

### 3

## Modelagem direta de sistemas carbonáticos

Uma revisão foi feita analisando diversos exemplos de modelagem direta de sistemas carbonáticos para estudar possíveis implementações de simulação numérica de deposição carbonática. Estes modelos trabalham em uma, duas ou três dimensões, sendo que a simulação tem focado em modelos 2 D pois são mais rápidos mas modelos 3 D sempre existiram. Porém com os avanços em computação eficiente, velocidade computacional e memória, os modelos 3 D estão ganhando força por apresentarem resultados mais confiáveis. Curiosamente, um dos primeiros simuladores de produção carbonática desenvolvido por Harbaugh e Bonham-Carter (1970) trabalhava em um ambiente tridimensional e apresentava cortes transversais e visualização tridimensional das superfícies topográficas criadas. Após isso, porém, a maioria dos modelos era gerada em ambientes uni e bidimensionais, voltando com o 3 D somente no final da década de 1980.

### 3.1.

#### Simulação unidimensional de depósitos carbonáticos

Muitos modelos de sistemas carbonáticos tinham interesse em estudar a ciclicidade das deposições carbonáticas devido a pequenas mudanças no nível relativo do mar (Turcotte e Willemann, 1983; Cisne *et al.*, 1984; Read *et al.*, 1986; Goldhammer *et al.*, 1987; Watney *et al.*, 1991). Como esses modelos estavam principalmente preocupados em observar como as mudanças de nível do mar eustático podem influenciar na evolução das plataformas carbonáticas, as extensões laterais não eram de muita importância e se fazia uso de algoritmos unidimensionais para simular a produção carbonática *in situ*. Erosão era levada em conta somente para ser subtraída da produção carbonática resultante e não se levava em conta o sedimento produzido. Seções verticais eram criadas a fim de comparar o efeito das mudanças do nível do mar com dados reais.

O trabalho de Turcotte e Willemann (1983) foi um dos primeiros a utilizar curvas harmônicas sobrepostas para simular a ciclicidade do nível do mar com

subsidiência constante. Um modelo unidimensional com produção e remoção de sedimentos foi desenvolvido. Para conseguir um entendimento mais quantitativo dos controles da deposição carbonática, Read *et al.* (1986) desenvolveram um simulador unidimensional (Figura 3.1.) com taxas de sedimentação carbonática que dependiam de profundidade, variações do nível do mar, fácies, subsidiência linear e ação de marés.

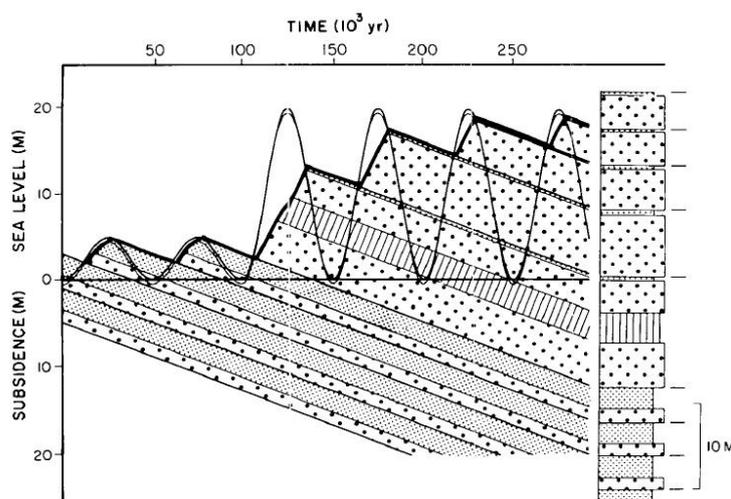


Figura 3.1. Subsidiência e variação do nível do mar, com os depósitos carbonáticos unidimensionais de Read *et al.* (1983).

Goldhammer *et al.* (1987) desenvolveram um sistema computacional chamado *Mr. Sediment* (Figura 3.2.) para testar suas hipóteses sobre ciclicidades de Milankovich em plataformas carbonáticas Triássicas das Dolomitas. Utilizando taxas de depósitos modernos e ciclicidade eustática do Pleistoceno, *Mr. Sediment* conseguiu reproduzir espessuras observadas em 1D. Watney *et al.* (1991) apresentaram um modelo unidimensional bastante parecido com o demonstrado em *Mr. Sediment*, porém com taxas de sedimentação mais complexas que decrescem em maiores profundidades e são sujeitos a fatores de restrição devido a subidas rápidas do nível do mar. Esse modelo foi utilizado para simular deposições carbonáticas na Pennsylvania utilizando taxas de crescimento atuais, curvas eustáticas do Pleistoceno e estimativas de taxas de subsidiência da Pennsylvania.

