

Carlos Vitor de Alencar Carvalho

**Simulação de transporte e deposição de sedimentos
siliciclásticos em ambientes de plataforma, talude e bacia**

TESE DE DOUTORADO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de Concentração: Estruturas.

Orientador: Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Rio de Janeiro

Dezembro de 2002



Carlos Vitor de Alencar Carvalho

**Simulação de transporte e deposição de sedimentos siliciclásticos
em ambientes de plataforma, talude e baía**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha
Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Jobel Lourenço Pinheiro Moreira
Petrobrás

Prof. Edison José Milani
Petrobrás

Prof. Chang Hung Kiang
UNESP

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Paulo Cezar Pinto Carvalho
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont
Coordenador Setorial
do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 06 de dezembro de 2002

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Carlos Vitor de Alencar Carvalho

Graduou-se em Engenharia Civil na UFPa (Universidade Federal do Pará) em 1995. Fez o curso de Mestrado em Estruturas pelo Departamento de Engenharia Civil no período de 1996 a 1998.

Ficha Catalográfica

Carvalho, Carlos Vitor de Alencar

Simulação de transporte e deposição de sedimentos siliciclásticos em ambientes de plataforma, talude e bacia / Carlos Vitor de Alencar Carvalho ; orientador: Luiz Fernando Campos Ramos Martha. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2002.

[18], 113 f. : il. ; 30 cm

Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Computação gráfica. 3. Geologia. 4. Simulação numérica. 5. Sedimentologia. 6. Estratigrafia. 7. Dinâmica dos fluídos. I. Martha, Luiz Fernando Campos Ramos. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Para meus pais, Francisco e Conceição, e
para minha querida esposa Janaina.

Agradecimentos

A Deus, meu Criador e perene Inspiração.

Ao meu orientador, Luiz Fernando Martha, pela orientação, pelo incentivo constante, pela dedicação, pelos conhecimentos transmitidos durante os cursos de mestrado e doutorado, pela confiança depositada em meu trabalho e principalmente pela oportunidade de estudar e desenvolver esta tese.

Ao geólogo do CENPES/PETROBRAS José Eduardo Faccion, pela grande colaboração neste trabalho. Os conhecimentos e experiências sobre geologia transmitida ao longo do desenvolvimento desta pesquisa foram de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho e para aumentar os meus conhecimentos sobre geologia.

Ao professor Eurípedes do Amaral Vargas Jr. pelas discussões de idéias contidas neste trabalho principalmente sobre a análise numérica implementada neste trabalho.

Ao professor Jean-Jacques Royer da Nancy School of Geology (Computer Science Department), pelas discussões sobre os algoritmos de trajetórias de fluxos.

Aos professores da UFPa, Remo Magalhães de Souza, Antônio Malaquias Pereira, Ronaldson Mendes Carneiro e José Perilo da Rosa Neto pelos ensinamentos e incentivos durante a graduação.

A minha esposa Janaina Veiga Carvalho pela compreensão, força, apoio, ajuda e incentivo durante todo o tempo.

Ao meu pai Francisco Carvalho e minha mãe Conceição Carvalho a minha eterna gratidão pelo apoio e incentivo que me deram para desenvolver este trabalho e ao longo de toda a minha vida.

Aos funcionários de Departamento de Engenharia Civil e do Tecgraf principalmente à Ana Roxo, Yedda Claudinei e Elivelton pelo apoio.

Aos amigos do Tecgraf/PUC-Rio e do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Ao laboratório Tecgraf pela infra-estrutura e pelo ambiente que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq e ao Convênio Tecgraf – CENPES/PETROBRAS pelo apoio financeiro ao longo do curso.

Resumo

Carvalho, Carlos Vitor de Alencar; **Simulação de transporte e deposição de sedimentos siliciclásticos em ambientes de plataforma, talude e bacia**. Rio de Janeiro, 2002, 131p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A geologia sedimentar trata do estudo dos processos físicos, químicos e biológicos atuantes na superfície da Terra não só no presente como também ao longo de toda a sua evolução. Em função disso, ela pode ser aplicada em diversos campos, como, por exemplo, no estudo da formação de combustíveis fósseis. Um dos focos principais da geologia sedimentar reside em determinar os parâmetros e processos pelos quais as bacias sedimentares são preenchidas. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um simulador numérico de sedimentação tridimensional, chamado de *STENO*, com ênfase nos processos deposicionais em ambientes de plataforma, talude e bacia. O algoritmo do simulador é baseado nos conceitos quantitativos formulados pela Estratigrafia de Sequências, como mecanismos de controle primário da arquitetura dos estratos sedimentares, e em uma análise numérica 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 um *grid* regular definido pelo usuário. 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 correntes). 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 corrente 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.

