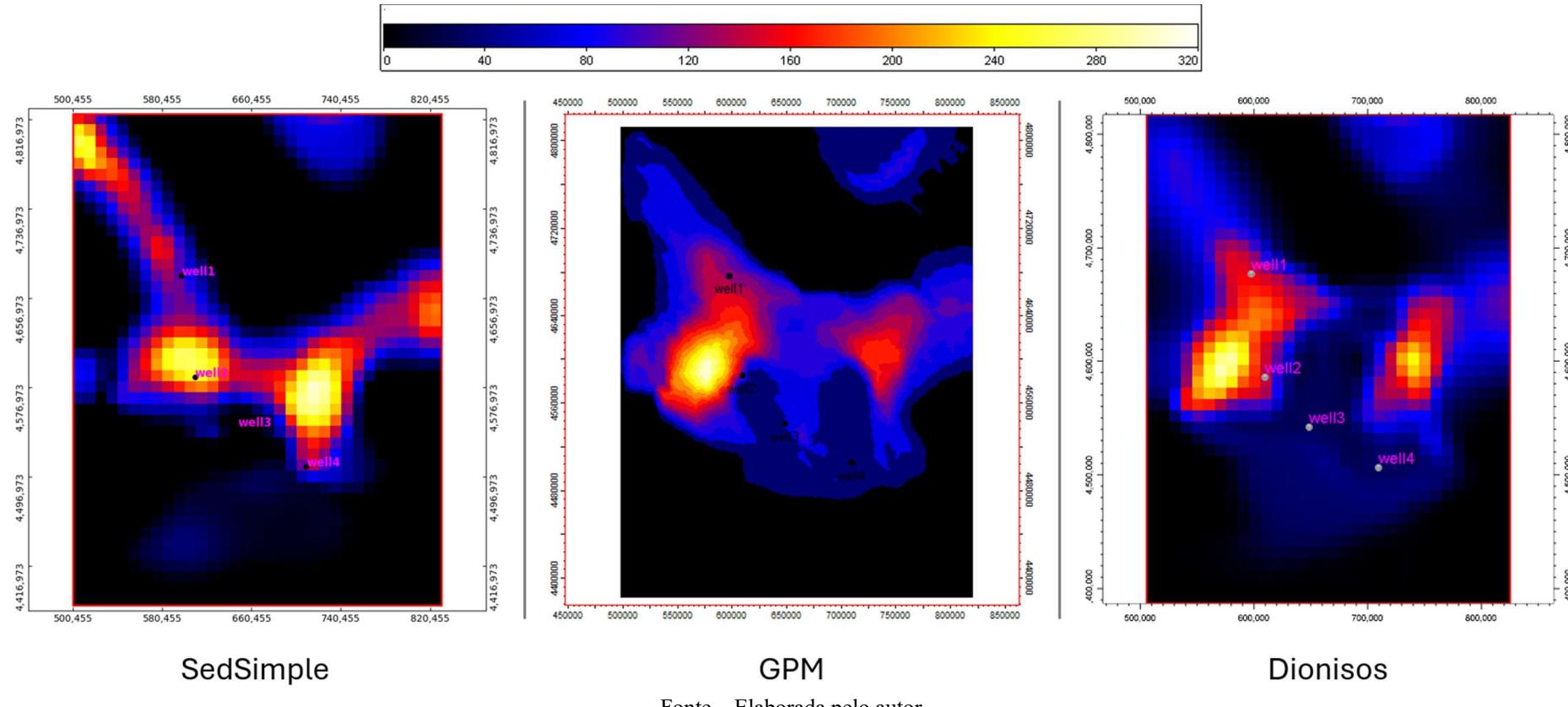
No caso do *mudstone*, os três softwares apresentaram concordância quanto à sua concentração nas regiões centrais da bacia, áreas que permaneceram mais profundas ao longo da simulação devido ao padrão de subsidência tectônica imposto. Esse comportamento está em acordo com as restrições estabelecidas para o crescimento desse tipo de carbonato, que exige condições batimétricas mais profundas. Portanto, a distribuição do *mudstone* reforça a consistência dos três modelos em representar adequadamente os controles batimétricos sobre a produção carbonática.

### 5.3 ESPESSURA TOTAL

Os mapas médios de espessura dos depósitos simulados, Figura 11, revelaram uma consistência geral entre os três softwares quanto ao padrão de preenchimento da bacia ao longo do intervalo de tempo modelado. Todos os softwares conseguiram reproduzir a tendência regional de espessuras maiores nas áreas mais profundas da bacia e menores nas bordas, em conformidade com o espaço de acomodação definido pela subsidência tectônica e pelas restrições topográficas iniciais.

Dentre os três simuladores, os modelos gerados com o *GPM®* e o *DionisosFlow®* apresentaram padrões semelhantes. Ambos conseguiram representar uma alta espessura acumulada nas regiões dos poços 1 e 2, localizadas na *Bridger Basin*, à oeste do alto *Rock Springs*, ao mesmo tempo que também simularam uma menor espessura nas regiões dos poços 3 e 4, situadas na *Washakie Basin*, à leste do alto *Rock Springs*.

Figura 11 - Mapas médio de espessura total para cada simulador. A escala de cor representa a espessura em metros.