Esses modelos são suficientes para simular a ciclicidade pontual de um sistema carbonático, porém não levam em consideração a variação das taxas de

produção em relação à variação das profundidades ao longo de uma bacia a ser modelada. Muitas geometrias sedimentares presentes em plataformas carbonáticas se apresentam em formas bidimensionais e, por isso, foram iniciados trabalhos para simulação bidimensional de deposição carbonáticas.

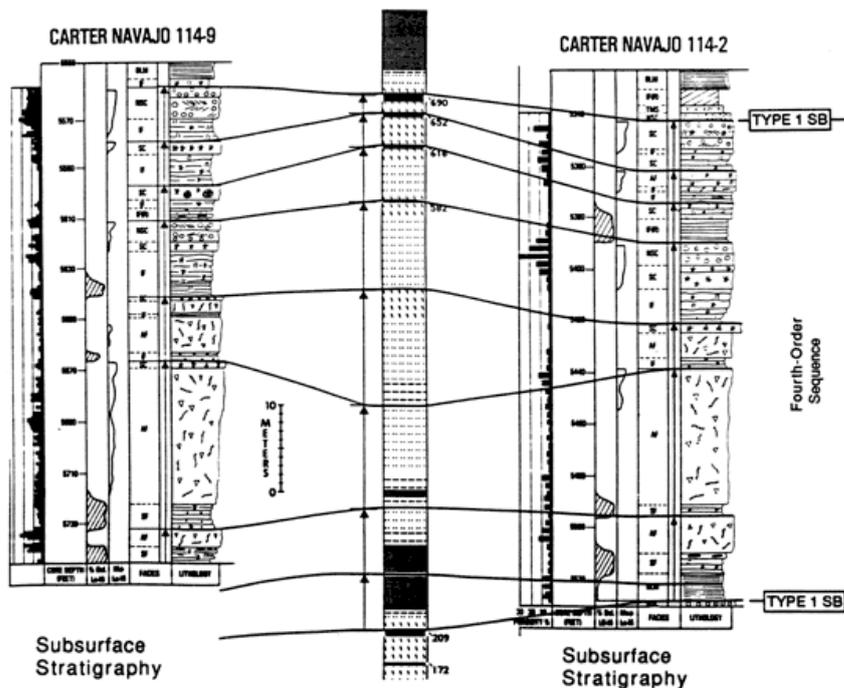


Figura 3.2. Exemplo de resultados obtidos com o programa de simulação unidimensional *Mr. Sediment* (Goldhammer *et al.*, 1987)

### 3.2. Simulação bidimensional direta de recife de corais

Como os dados de entrada para tais simulações são bastante difíceis de serem quantificados para o passado geológico, surgiram modelos que focaram simular ambientes deposicionais carbonáticos do Holoceno e Pleistoceno, pois para esses as taxas de crescimento são facilmente adquiridas e os históricos de nível do mar são bastante conhecidos (Chappel, 1980; Graus *et al.*, 1984; Paulay e McEdward, 1990; Bosscher e Schlager, 1992).

Esses trabalhos se focam somente na produção e crescimento recifes de corais com algoritmos bidimensionais, sem levar em conta processos de erosão e dispersão. As escalas de tempo são de alguns milhares de anos e as escalas espaciais de alguns quilômetros. Esses modelos estudam a variação de geometrias

carbonáticas devido às flutuações do nível do mar, à subsidência tectônica e a fatores ambientais como atenuação da luz solar com a profundidade e turbidez da água. Essas interações seriam difíceis de serem analisadas de maneira qualitativa, pois envolvem processos de longa duração. Por isso, o grande interesse por modelos computacionais.

A energia das ondas e a atenuação da energia solar através da água são os principais fatores limitantes do crescimento de recifes de corais nos trabalhos de Chappell (1980) e Graus *et al.* (1984). A variação do nível do mar é simulada no máximo até alguns milhares de anos. Chappell (1980) comparou o resultados dos recifes simulados com recifes da Nova Guiné e Graus *et al.* se concentraram na zona de recifes de Discovery Bay na Jamaica. Paulay e McEdward (1990) incorporaram erosão por meios fluviais, marinhos e subaéreos em seus modelos de recifes, porém os sedimentos erodidos são simplesmente retirados do sistema e não são redistribuídos. A descrição teórica mais completa do crescimento de corais em função da profundidade foi dada por Bosscher e Schlager (1992). As taxas de crescimento pela profundidade são derivadas a partir de funções de intensidade de luz variando com a profundidade; não há inclusão de funções de erosão e dispersão de sedimentos (Figuras 3.3. e 3.4.). Assim foi concluído, a partir de comparações dos modelos simulados com medições do campo, que o principal controle de crescimento de corais para os períodos estudados é a penetração da luz solar através da água.