Palavras-chave

Computação gráfica, geologia, simulação numérica.

Abstract

Carvalho, Carlos Vitor de Alencar; **Simulation of transport and deposition of siliciclastic sediments in platform, slope, and basin environments.** Rio de Janeiro, 2002, 131p. Doctor's Thesis – Civil Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

Sedimentary Geology deals with the study of the physical, chemical and biological processes operating in the surface of the Earth, not only in the present days, but also along all History. Therefore, it can be applied in miscellaneous fields, as, for example, in the study of fossils fuels formation. One of the main focus of sedimentary geology inhabits in determining the parameters and processes for which the sedimentary basins are filled. In this work the development of a numerical simulator of sedimentation 3D, called STENO is presented, with emphasises the depositary processes in platform, slope, and basin environments. The algorithm of the simulator is based on the formulated quantitative concepts for Sequence Stratigraphy, as mechanisms of primary control of the architecture of sedimentary stratus, and in a numerical analysis for simulation of the 2D steady-state flow of a incompressible fluid, not viscous, in function of the bathymetry of the region represented by one regular grid defined by the user. The velocity field calculated from boundary conditions (sediment apert velocity and for field stream velocity) it is used to determine the direction of draining of the sediments (streamlines). The algorithm of STENO is innovative because it considers that the sediments are carried hydrodynamically, that is, in direction x and y they are carried following streamlines and in direction z . The movement/deposition of sediments is controlled by an angle of stability of each lithology fraction (sand, silte or clay) and by the volume of the available space for accommodation in each one of the columns formed in the cells of the discretized model.

Keywords

Computer graphics, geology, numerical simulation.

Sumário

1.	Introdução	19
1.1.	Histórico da simulação numérica em geologia (Modelagem Direta)	21
1.2.	Características gerais dos algoritmos existentes	28
1.2.1.	Algoritmos de Difusão e Difusão com Advecção	28
1.2.2.	Algoritmos de Fluxo	29
1.2.3.	Algoritmos Empíricos	29
1.2.4.	Algoritmos Geométricos	30
1.3.	Objetivos	31
1.4.	Organização da Tese	32
2.	Processos geológicos utilizados na simulação	33
2.1.	Curvas Eustáticas	33
2.2.	Subsidência	38
2.3.	Aporte de Sedimentos	39
2.3.1.	Método	40
3.	Transporte e deposição de sedimentos	44
3.1.	Modelo Digital de Terreno (MDT)	45
3.2.	Princípios Gerais dos Movimentos dos fluidos	51
3.2.1.	Formulação	51
3.2.2.	Equação do Movimento	53
3.2.3.	Equação da Continuidade	55
3.2.4.	Discretização	56
3.3.	Linhas de Correntes – Trajetórias do fluxo	64
3.4.	Deposição dos sedimentos	72
3.5.	Compactação	75
4.	Sistema Computacional	78
4.1.	Sistema STENO	78
4.2.	Extração das Superfícies	87
5.	Exemplos	96
5.1.	Exemplo 1	96
5.2.	Exemplo 2	103
5.3.	Exemplo 3	110
5.4.	Exemplo 4	118
6.	Conclusões e Sugestões	125
6.1.	Sugestões para trabalhos futuros	126
7.	Referências Bibliográficas	128