Esses resultados indicam que tanto o *GPM®* quanto o *DionisosFlow®* foram capazes de transportar sedimentos de forma eficaz para todo o domínio do modelo, preenchendo adequadamente as sub-bacias segundo os padrões esperados do modelo conceitual. A coerência espacial das espessuras obtidas nos poços entre as simulações e sua relação com os controles estruturais reforçam a capacidade desses dois softwares de simular o equilíbrio entre aporte sedimentar e subsidênciaria de forma robusta.

Por outro lado, o modelo gerado com o *SedSimple* apresentou diferenças significativas em relação aos demais. A espessura total foi mais concentrada nas regiões próximas às fontes sedimentares, especialmente nas fontes 1 e 2, onde ocorreu um acúmulo excessivo de sedimentos siliciclásticos. Essa concentração pode ser atribuída à limitação do software em transportar sedimentos para regiões mais distantes, o que resultou em uma deposição localizada próxima aos pontos de entrada e uma menor contribuição nas áreas mais distantes.

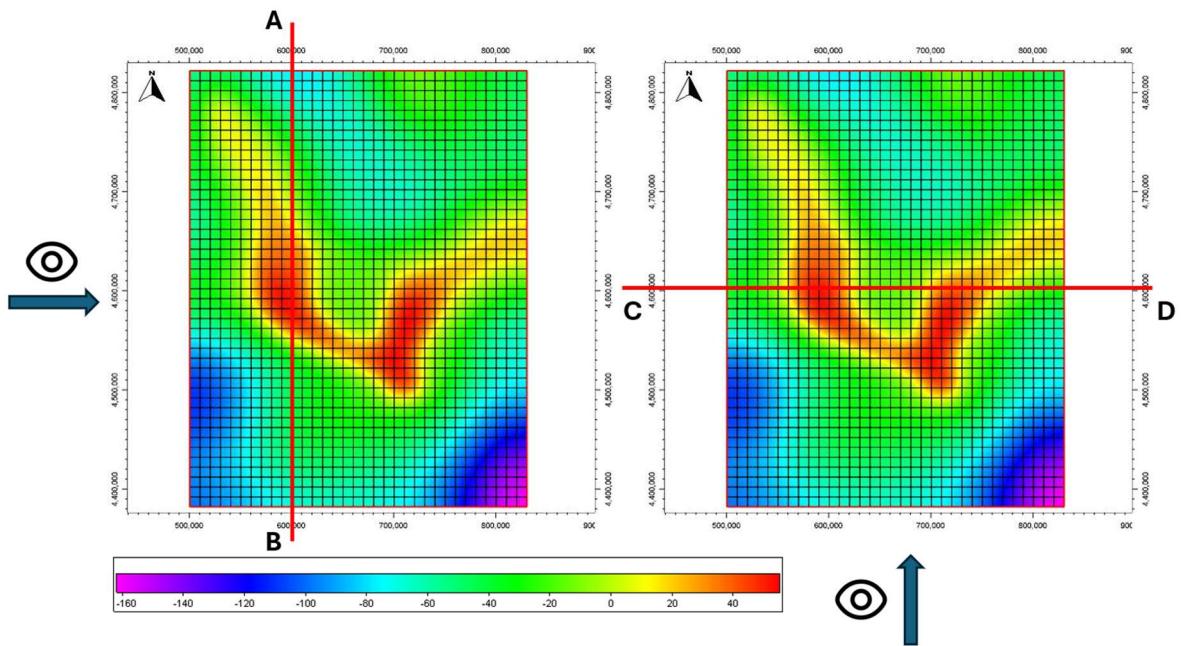
Apesar dessas limitações no transporte, o *SedSimple* apresentou espessuras expressivas nas regiões dos poços 2 e 4, resultado direto da produção de carbonatos nessas áreas. A simulação indicou crescimento significativo de *limestone* e *mudstone* nessa região, como visto nas seções anteriores, que contribuíram de forma relevante para a espessura final nesses pontos, mesmo na ausência de grandes volumes de sedimentos clásticos.

Esses resultados reforçam a importância da modelagem de forma acoplada da interação entre transporte, produção e acomodação na definição da espessura dos depósitos simulados, e evidenciam como diferentes estratégias de modelagem numéricas adotadas pelos softwares impactam diretamente no resultado do comportamento deposicional dos modelos *Forward*.

#### 5.4 SEÇÕES TRANSVERSAIS

A análise das seções transversais extraídas dos modelos, nas configurações apresentadas e definidas na Figura 12, permitiu uma avaliação mais detalhada da arquitetura estratigráfica resultantes das simulações, oferecendo uma visão da distribuição vertical e lateral dos sedimentos e da evolução das fácies ao longo do tempo geológico. As seções utilizadas seguiram um corte oeste-leste (seção CD) – que atravessa as duas principais sub-bacias do modelo (*Bridger Basin* e *Washakie Basin*) –, e outra com um corte norte-sul (seção AB), permitindo assim observar como os diferentes tipos de sedimentos se organizaram em resposta à interação entre transporte, produção, acomodação e nível do lago.

Figura 12 - Mapa de batimetria apresentando as seções transversais escolhidas para realização das análises. Seção AB com um corte vertical no modelo no sentido norte-sul, e seção CD com um corte horizontal no sentido oeste-leste.



