

Lawrence *et al.* (1990), recorreram a equações empíricas, baseadas em gradientes de superfícies e em relações com a paleobatimetria ao elaborar um simulador numérico que foi aplicado em áreas de deposição carbonática, siliciclástica e mista (Figura 1.8).

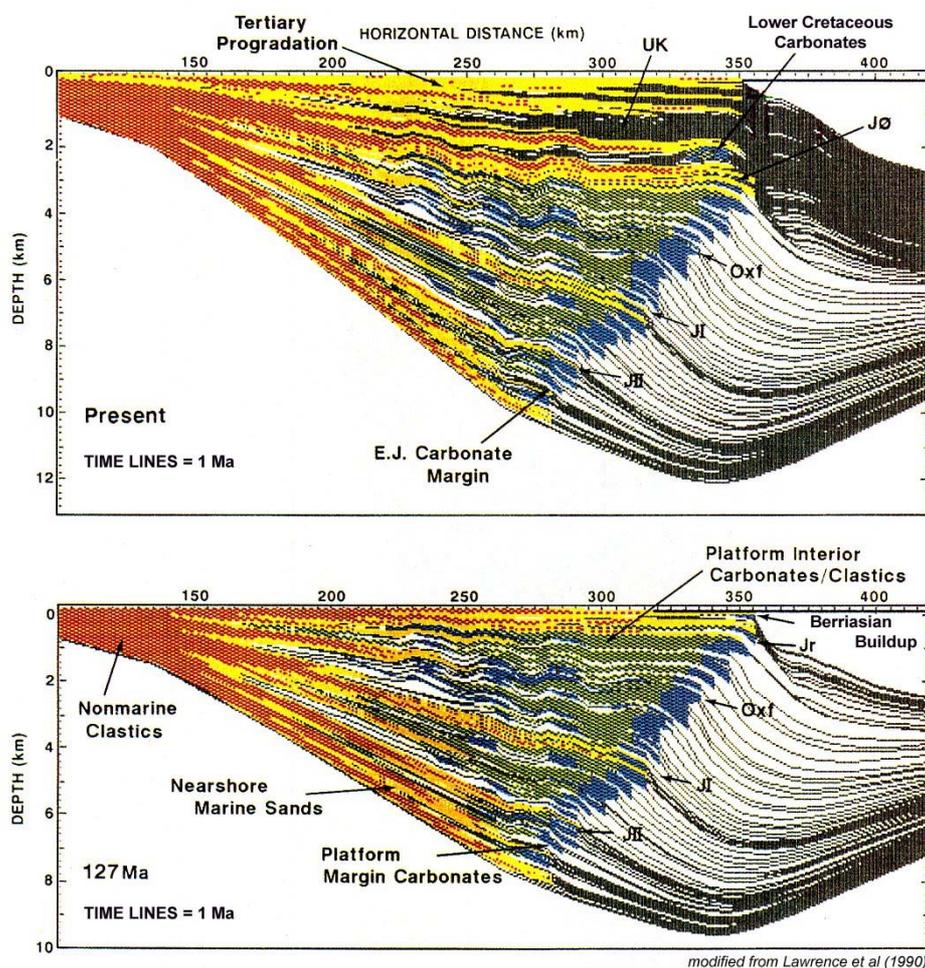


Figura 1.8 - Seções sintéticas produzidas pelo simulador de algoritmo empírico de Lawrence et al 1990.

Kaufman *et al.* (1991) e Rivenas (1992 e 1993) basearam-se na Equação da Difusão para simular ambientes de deposição mista em plataforma rasa. Os trabalhos de Swift *et al.* (1991), Thorne & Swift (1991) e Steckler (1999), utilizaram algoritmo baseado na Equação da Difusão modulada por equações da geomorfologia em ambiente predominantemente siliciclástico, porém já apresentando uma abordagem para deposição em bacia profunda (figura 1.9).

Granjeon *et al.* (1996), desenvolveram um simulador (*DIONISOS*) baseado nos algoritmos de Difusão e Advecção, objetivando principalmente ambientes deltáicos e plataformais (figura 1.10).