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Tipos de modelos geológicos e processos envolvidos	19
Figura 1.2 – Classificação dos Programas de Simulação Numérica em Geologia quanto à direção da Modelagem	21
Figura 1.3 – Os Ciclos Orbitais de Milankovitch	22
Figura 1.4 – Simulação de Sedimentação Siliciclástica com o <i>SEDPACK</i>	23
Figura 1.5 – Simulação Estratigráfica baseada na Equação da Difusão. Notar a reduzida escala vertical e o pequeno intervalo de tempo simulado	24
Figura 1.6 – Simulação em Mapa produzida pelo <i>SEDSIM</i> (dir) confrontada com os dados reais (esq). A captura de tela abaixo dos mapas mostra os parâmetros de entrada	25
Figura 1.7 – Modelo geológico sintético produzido com o simulador <i>FAULT DYNAMICS</i>	25
Figura 1.8 – Seções sintéticas produzidas pelo simulador de algoritmo empírico de Lawrence et al.	26
Figura 1.9 – Seção geológica sintética gerada por algoritmo misto, baseado na Equação da Difusão e em equações da geomorfologia	27
Figura 1.10 – Blocos-diagrama gerados pelo simulador tridimensional <i>DIONISOS</i> . O simulador está baseado nas Equações de Difusão (plano XZ) e Advecção (plano XY)	27
Figura 2.1 – Processos responsáveis para formação de bacias sedimentares	33
Figura 2.2 – Espaço disponível para acomodação gerado pela inter-relação entre a eustasia (subida/queda) e a tectônica (soerguimento/subsidência).	34
Figura 2.3 – Definições de Eustasia, nível do mar relativo e profundidade da lâmina d'água.	34
Figura 2.4 – Escala Geológica de tempo de <i>Harland</i> .	36
Figura 2.5 – Curva de Haq disponível no STENO	36
Figura 2.6 – Diálogo do STENO: definição das curvas de baixas e altas frequências	37
Figura 2.7 – Efeito da subsidência passo a passo	38

Figura 2.8 – Região a ser modelada mostrando pontos onde se conhece a variação da subsidência (pontos em vermelho são conhecidos, pontos da malha são calculados)	39
Figura 2.9 – Aporte de Sedimentos	40
Figura 3.1 – Algoritmo utilizado no STENO, proposto neste trabalho	44
Figura 3.2 – Região que será modelada e pontos em vermelho, com valores da subsidência ou pontos do embasamento conhecidos	45
Figura 3.3 – Curvas de subsidência disponíveis no STENO	48
Figura 3.4 – <i>Grid</i> de 35x35 células gerado pelo Método do Inverso do Quadrado da Distância	49
Figura 3.5 – <i>Grid</i> de 45x45 células gerado pelo Método do Inverso do Quadrado da Distância	50
Figura 3.6 – <i>Grid</i> de 40x40 células gerado pelo Método do Inverso do Quadrado da Distância	50
Figura 3.7 – Área elementar para a dedução das equações que governam os movimentos dos fluidos	52
Figura 3.8 – Elemento de fluido se deslocando com o escoamento	54
Figura 3.9 – Área elementar para dedução da equação da continuidade	56
Figura 3.10 – Esquema dos pontos utilizados para discretização das equações	59
Figura 3.11 – Modelo discretizado mostrando as velocidades de contorno	60
Figura 3.12 – Diagrama mostrando o tratamento das condições de contorno das células que estão na borda do modelo discretizado	61
Figura 3.13 – Diagrama mostrando o tratamento das condições de contorno das células que estão nos cantos do modelo discretizado	62
Figura 3.14 – Modelo mostrando uma área plana com velocidades constantes nas bordas esquerda e direita	63
Figura 3.15 – Campo de velocidades obtido após a análise	63
Figura 3.16 – Modelo analisado com batimetria variada	63
Figura 3.17 – Campo de velocidades obtido após a análise do modelo da figura 3.16	64