Fonte – Elaborado pelo autor.

#### 5.4.1 SEÇÃO OESTE-LESTE

Nos três softwares analisados, a produção de *limestone*, Figura 13, foi observada, de forma geral, nas bordas da bacia, em regiões mais rasas no decorrer do tempo de simulação, em conformidade com as restrições ambientais de profundidade impostas ao crescimento desse carbonato. No modelo gerado pelo *GPM®*, esse comportamento foi particularmente evidente, com o *limestone* crescendo nas porções superiores da seção — especialmente em zonas próximas às margens — e em camadas mais antigas no alto da região de *Rock Springs*, que, à época, ainda apresentavam profundidades reduzidas.

O *DionisosFlow®* e o *SedSimple* também reproduziram esse comportamento de forma geral. No entanto, no *DionisosFlow®*, não foi identificado crescimento de *limestone* nas bordas extremas das bacias, próximo às fontes de sedimentos, sugerindo uma possível limitação na produção carbonática nessas áreas específicas. No caso do *SedSimple*, embora a visualização da seção tenha sido menos clara, o padrão observado é semelhante: crescimento restrito às regiões rasas e presença significativa nas bordas.

Uma diferença marcante observada no *SedSimple* foi a presença de *limestone* em regiões mais profundas da bacia, o que não era esperado dentro das restrições estabelecidas para esse tipo de sedimento e também para os demais. Essa ocorrência pode ser atribuída à baixa deposição de sedimentos siliciclásticos nessas áreas, resultado das limitações do software no transporte desses materiais. Com menor ocupação do espaço deposicional, houve a possibilidade de crescimento carbonático nessas regiões, que consequentemente sofreram com o processo tectônico ao decorrer da simulação fazendo com que *limestone* fosse depositado nessas regiões.

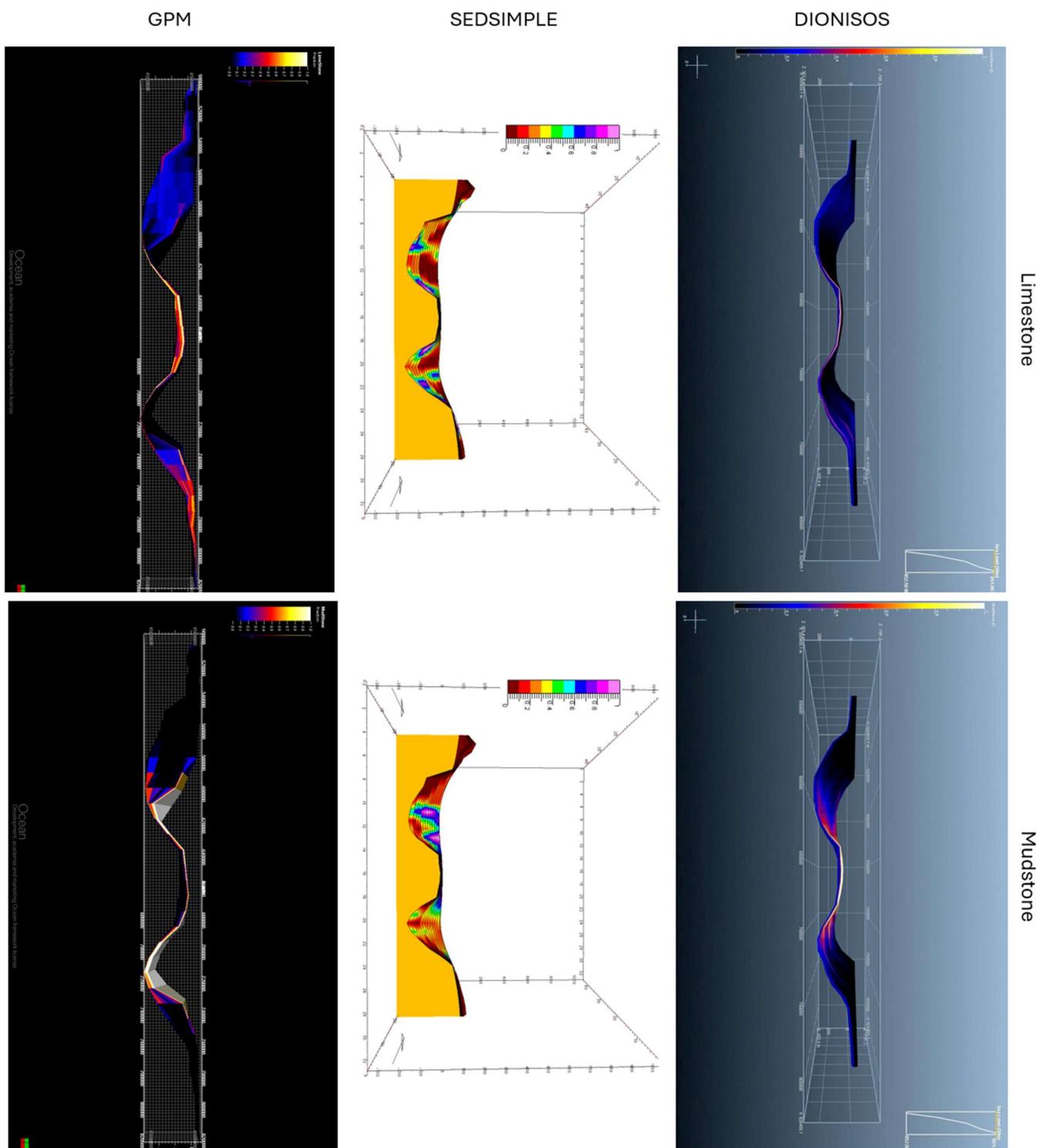
Quanto ao *mudstone*, Figura 13, o comportamento foi consistente entre os três softwares. Esse tipo de sedimento carbonático foi depositado principalmente nas camadas mais recentes e centrais da seção, refletindo o efeito progressivo da subsidência na porção interna da bacia, que criou as condições necessárias de profundidade para o seu crescimento. Esse padrão está de acordo com as restrições batimétricas impostas e reforça a capacidade dos modelos de representar corretamente o papel da acomodação na evolução das fácies carbonáticas.