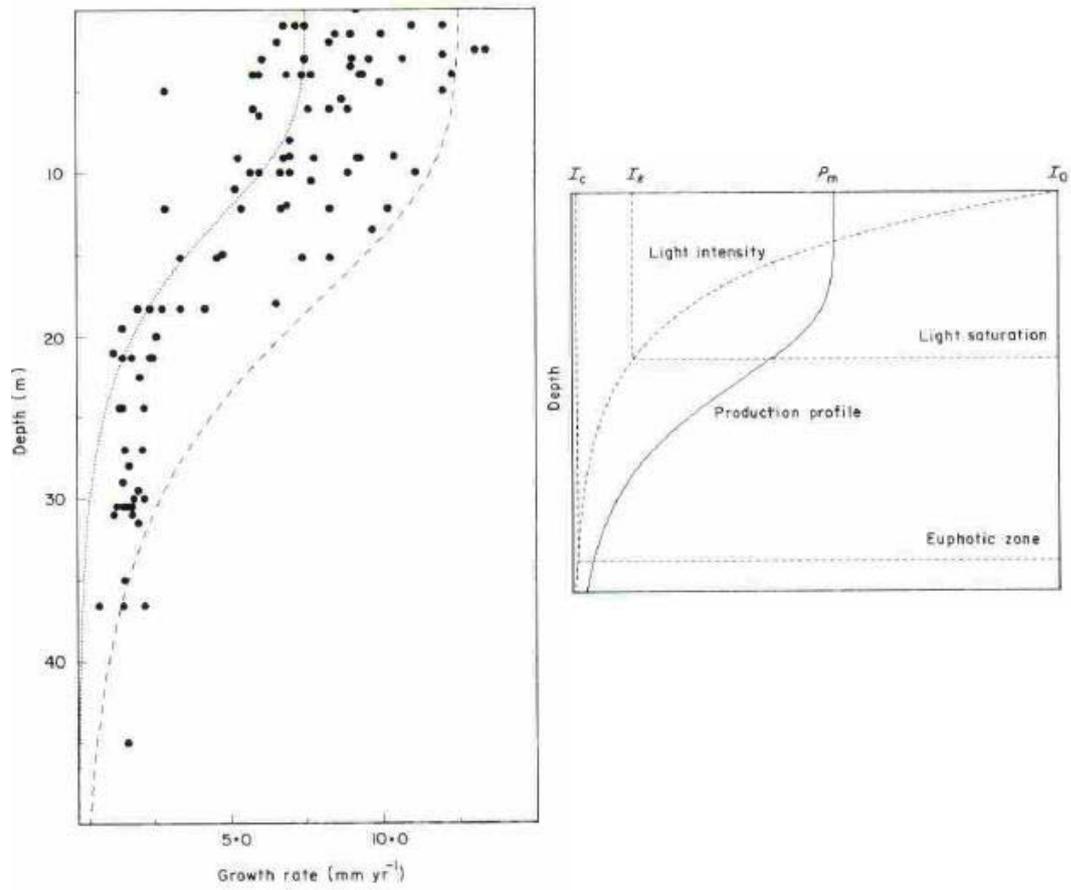


Figura 3.3. Taxas de crescimento de corais Caribenhos e curva de intensidade de luz comparada com função de crescimento de corais (Bosscher e Schlager, 1992).