Figura 3.18 – Visualização de uma <i>streamline</i> que foi iniciada a partir da borda por onde os sedimentos entraram na superfície da simulação	65
Figura 3.19 – Coordenadas dos vértices utilizadas para a interpolação baricêntrica	67
Figura 3.20 – Visualização das <i>streamlines</i> . Número de <i>streamlines</i> é igual ao número de células na direção y menos um	67
Figura 3.21 – Algoritmo para construção da <i>streamline</i>	68
Figura 3.22 – Modelo utilizado na simulação mostrando a batimetria. Dimensões: 100km x 300 km	68
Figura 3.23 – Mesmo modelo da figura anterior mostrando uma <i>streamline</i>	69
Figura 3.24 – Modelo com sua batimetria. Dimensões: 100 km x 300 km	69
Figura 3.25 – Mesmo modelo da figura anterior mostrando as <i>streamlines</i>	70
Figura 3.26 – Mesmo modelo da figura anterior mostrando as <i>streamlines</i> e a batimetria	70
Figura 3.27 – Modelo mostrando as <i>streamlines</i> e a batimetria. Dimensões: 100 km x 300 km	71
Figura 3.28 – Mesmo modelo da figura anterior mostrando as <i>streamlines</i> e a batimetria	71
Figura 3.29 – <i>Streamlines</i> da figura 3.16 e 3.17	72
Figura 3.30 – Sentido utilizado para efetuar o processo de deposição	73
Figura 3.31 – Vista superior da <i>streamline</i>	73
Figura 3.32 – Vista lateral da <i>streamline</i> da figura 3.31	74
Figura 3.33 – Distância z entre os pontos no plano zx	74
Figura 3.34 – Distância entre d os pontos no plano xy	74
Figura 3.35 – Modelo analisado mostrando a batimetria e uma <i>streamline</i> do fluxo	75
Figura 3.36 – Modelo mostrando os sedimentos depositados ao longo da <i>streamline</i>	75
Figura 3.37 – Curva de porosidade versus profundidade e curva de complemento de porosidade (% de matriz) versus profundidade	77

Figura 4.1 – Estrutura global das classes implementadas no STENO	79
Figura 4.2 – Estrutura interna da classe <i>stenoGrid</i>	80
Figura 4.3 – Estrutura interna da classe <i>StenoCell</i>	80
Figura 4.4 – Estrutura interna da classe <i>StenoColumns</i>	81
Figura 4.5 – Diálogo Principal do STENO	82
Figura 4.6 – Diálogo utilizado para definir a superfície inicial (embasamento)	83
Figura 4.7 – Diálogo onde o usuário especifica os parâmetros iniciais	83
Figura 4.8 – Diálogo utilizado para definir a variação da subsidência	83
Figura 4.9 – Diálogo onde o usuário define a curva eustática	84
Figura 4.10 – Curva de Haq, mostrando o tempo inicial (linha verde) o tempo final (linha vermelha) e o tempo atual da simulação (linha azul). A figura da esquerda mostra de forma detalhada o trecho da curva Haq que será utilizado na simulação	84
Figura 4.11 – Tabela onde o usuário define o aporte de sedimentos	85
Figura 4.12 – Tabela que contém as informações sobre as descargas volumétricas, máximas e mínimas, de alguns rios	85
Figura 4.13 – Borda continental do tipo 1	86
Figura 4.14 – Borda continental do tipo 2	86
Figura 4.15 – Tabela com as velocidades de correntes marítimas	87
Figura 4.16 – Sedimentos depositados no <i>grid</i> armazenados em colunas	88
Figura 4.17 – Exemplo esquemático mostrando como as colunas são montadas	89
Figura 4.18 – Topo das colunas após a escolha da idade pelo usuário	89
Figura 4.19 – Malha de elevação da superfície de idade definida pelo usuário	90
Figura 4.20 – Extensão da malha de elevação da superfície até as bordas da malha de simulação	90
Figura 4.21 – Cálculo do ponto de interseção entre pontos calculados no passo anterior	91

Figura 4.22 – Malha gerada após o cálculo do ponto de interseção entre pontos calculados no passo anterior	91
Figura 4.23 – Pontos calculados após o calculo dos valores da altura nos vértices da malha da simulação	92
Figura 4.24 – Pontos calculados após o calculo dos valores da altura nos vértices da malha da simulação	92
Figura 4.25 – Visualização tridimensional, com as células do grid em forma de colunas, de uma idade definida pelo usuário	93
Figura 4.26 – Superfície suavizada com o algoritmo mostrado	94
Figura 4.27 – Visualização tridimensional, com as células do <i>grid</i> em forma de colunas, de uma idade definida pelo usuário	94
Figura 4.28 – Superfície suavizada com o algoritmo mostrado	95
Figura 5.1 – Conjunto de parasseqüências, de acordo com Van Wa goner et al (1998)	97
Figura 5.2 – Trecho utilizado para fazer a simulação das parasseqüências, correspondente ao TST	97
Figura 5.3 – Tratos de sistemas associados à curva eustática	98
Figura 5.4 – Passo um, início da simulação	99
Figura 5.5 – Passo dois, seqüência retrogradacional	100
Figura 5.6 – Passo três, seqüência retrogradacional	100
Figura 5.7 – Passo quatro, seqüência retrogradacional com alguma característica de agradação	101
Figura 5.8 – Passo cinco, agradacional	101
Figura 5.9 – Passo seis, início de seqüências progradacional	102
Figura 5.10 – Passo sete, seqüência progradacional	102
Figura 5.11 – Passo oito, seqüência progradacional	103
Figura 5.12 – Aspecto final da seção depois da simulação	103
Figura 5.13 – Parâmetros iniciais utilizados na simulação	104
Figura 5.14 – Definição da curva de subsidência	104
Figura 5.15 – Visualização dos pontos onde se conhece a variação da subsidência	105
Figura 5.16 – Função de aporte utilizada nesta simulação	105
Figura 5.17 – Velocidades de contorno utilizadas para determinar o campo de velocidades e as <i>streamlines</i>	106