Em relação aos sedimentos siliciclásticos, Figura 14, foram observadas diferenças mais marcantes e significativas. No modelo do *GPM®*, *sandstone* foi depositado majoritariamente nas porções mais elevadas da seção, tanto à esquerda (*Bridger Basin*) quanto à direita (*Washakie Basin*), comportamento esperado devido ao maior tamanho de grão e à elevação do nível do lago, que restringiu seu avanço para o interior da bacia. Por outro lado, o *lutite*, foi transportado com maior eficiência, alcançando camadas mais profundas da seção, compatível com sua maior transportabilidade.

No *SedSimple*, o comportamento da areia foi semelhante — permanecendo nas porções mais elevadas, próximas às fontes — o que está de acordo com o esperado. No entanto, observou-se que o sedimento mais fino, *lutite*, não foi transportado pela fonte 3, comprometendo a formação de fácies progradacionais nessa porção da seção.

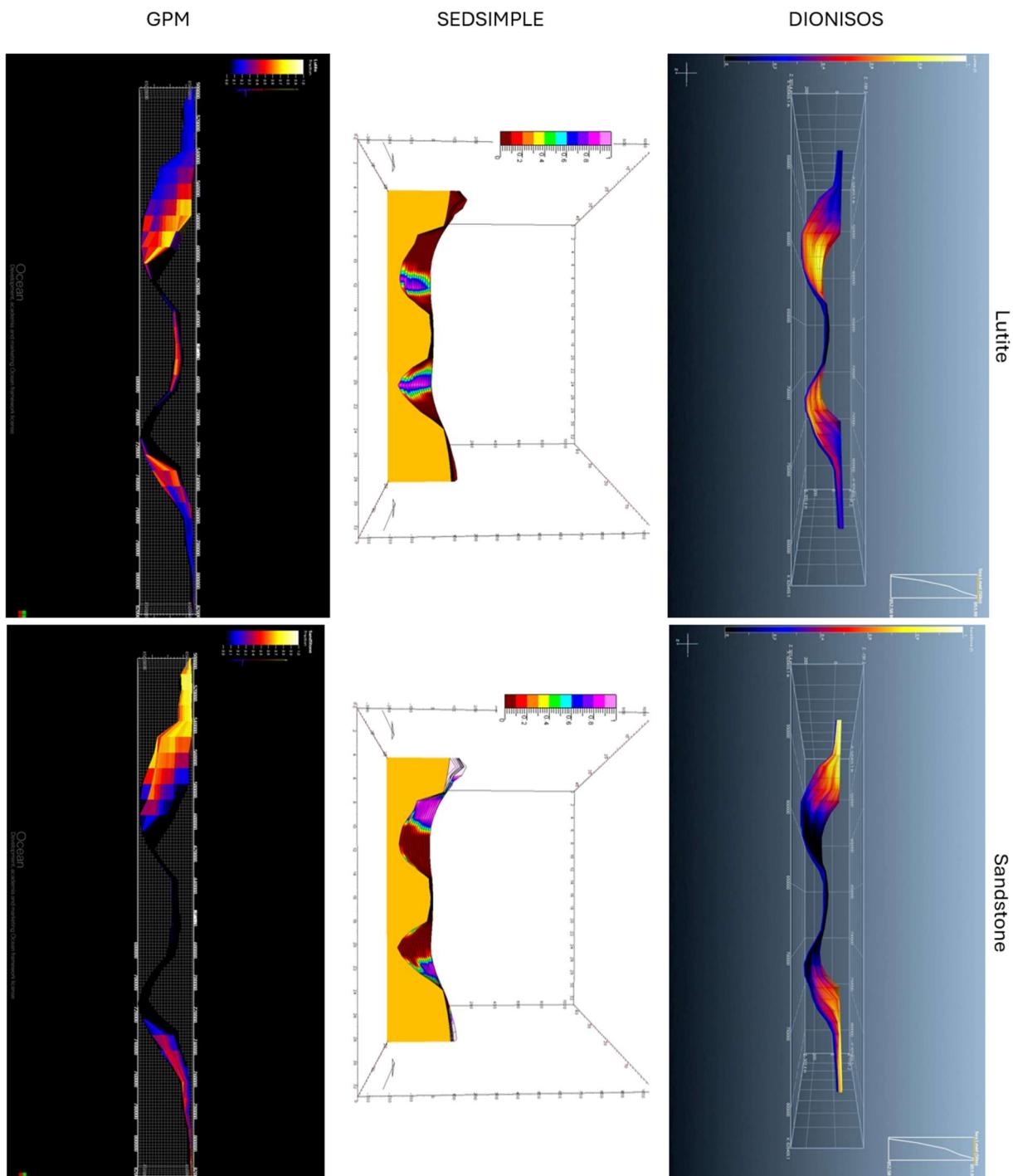
O *DionisosFlow®*, por sua vez, apresentou um desempenho equilibrado, conseguindo representar corretamente o transporte do *lutite* até as regiões mais profundas, enquanto manteve a deposição da areia nas zonas de menor profundidade, refletindo fielmente os controles granulométricos e hidrodinâmicos impostos no modelo conceitual.