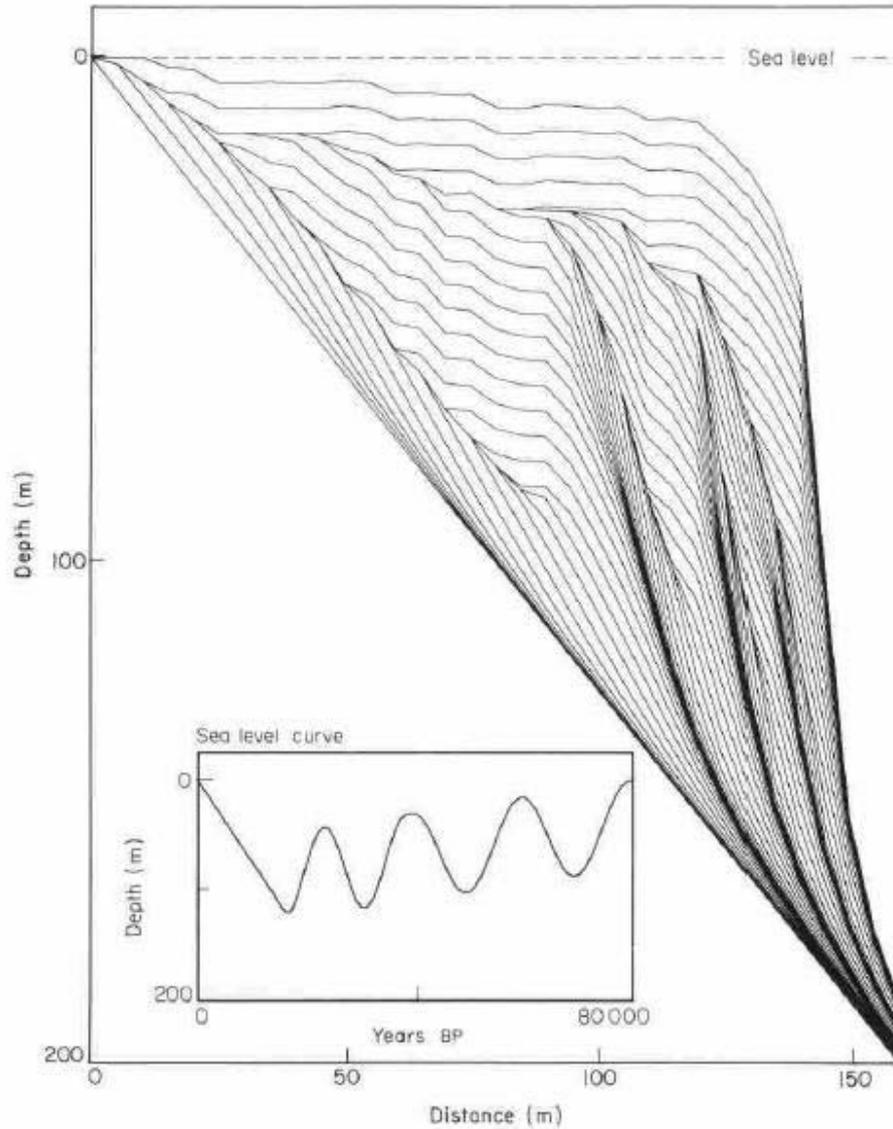


Figura 3.4. Resultados de uma simulação de crescimento de corais com a dada curva de variação de nível do mar (Bosscher e Schlager, 1992).

### 3.3. Simulação bidimensional direta de plataformas carbonáticas

Programas mais gerais para simular a formação e evolução de plataformas carbonáticas mais extensas somente começaram a aparecer no final da década de 80. Demicco e Spencer (1989), Read *et al.* 1991 e Goldhammer *et al.* (1993) simularam sedimentação carbonática em função da profundidade, flutuações do nível do mar e subsidência tectônica. Programas bidimensionais eram utilizados para tentar compreender o comportamento de plataformas carbonáticas em relação aos mecanismos controladores. Lerche *et al.* (1987), Bice (1988), Bosence e

Waltham (1990) e Bosscher e Southam (1992) desenvolveram programas para criar diversos modelos, testando uma variedade de parâmetros de entrada para investigar como as plataformas se comportavam, comparando com cenários geológicos da estratigrafia de sequências.

Dois programas similares foram desenvolvidos de maneira independente, MAPS (Figura 3.5.), de Demicco e Spencer (1989) e *Dr. Sediment* de Goldhammer *et al.* (1993). Ambos usaram a profundidade de deposição como indicador de fácies e se concentraram em ambientes rasos. Eles removeram sedimentos por erosão, que eram então redistribuídos. MAPS foi utilizado com sucesso para reproduzir fácies de uma plataforma carbonática do Cambriano, como foi mostrado em Demicco *et al.* (1991). Em Read *et al.* (1991), o programa unidimensional previamente desenvolvido foi estendido para casos bidimensionais que simula deposição dependente da profundidade com suas respectivas fácies. Nesse simulador, subsidência bacinal e flutuações do nível do mar são os principais controles e inclui erosão subaérea, mas sem redistribuição. O programa foi utilizado para simulações de milhões de anos e algumas comparações com dados do campo foram demonstradas por Koerschner e Read (1989), Osleger e Read (1991) e Erlick e Read (1991), em cujos trabalhos foram definidos os ciclos de nível do mar e investigadas as formações de ciclos carbonáticos.