Figura 5.18 – Passo um da simulação	106
Figura 5.19 – Passo dois da simulação	107
Figura 5.20 – Passo três da simulação	107
Figura 5.21 – Passo quatro da simulação	108
Figura 5.22 – Passo cinco da simulação	108
Figura 5.23 – Passo seis da simulação	109
Figura 5.24 – Passo sete da simulação	109
Figura 5.25 – Visualização final da bacia após a simulação	110
Figura 5.26 – Parâmetros iniciais utilizados na simulação	110
Figura 5.27 – Aporte de sedimentos utilizado no exemplo 3	111
Figura 5.28 – Primeiro passo da simulação	111
Figura 5.29 – <i>Streamlines</i> da análise do primeiro passo da simulação	112
Figura 5.30 – Horizonte geológico do primeiro passo da simulação	112
Figura 5.31 – Segundo passo da simulação	113
Figura 5.32 – <i>Streamlines</i> do segundo passo da simulação	113
Figura 5.33 – Horizonte geológico do segundo passo da simulação	114
Figura 5.34 – Terceiro passo da simulação	114
Figura 5.35 – <i>Streamlines</i> do terceiro passo da simulação	115
Figura 5.36 – Horizonte geológico do terceiro passo da simulação	115
Figura 5.37 – Quarto passo da simulação	116
Figura 5.38 – <i>Streamlines</i> do quarto passo da simulação	116
Figura 5.39 – Horizonte geológico do quarto passo da simulação	117
Figura 5.40 – Quinto passo da simulação	117
Figura 5.41 – <i>Streamlines</i> do quinto passo da simulação	118
Figura 5.42 – Horizonte geológico do quinto passo da simulação	118
Figura 5.43 – Batimetria e características do exemplo 4	119
Figura 5.44 – Primeiro passo da simulação	120
Figura 5.45 – Linhas de correntes do primeiro passo da simulação	120
Figura 5.46 – Segundo passo da simulação	121
Figura 5.47 – Terceiro passo da simulação	121
Figura 5.48 – Quarto passo da simulação	122
Figura 5.49 – Quinto passo da simulação	122
Figura 5.50 – Sexto passo da simulação	123

Figura 5.51 – Sétimo passo da simulação	123
Figura 5.52 – Oitavo passo da simulação	124
Figura 6.1 – Algoritmo proposto e implementado neste trabalho	125

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Vantagens e Desvantagens dos algoritmos numéricos para modelagem direta em geologia	30
Tabela 2.1 – Exemplos de Concentrações Parciais em Sistemas Costeiro	41
Tabela 2.2 – Descarga Sedimentar Total	41
Tabela 2.3 – Descarga Sedimentar em Sistemas Costeiros (adaptado de Hansen & Poulain, 1996 e Harris & Coleman, 1998)	42
Tabela 2.4 – Descarga Sedimentar de rios significativos (adaptado de Hansen & Poulain, 1996 e Harris & Coleman, 1998)	42
Tabela 2.5 – Composição percentual de Sedimentos	43
Tabela 3.1 – Tabela utilizada para montar uma curva de subsidência da Bacia de Campos	48

Lista de Símbolos

Caracteres Romanos

a – aceleração do fluido

$b[i]$ – coeficientes baricêntricos

dA – área em que o fluido está atuando

dec – o fator de decaimento

D_f – valor da profundidade correspondente a idade imediatamente acima da idade atual da simulação