Figura 13 - Seção transversal CD, com vista para o norte da bacia. Proporção de carbonato no modelo para os três diferentes softwares. Apenas *Dionisos Flow®* e *GPM®* possuem a mesma escala vertical, e todos divergem na escala horizontal. As cores representam a proporção de sedimentos no modelo.



Fonte – Elaborada pelo autor.

Figura 14 - Seção transversal CD com vista para o norte da bacia. Aperte de siliciclástos no modelo para os três diferentes softwares. Apenas *DionisosFlow®* e *GPM®* possuem a mesma escala vertical, e todos divergem na escala horizontal. As cores representam a proporção de sedimentos no modelo.



Fonte – Elaborado pelo autor.

#### 5.4.2 SEÇÕES NORTE-SUL

A segunda seção transversal analisada corresponde a um corte com orientação norte-sul – AB, atravessando o domínio modelado de forma perpendicular à primeira seção – CD. Essa perspectiva permite avaliar a variação longitudinal da arquitetura estratigráfica e observar a evolução da distribuição de fácies em relação ao eixo do sistema deposicional.

Na Figura 15, no modelo gerado com o *DionisosFlow®*, observou-se um acúmulo mais expressivo de *sandstone*, próximo à fonte 1, localizada na porção norte da seção, com progressão parcial em direção ao centro da bacia. Já o *lutite* foi transportado mais eficientemente, alcançando camadas mais profundas e internas da bacia, o que está em conformidade com a maior transportabilidade desses sedimentos de grão mais fino. Esse padrão reflete adequadamente os controles granulométricos esperados, reforçando a robustez do *DionisosFlow®* na simulação dos processos de transporte diferenciados por tipo de sedimento.

O modelo do *GPM®* apresentou comportamento semelhante, com concentração de *sandstone* na porção norte, próxima à fonte 1. Entretanto, houve um transporte mais prolongado da areia em direção ao centro da bacia, fazendo com que ela aparecesse em proporções maiores mesmo nas regiões mais profundas da seção. Esse comportamento, embora ainda fisicamente plausível, contraria parcialmente a expectativa inicial de limitação do avanço da areia devido ao seu maior tamanho de grão. Consequentemente, o *lutite*, no *GPM®*, foi depositado principalmente em camadas mais rasas ou intermediárias, ao invés de se concentrar nas regiões mais profundas, como era esperado. Esse resultado pode refletir uma diferença no algoritmo de transporte do *GPM®*, favorecendo o avanço da fração arenosa em detrimento da lamosa em determinados contextos.

No caso do *SedSimple*, os resultados indicaram ausência significativa de areia na porção norte, próxima à fonte 1. Esse comportamento se alinha ao padrão já discutido anteriormente, em que o *SedSimple* apresentou limitações na capacidade de transporte de sedimentos a partir das fontes, resultando no acúmulo dos materiais mais grosseiros diretamente nas zonas de entrada. Por outro lado, observou-se uma proporção elevada de *sandstone* na porção sul da seção, nas proximidades da fonte 3. Isso, no entanto, não reflete um transporte eficiente de areia, mas sim a falta de transporte de *lutite* por essa mesma fonte, o que impediu a diluição da fração arenosa e resultou em sua predominância naquela região.