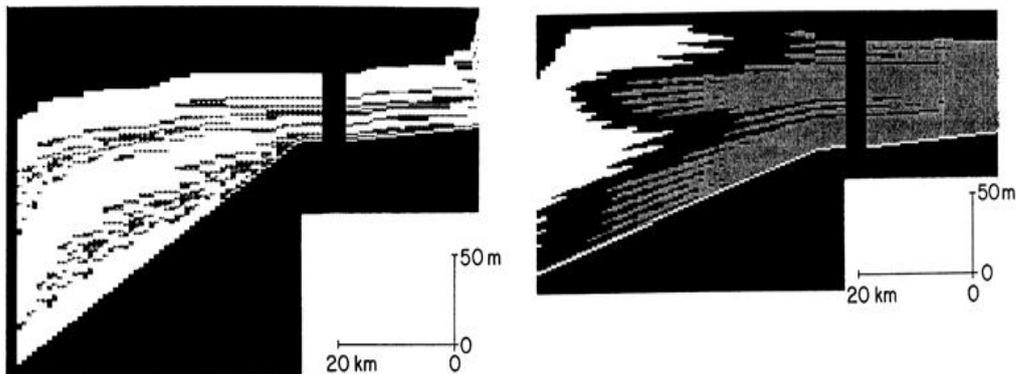


Figura 3.5. Exemplos de resultados obtidos no programa MAPS (Demicco e Spencer, 1989).

Bice (1988) foi o primeiro a incluir dispersão de sedimentos em um simulador puro de carbonatos. Com o objetivo de aproximar em grande escala o

efeito da dispersão de sedimentos, geometrias predefinidas de sedimentos redepositados são incluídas onde o crescimento *in situ* não ocupou todo o espaço deposicional disponível entre o fundo do mar e a base das ondas. CARBPLAT (Figura 3.6.) de Bosscher e Southam (1992) trabalha de maneira similar, porém os sedimentos excedentes são espalhados por cima da plataforma carbonática seguindo uma função mais sofisticada. Harris (1991) desenvolveu o programa MARGIN que encaixa de maneira puramente geométrica sedimentos erodidos.

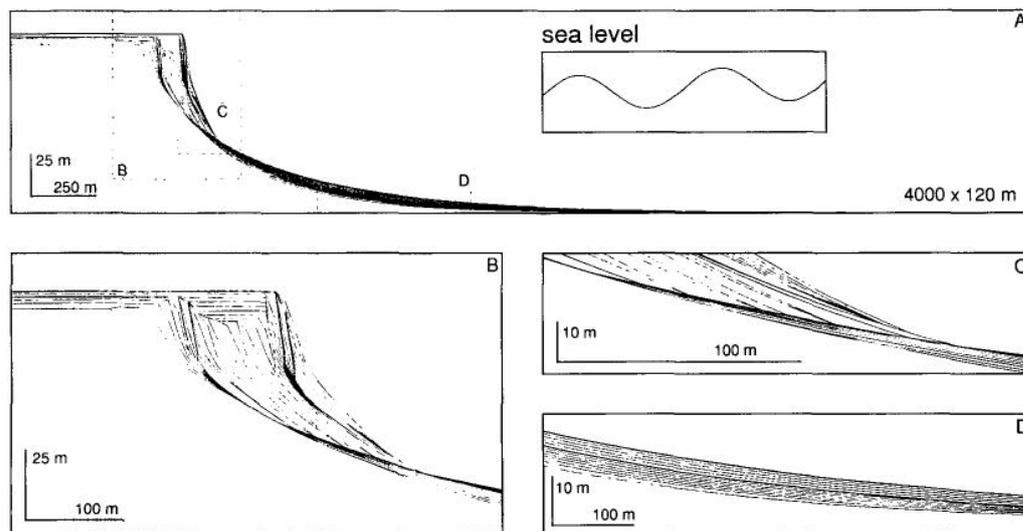


Figura 3.6. Imagens do resultado de uma simulação em CARBPLAT (Bosscher e Southam, 1992) com alguns planos aproximados.

Uma boa evolução dos simuladores de plataformas carbonáticas veio com o programa CARBONATE (Bosence e Waltham, 1990) (Figura 3.7.). Processos de transporte sedimentar, no lugar de encaixes geométricos, foram utilizados para redistribuir sedimentos soltos por erosão subaérea e subaquosa de depósitos anteriores. Nesse programa, taxas de crescimentos variam lateralmente para simular ambientes deposicionais de lagunas e margens de plataforma. As funções que determinam as taxas de deposição resultantes são definidas pelo usuário baseadas em medições no campo e não levam em conta funções da atenuação da luz e condições marinhas. Uma versão mais avançada de CARBONATE é utilizada para reproduzir depósitos do Mioceno em Mallorca (Bosence *et al.*, 1994). Um algoritmo de distribuição de sedimentos mais sofisticado foi utilizado levando em conta efeitos difusivos nos taludes. Esses algoritmos de distribuição

sedimentar são parecidos com os desenvolvidos em simuladores de sedimentação clástica.