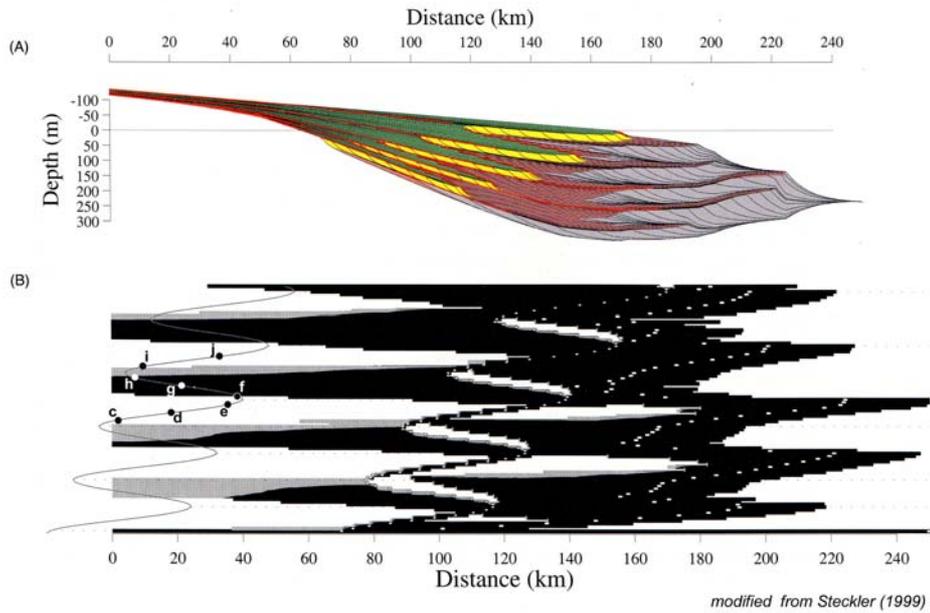


Figura 1.9 -Seção geológica sintética gerada por algoritmo misto, baseado na Equação da Difusão e em equações da geomorfologia.

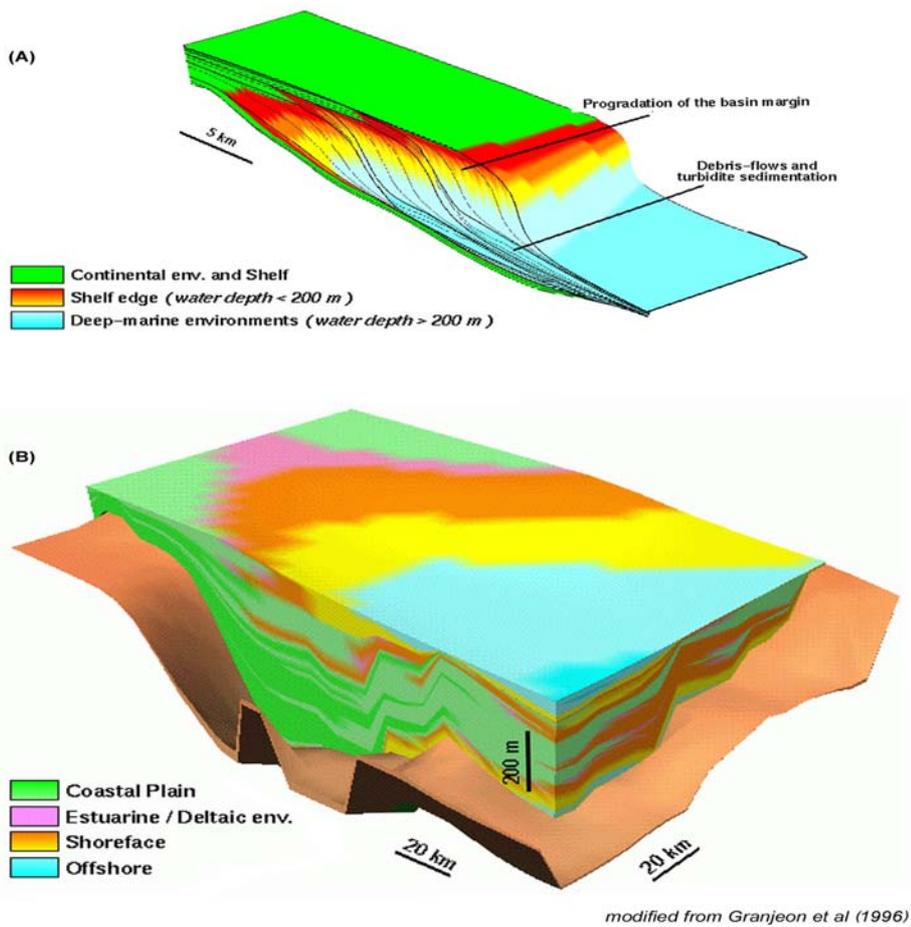


Figura 1.10 - Blocos-diagrama gerados pelo simulador tridimensional *DIONISOS*. O simulador está baseado nas Equações de Difusão (plano XZ) e Advecção (plano XY).