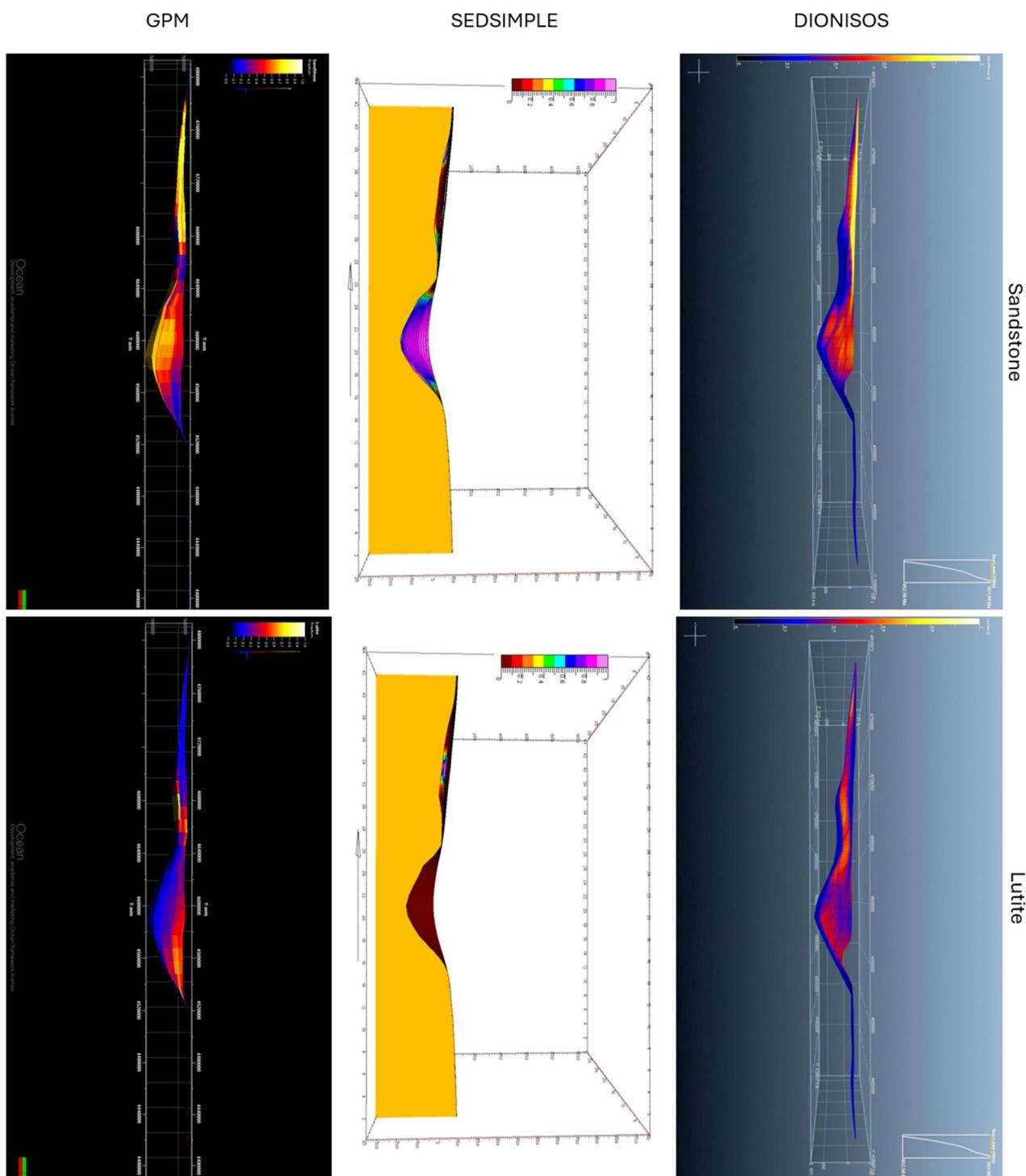
Outro ponto de destaque no modelo do *SedSimple* é a presença considerável de *limestone*, Figura 16, na região ao sul, próxima à fonte 3. Essa ocorrência, embora não seja incompatível

com o modelo conceitual, é interpretada como um efeito indireto da escassez de sedimentos siliciclásticos. A baixa concentração de materiais clásticos, consequência direta dos problemas de transporte do software, gerou espaço deposicional livre, favorecendo o crescimento de carbonatos em uma região que, sob outras condições, poderia ter sido ocupada por fácies siliciclásticas.

Essa seção norte-sul reforça, portanto, os padrões já identificados nas análises anteriores, evidenciando a eficiência diferenciada entre os softwares na representação do transporte sedimentar, e destacando como essas diferenças impactam diretamente a organização interna da bacia e a arquitetura final dos depósitos.