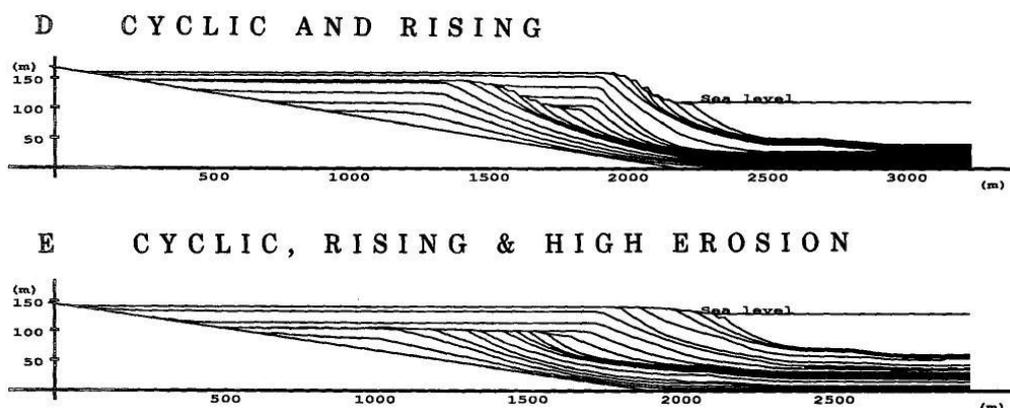


Figura 3.7. Exemplos de simulações com diferentes parâmetros de entradas modeladas em CARBONATE (Bosence e Waltham, 1990).

O SEDPAK (Kendall *et al.*, 1991) gera modelos geométricos bidimensionais e simula sedimentação em ambientes carbonáticos, siliciclásticos e mistos. Espaço de acomodação, subsidência, produção de sedimentos e mudanças de nível do mar trabalham são os principais controles utilizados no programa.

### 3.4.

#### Simulação tridimensional direta de plataformas carbonáticas

Até há algum tempo, era pouca a viabilidade de desenvolver boas ferramentas computacionais para simulação tridimensional de plataformas carbonáticas por causa das limitações em capacidade computacional. Agora a realidade é outra e já existem disponíveis alguns trabalhos sobre simulações tridimensionais de sistemas carbonáticos, apesar de na maioria dos casos os cálculos serem feitos sobre superfícies bidimensionais gerando resultados tridimensionais.

O *Carbonate Geologic Process Modeler* (GPM) (Hill, J. *et al.*, 2009) (Figura 3.8.) simula crescimento de recifes e lagunas carbonáticas em função da penetração da luz na água, ação de ondas e níveis de supersaturação carbonática. Transporte de sedimentos também foi implementado e o programa foi desenvolvido para ser aplicado em vários tipos de plataformas carbonáticas, como plataformas com borda, rampas e plataformas isoladas. Para diferenciar ambientes

de borda de ambientes internos, o GPM utiliza um algoritmo baseado na equação da onda que determina, para cada ponto na malha, o tempo de residência, que é uma aproximação do tempo que leva para a água marinha ser renovada em determinado ponto. Quanto maior o tempo de residência em um ponto, mais restrito é o ambiente onde se encontra esse ponto.