## 1.2

### Características Gerais dos Algoritmos Existentes

Os simuladores numéricos de sedimentação dividem-se em dois grandes grupos. No primeiro grupo encontram-se aqueles baseados em equações adaptadas de outras disciplinas, geralmente da Física, conhecidos na literatura como "simuladores de processos". Estes simuladores utilizam algoritmos de difusão (por vezes difusão e advecção), fluxo de fluidos (algoritmos hidráulicos) e velocidade de transporte. No segundo grupo estão os programas baseados em algoritmos heurísticos, também referenciados como "simuladores geométricos" (Middleton, 1994).

#### 1.2.1

##### Algoritmos de Difusão e Difusão com Advecção

Estes simuladores utilizam a Equação da Difusão, onde a taxa de variação de uma propriedade física (em geologia, a distribuição de sedimentos) é proporcional a gradientes (de uma superfície) que estejam afetando aquela propriedade. Em termos geológicos, a difusão de sedimentos é tratada como função do gradiente da superfície anterior à deposição. Ao final de cada passo de tempo de simulação, a superfície deposicional é reajustada, ocasionando uma redistribuição dos gradientes, o que irá condicionar o próximo episódio deposicional (exemplos em Flemings & Jordan, 1989, Jordan & Flemings, 1991 e Rivanæs, 1992 e 1993).

Alguns simuladores desta mesma linha foram acrescidos de um fator de correção (termo advectivo) visando incluir o efeito da distância de penetração dos sedimentos da sedimentação na bacia (na difusão Swift *et al.* 1996 e Karner & Driscoll, 1997) assim como de abordagem tridimensional (Granjeon & Joseph, 1996)

É importante observar que alguns programas trataram de corrigir os erros causados pelos diferentes coeficientes de difusão com relação ao tamanho da partícula, por exemplo, areia, silte e argila; a solução adotada por Rivanæs (1992 e 1993) foi um somatório de algoritmos, um para cada tamanho de grão estudado.

A escala de trabalho manejada por estes algoritmos é de poucas dezenas de metros e de milhares de anos (Ka). São apropriados aos processos na escala de grão (*micro*) predominantemente argila e às vezes siltes; em contrapartida, o tempo de processamento para macro-escala é elevado, sendo necessários algoritmos complementares para os processos desta escala. Do mesmo modo, também requerem algoritmos complementares para simular a sedimentação carbonática.

### 1.2.2

#### Algoritmos de Fluxo

Os programas pioneiros basearam-se na Equação da Continuidade e utilizaram versões simplificadas das Equações de *Navier-Stokes* para simulação do fluxo bidimensional de um fluido isotrópico Newtoniano (Middleton & Southard, 1984; Tetzlaff & Harbaugh, 1989 e Middleton & Wilcock, 1994).

A capacidade de transporte de sedimentos nos simuladores que utilizam este tipo de algoritmo é função da profundidade e da velocidade do fluxo. A velocidade, entretanto, não varia em função da profundidade do mesmo. Um exemplo desta classe de simulador é o programa *SEDSIM* (Tetzlaff & Harbaugh, 1989). Os parâmetros de entrada de dados deste simulador, entretanto, são de difícil amostragem em ambientes geológicos.

### 1.2.3

#### Algoritmos Empíricos

Os simuladores que utilizam este tipo de algoritmo baseiam-se em uma equação matemática adotada empiricamente que, por sua vez, não se utiliza gradientes ou geometrias gerados no próprio modelo para propagar o processo de sedimentação ao longo da seção ou área simulada.

Um exemplo clássico dessa classe de programas (Projeto *FAULT DYNAMICS*) foi desenvolvido por Waltham (1992 e 1993). Utiliza a Equação da Velocidade que simula a tectônica e a eustasia através da movimentação vertical das partículas e o aporte e redistribuição lateral através do movimento horizontal:

Por suas características matemáticas é possível observar que a resposta do algoritmo independe de gradientes ou geometrias da superfície deposicional. Por tratar-se de uma equação diferencial em  $x$  e em  $t$ , processos de macro-escala perpendiculares ao plano da seção simulada, como, por exemplo, transporte por correntes marinhas e mesmo a variação do padrão dessas correntezas não estão contemplados no referido algoritmo.

#### 1.2.4

#### Algoritmos Geométricos

Os programas de simulação deste grupo utilizam, basicamente, o conceito de espaço para acomodação de sedimentos e aporte sedimentar, a partir do modelo pioneiro de Sloss (1962), apud Miall (1996).

Os programas desta categoria baseiam-se no fato de que, na escala de tempo geológico, a superfície deposicional pode ser vista como em equilíbrio dinâmico, controlada pelas seguintes variáveis: taxa de variação relativa do nível do mar; taxa de difusão e redistribuição dos sedimentos; taxa de aporte de sedimentos; e taxa de variação do tamanho do grão em função do tempo (Swift & Thorne, 1991).

Desse modo, a tabela abaixo mostra de forma resumida as principais vantagens e desvantagens dos algoritmos existentes.