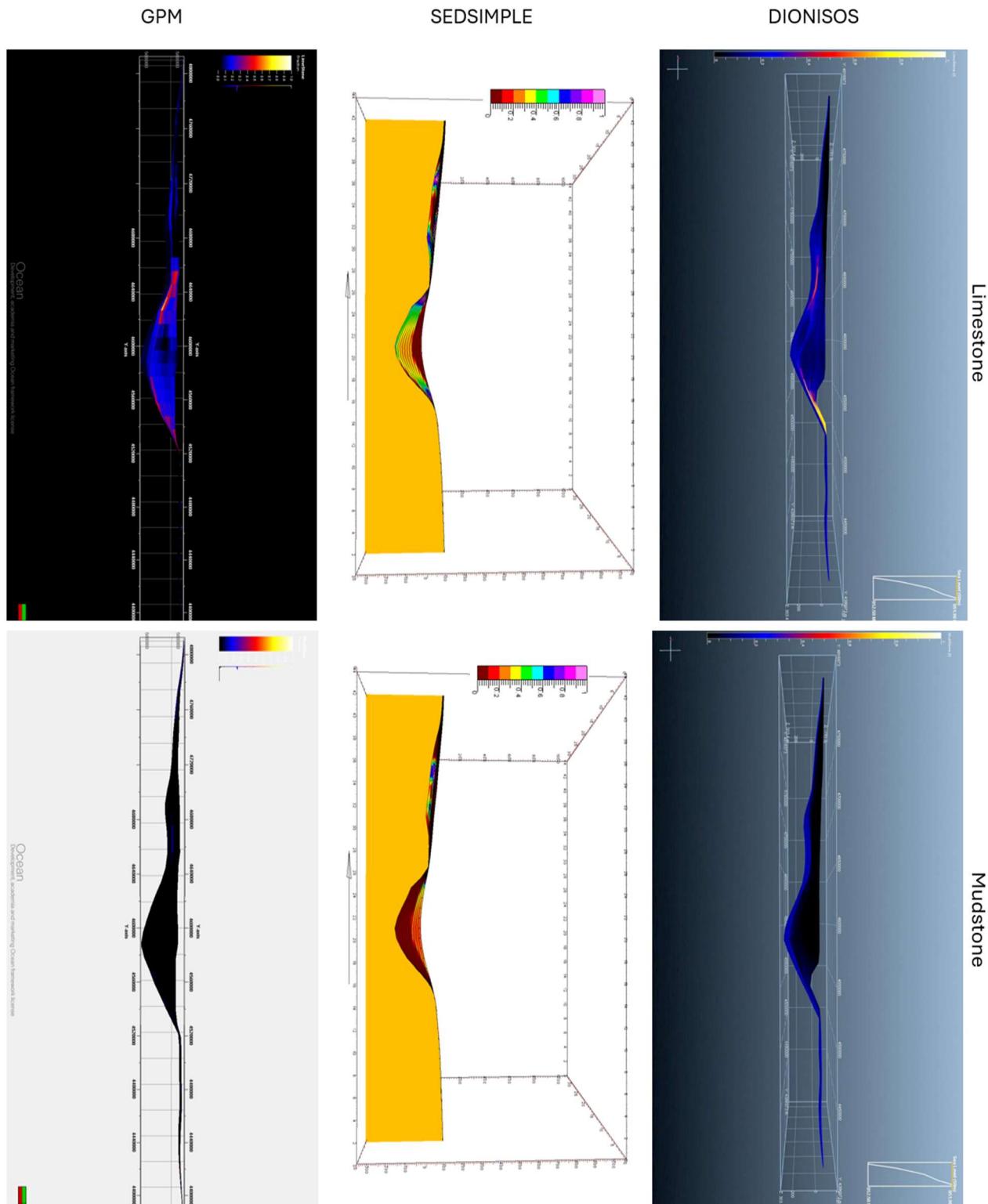
De forma geral, as seções transversais confirmam que os três softwares foram capazes de reproduzir, com diferentes níveis de fidelidade, os principais padrões estratigráficos esperados, especialmente no que se refere ao controle combinado da subsidência, nível do lago e transporte sedimentar sobre a distribuição e empilhamento das fácies

Figura 15 - Seção transversal AB com vista para o oeste da bacia. Aperte de siliciclástos no modelo para os três diferentes softwares. Apenas *DionisosFlow®* e *GPM®* possuem a mesma escala vertical, e todos divergem na escala horizontal. As cores representam a proporção de sedimentos no modelo.



Fonte – Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Seção transversal AB com vista para o oeste da bacia. Produção de carbonato no modelo para os três diferentes softwares. Apenas *DionisosFlow®* e *GPM®* possuem a mesma escala vertical, e todos divergem na escala horizontal. As cores representam a proporção de sedimentos no modelo.



Fonte – Elaborado pelo autor.

## 6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Após realizar o estudo sobre os processos físicos e geológicos modelados pelos softwares e como cada um deles tenta reproduzir e simular esses processos, foi realizada a parametrização do modelo conceitual do estudo de caso, a bacia *Greater Green River Basin*, e as simulações nos diferentes ambientes operacionais. Os resultados demonstraram que apesar de partirem de uma mesma base conceitual e paramétrica, cada simulador apresentou comportamentos próprios, vantagens e limitações específicas na forma de tratar os processos sedimentares.

De maneira geral, os três softwares foram capazes de reproduzir os principais processos estudados, o aporte de sedimentos siliciclásticos, com deposição de *sandstone* nas regiões próximas à linha de costa e de *lutite* em direção ao fundo das bacias, a produção de carbonatos, ocorrendo *limestone* nas porções mais rasas e *mudstone* em profundidade, e o processo de geração de espaço de acomodação.

O *DionisosFlow®* se destacou, conseguindo representar melhor a arquitetura estratigráfica esperada, tanto lateral quanto verticalmente, controlando bem os processos de transporte granulométrico e alocação espacial dos sedimentos. As seções transversais geradas por esse software evidenciam resultados compatíveis com os padrões esperados, com *sandstone* limitados ao nível do lago e *lutite* alcançando regiões mais profundas, muitas vezes com geometrias progradantes para o interior da bacia, como esperado para lagos em condição *overfilled*.

O *GPM®*, embora tenha exigido ajustes na velocidade do fluxo para obter um comportamento adequado de transporte sedimentar, também apresentou bom desempenho nesse quesito, mesmo que com algumas diferenças pontuais observadas, como o transporte de *sandstone* além do esperado, alcançando regiões mais profundas.

Já o *SedSimple*, apresentou dificuldades significativas no transporte de sedimentos, exigindo ajustes manuais na concentração das frações sedimentares para viabilizar resultados razoáveis. Porém, mesmo com ajustes, ainda apresentou acúmulo exagerado de sedimentos nas regiões próximas às fontes, o que resultou um impacto negativo na reprodução da arquitetura estratigráfica esperada.