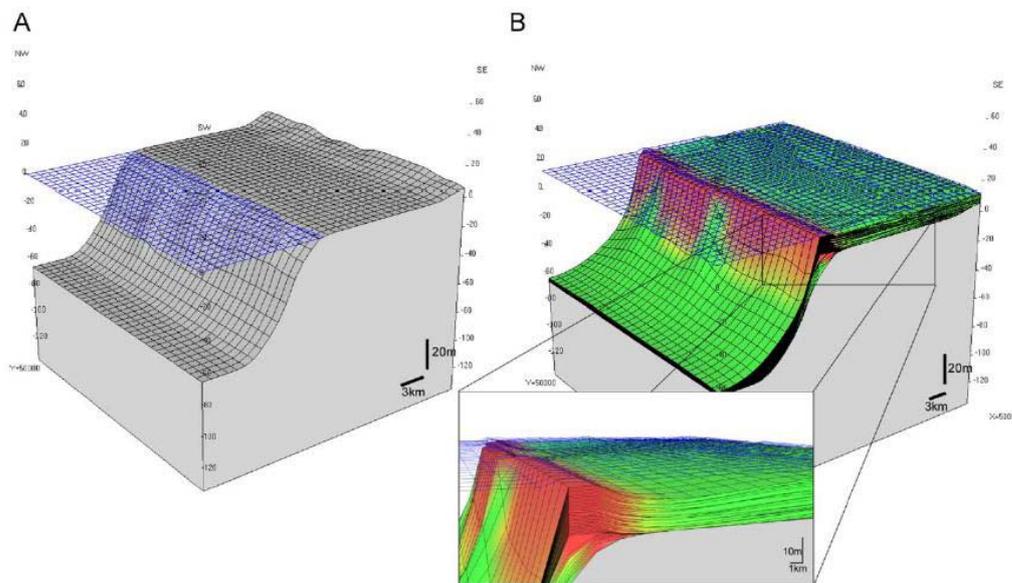


Figura 3.8. Algumas telas do programa GPM (Hill, J. *et al.*, 2009), (A) antes da simulação, (B) depois da simulação com uma área em destaque mais detalhada.

Um modelo de simulação tridimensional de produção, transporte e deposição de sedimentos carbonáticos é apresentado por Bitzer e Salas (2002) com o programa SIMSAFADIM (*SIMulation of Stratigraphic Architecture and Facies Distribution Model*) (Figura 3.9.). O modelo de transporte e deposição é baseado em fluxo potencial e inclui transporte advectivo, dispersivo e difusivo, a deposição de um sedimento depende das velocidades do fluxo, da profundidade e de velocidades de deposição. Os modelos de produção carbonática são baseados em modelos uni e bidimensionais previamente desenvolvidos em Bitzer e Salas (2001). A sedimentação carbonática é simulada considerando dinâmicas populacionais de organismos produtores seguindo modelos de predador-presa que foram inicialmente desenvolvidos por Lotka (1924) e Volterra (1931). Uma série de equações diferenciais ordinárias controla as interações entre as populações de predadores e presas que dividem o mesmo habitat, essas equações incorporam diversos processos que afetam populações dos organismos.

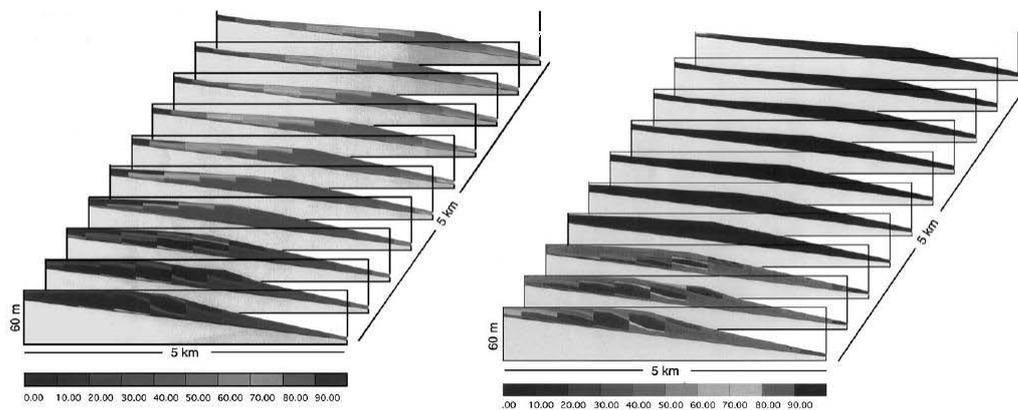


Figura 3.9. Exemplos de resultados obtidos pelo programa SIMSAFADIM (Bitzer e Salas, 2002).

Um modelo tridimensional bastante completo foi desenvolvido por Warrlich *et al.* (2002), CARBONATE 3D (Figura 3.10.), simula o desenvolvimento estratigráfico e sedimentológico de plataformas carbonáticas e ambientes mistos terrígenos-carbonáticos. O programa foca nos seguintes processos sedimentares: produção de carbonatos de águas rasas e abertas, produção de carbonatos de águas rasas e restritas, produção de carbonatos de águas profundas, entrada de sedimentos siliciclásticos finos e grossos e erosão subaquosa e subaérea e redeposição de sedimentos. CARBONATE 3D pode ser utilizado para simular vários cenários geológicos e foi capaz de recriar plataformas carbonáticas do Mioceno na bacia de Níjar, Espanha (Warrlich *et al.* 2005) (Figura 3.11.).