<b>Algoritmos</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Difusão e advecção</b>	- Apropriados aos processos na escala de grão (micro)	- Tempo de processamento para macro-escala elevado - Necessita de algoritmos complementares para os processos “macro”
<b>Fluxo</b>	- Tratamento bidirecional de fácil implementação	- Velocidade do fluxo não varia com a profundidade
<b>Empíricos</b>	- Resposta ao algoritmo independe de gradientes ou geometrias	- Necessitam de algoritmos complementares para os processos “macro” situações observadas

<b>Geométricos</b>	- Permite utilizar diversos algoritmos dentro do fluxograma geral de processamento	- Necessita de algoritmos específicos para processos “micro” - Não possui uma “equação geral” para todos os processos simulados
--------------------	--	--

Tabela 1.1: Vantagens e Desvantagens dos algoritmos numéricos para modelagem direta em geologia.

### 1.3

#### Objetivos

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um simulador numérico de sedimentação tridimensional, chamado de *STENO*<sup>1</sup>, com ênfase nos processos deposicionais em ambientes de plataforma, talude e bacia. O algoritmo é baseado nos conceitos quantitativos formulados pela Sismoestratigrafia e Estratigrafia de Seqüências, descrita no item 1.1, como mecanismos de controle primário da arquitetura dos estratos sedimentares e em uma solução simplificada das equações de *Navier-Stokes*, utilizando a aplicação da Segunda Lei de Newton à Equação da Continuidade, para simulação do fluxo bidimensional de um fluido incompressível, em regime permanente, não-viscoso, em função da batimetria da região a ser modelada através de uma malha regular definido pelo usuário.

É importante observar que as simplificações descritas acima foram adotadas porque, apesar do processo de sedimentação evoluir ao longo do tempo (o que faz com que o fenômeno físico seja transiente), o fato do tempo da simulação ser da ordem de Ma (milhões de anos) e o passo da simulação ser da ordem de Ka (mil anos), faz com que a análise do fenômeno possa ser feita como um problema de equilíbrio em cada passo da simulação.

O campo de velocidades calculado a partir das velocidades de aporte de sedimentos e das velocidades de corrente é utilizado para determinar a direção de escoamento dos sedimentos (linhas de corrente), isto é, o algoritmo sugerido é

<sup>1</sup>Nicolaus STENO (Copenhague, DK, 1638 - Schwerin, GE, 1686) chamava-se originalmente Niels Stensen. Foi médico, anatomista, naturalista e geocientista. Além de sua atuação na Medicina, escreveu um tratado geocientífico, *PRODOMUS*, onde formulou, pela observação de fósseis, as três leis fundamentais da Estratigrafia: Horizontalidade, Continuidade e Superposição dos Estratos.

função das velocidades pré-existentes no contorno do modelo e do gradiente do fundo (paleosuperfície deposicional).

A abordagem dada pelo algoritmo do *STENO* é inovadora, em termos dos algoritmos existentes, pois considera que os sedimentos são transportados hidrodinamicamente, isto é, na direção  $x$  e  $y$  eles são transportados seguindo as linhas de correntes e na direção  $z$  a movimentação/deposição dos sedimentos é controlada pelo ângulo de estabilidade de cada fração litológica (areia, silte ou argila) e pelo volume do espaço disponível para acomodação em cada uma das colunas formadas a partir das células do modelo discretizado.

Neste contexto, foi desenvolvida uma aplicação gráfica tridimensional para simulação numérica de processos de sedimentação. O *software* foi implementado utilizando um sistema de interface *IUP* (Levy, 1994) e a biblioteca gráfica *OpenGL* (Woo & Nieder, 1997). A aplicação é multiplataforma e tem uma interface gráfica amigável para o usuário no que diz respeito à entrada de dados e visualização dos resultados.

## 1.4

### Organização da Tese

No capítulo 1 foi mostrado o objetivo da tese bem como uma introdução dos fatores que motivaram o trabalho.

O capítulo 2 descreve os principais processos geológicos necessários para a modelagem direta de bacias sedimentares.

A geração da superfície utilizando um Modelo Digital de Terreno, a solução numérica para determinação do campo de velocidades, cálculo das linhas de correntes para o processo de sedimentação e o critério para transportar e/ou depositar os sedimentos é descrita no capítulo 3.

O capítulo 4 descreve o sistema gráfico desenvolvido, mostrando principalmente sua funcionalidade e facilidades de modelagem e de visualização dos resultados. Neste capítulo também é mostrado o algoritmo utilizado para visualizar horizontes geológicos definido pelo usuário.

No capítulo 5 são mostrados alguns exemplos da estratégia de simulação numérica sedimentar implementada.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.