As diferenças entre os softwares não se limitam ao comportamento geológico representado, mas envolvem principalmente a forma como cada ferramenta aborda e modela os processos físicos e geológicos. Isso inclui as escolhas dos modelos matemáticos — como equações de transporte sedimentar baseadas em difusão ou nas equações de águas rasas (*shallow water*) —

e os métodos numéricos utilizados para resolver essas equações. Além disso, aspectos como a forma de entrada de dados, unidades adotadas, e as limitações na visualização e extração de resultados também impactam significativamente a experiência do usuário e a interpretação dos *outputs*. Esses fatores tornam a comparação entre os softwares um desafio, exigindo uma análise criteriosa de suas bases teóricas e operacionais.

Embora os três simuladores tenham demonstrado potencial para representar os principais aspectos de um modelo estratigráfico *Forward*, o nível de controle sobre os parâmetros físicos, geológicos e a robustez da modelagem do sistema de transporte sedimentar variam significativamente entre eles. Essas conclusões reforçam a importância de uma parametrização bem estruturada, combinada a uma compreensão aprofundada das ferramentas utilizadas, como base para extrair o melhor potencial de cada simulador e garantir modelos que conduzam a interpretações geologicamente coerentes. Além disso, observa-se a importância da aplicação de metodologias de calibração de modelos a partir de dados reais disponíveis, como dados de poços, dados sísmicos e mapas regionalizados, afim de conferir melhores resultados mais adequados ao problema modelado, podendo ser utilizados como estratégia para lidar com problemas e limitações de cada software.

Como perspectiva de trabalhos futuros, observa-se a importância na compreensão aprofundada dos modelos matemáticos e dos métodos numéricos empregados por cada software, investigando como cada ferramenta formula e resolve os processos de transporte e deposição é extremamente importante na interpretação crítica dos resultados gerados.

Além disso, a compreensão de possíveis limitações de cada solução numérica aplicada internamente – como diferenças no esquema de discretização, estabilidade, resolução temporal e espacial – podem orientar tanto a escolha da ferramenta mais adequada como o desenvolvimento de melhorias para o simulador.

## REFERÊNCIAS

- BOHACS, K.; CARROLL, A.; NEAL, J. Lake-Basin Type, Source Potential, and Hydrocarbon Character: An Integrated Sequence-Stratigraphic-Geochemical Framework. **Lake Basins through Space and Time. AAPG Studies in Geology**, v. 46, p. 3–34, 1 jan. 2000.
- BURGESS, P. M. et al. Multivariate sequence stratigraphy: Tackling complexity and uncertainty with stratigraphic forward modeling, multiple scenarios, and conditional frequency maps. **AAPG Bulletin**, v. 90, n. 12, p. 1883–1901, dez. 2006.
- CARROLL, A. R.; CHETEL, L. M.; SMITH, M. E. Feast to famine: Sediment supply control on Laramide basin fill. **Geology**, v. 34, n. 3, p. 197, 2006.
- D. GRANJEON; JOSEPH, P. Concepts and Applications of A 3-D Multiple Lithology, Diffusive Model in Stratigraphic Modeling. **SEPM (Society for Sedimentary Geology) eBooks**, 1 jan. 1999.
- DIDIER GRANJEON. Use of high-performance stratigraphic forward modelling to improve siliciclastic and carbonate reservoir depositional architecture description. **Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology**, v. 84, n. 1, p. 59–70, 15 fev. 2019.
- DUCROS, M. et al. A new objective function designed for the calibration of stratigraphic forward models. **Marine and Petroleum Geology**, v. 154, p. 106306, ago. 2023.
- HAWIE, N. et al. Statistical analysis of forward stratigraphic models in complex salt provinces: The central Scotian Basin case study. **AAPG Bulletin**, v. 103, n. 2, p. 433–467, fev. 2019.
- HUANG, X.; GRIFFITHS, C. M.; LIU, J. Recent development in stratigraphic forward modelling and its application in petroleum exploration. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 62, n. 8, p. 903–919, 17 nov. 2015.
- LANE, E. W. The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering. [s.l.] **American Society of Civil Engineering**, 1955.
- L. L. SLOSS (2). Stratigraphic models in exploration. **Journal of sedimentary research**, v. 32, 1962.
- OTOO, D.; HODGETTS, D. Porosity and permeability prediction through forward stratigraphic simulations using GPM<sup>TM</sup> and Petrel<sup>TM</sup>: application in shallow marine depositional settings. **Geoscientific Model Development**, v. 14, n. 4, p. 2075–2095, 22 abr. 2021.
- SCHWARZACHER, W. Sedimentation in Subsiding Basins. **Nature**, v. 210, n. 5043, p. 1349–1350, jun. 1966.
- SMITH, M. E.; CARROLL, A. R.; SINGER, B. S. Synoptic reconstruction of a major ancient lake system: Eocene Green River Formation, western United States. **Geological Society of America Bulletin**, v. 120, n. 1-2, p. 54–84, 1 jan. 2008.

TETZLAFF, D. et al. Geologic Process Modeling. **ResearchGate**, 2014.

TETZLAFF, D. **Stratigraphic forward modeling software package for research and education**. 2023. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2302.05272>>. Acesso em: 23 jul. 2024.