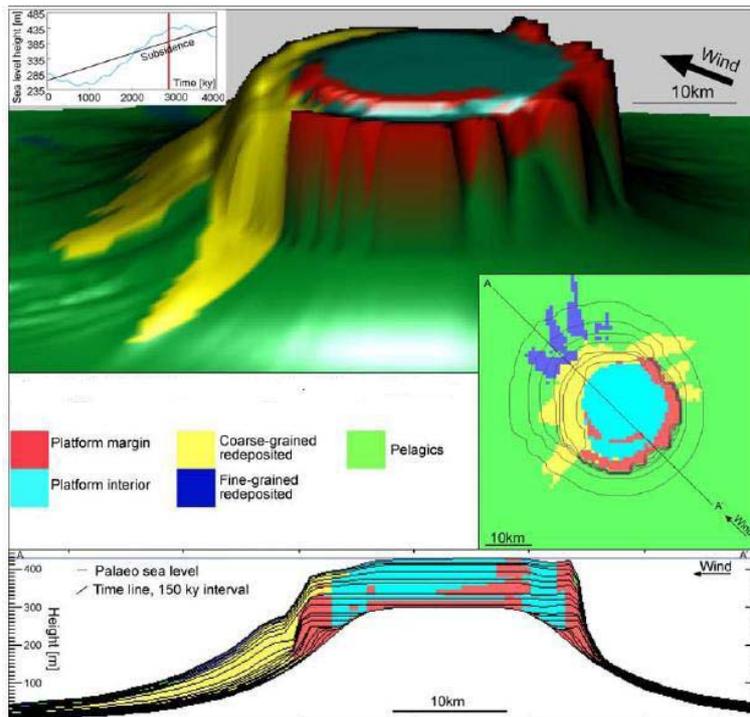


Figura 3.10. Exemplo de modelo de um atol no programa CARBONATE 3D (Warrlich *et al.*, 2002).

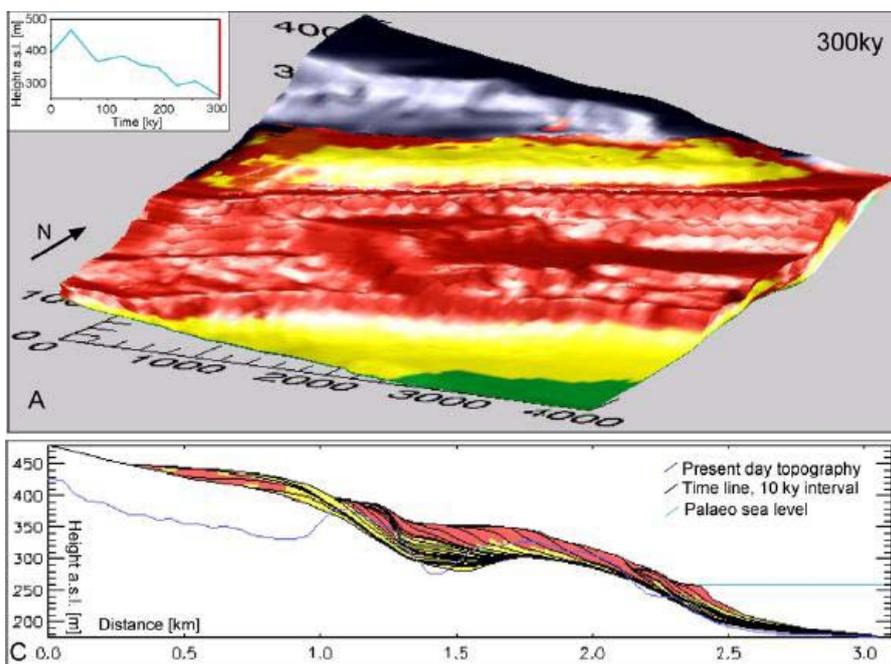


Figura 3.11. Modelagem da bacia de Nijar, Espanha, utilizando o programa CARBONATE 3D (Warrlich *et al.*, 2005).

Alguns trabalhos desenvolveram modelos de sedimentação carbonática tridimensional implementando métodos estocásticos (Burgess *et al.*, 2000) e com

elementos de lógica Fuzzy (Nordhund, 1996, 2000), outros empregaram modelos inversos (Granjeon e Joseph, 1999). Métodos estocásticos estão ficando bastante populares porque fenômenos climáticos e biológicos têm caráter aleatório; e a lógica Fuzzy ajuda bastante para uma identificação mais adequada de fácies. Esses métodos, porém, não foram estudados nesse trabalho, que se concentra em modelos diretos e determinísticos.