D_i – valor da profundidade correspondente a idade imediatamente abaixo da idade atual da simulação

g é a aceleração da gravidade

h_{ij} – distância entre o nó (j) do *grid* e o ponto da amostra i

h – altura do fluido (batimetria)

Hs – altura de sedimentos de uma camada

I_f – valor da idade imediatamente acima da idade atual da simulação

I_i – valor idade imediatamente abaixo da idade atual da simulação

n – número de amostras utilizadas para interpolar cada nó do *grid*

Q_{entra} – vazão que entra na área elementar

Q_{sai} – vazão que sai da área elementar

R – região de análise

u – componente x do vetor velocidade

v – componente y do vetor velocidade

$v_x(x, y)$ – componente x do vetor velocidade

$v_y(x, y)$ – componente y do vetor velocidade

\vec{v} – vetor velocidade

w – componente z do vetor velocidade

Zt – profundidades do topo

Zb – profundidade da base

$z(x, y)$ – valor interpolado para o nó do *grid*

z_i – valor da subsidência da amostra i

Caracteres Gregos

β – expoente de ponderação

δR – fronteira de região de análise

Δt – intervalo de tempo

Δx – distância entre as células do grid na direção x

Δy – distância entre as células do grid na direção y

ϕ - potencial de velocidade

γ – peso específico

η – coordenada paramétrica

ρ – massa específica do fluido

ρ_0 – a porosidade inicial

ξ – coordenada paramétrica

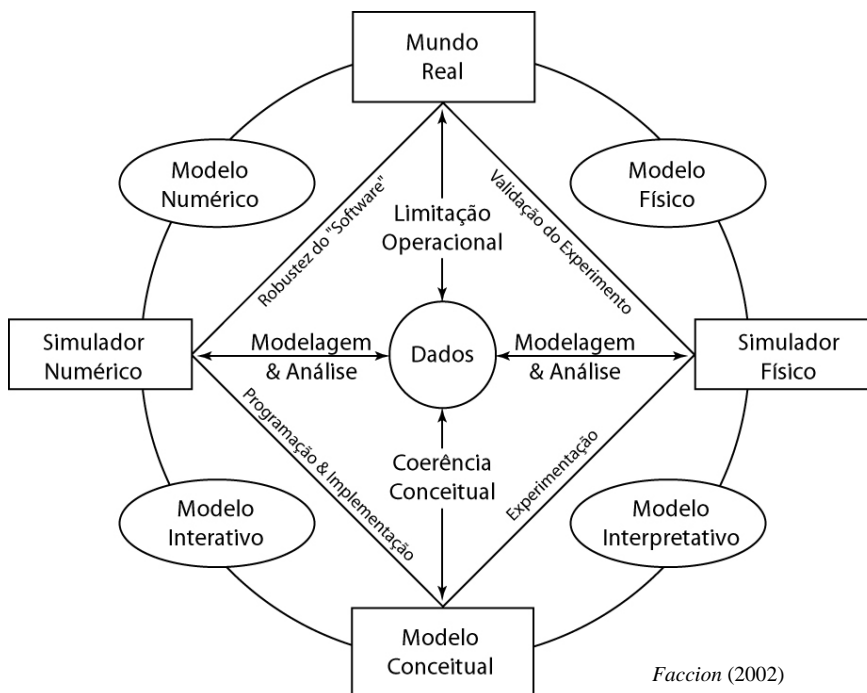
1

Introdução

A geologia sedimentar (Sedimentologia e Estratigrafia) é o estudo dos produtos dos processos físicos, químicos e biológicos atuantes na superfície da Terra não só no presente como também ao longo de toda a sua evolução. Em função disso, a geologia sedimentar pode ser aplicada em diversos campos, como, por exemplo, no estudo da formação de materiais de construção, combustíveis fósseis, fosfatos para agricultura, entre outros.

Suas premissas se estendem também para a origem e evolução das bacias sedimentares, onde são estudados os processos tectônicos responsáveis pela gênese e evolução dos diferentes tipos de bacias sedimentares atualmente classificados (Popp, 1998).

Um dos focos principais da geologia sedimentar reside em determinar os parâmetros e processos pelos quais as bacias sedimentares são preenchidas, conjunto este de fatores implícitos no conceito de modelo geológico (Faccion, 2002). Em geologia, os modelos que descrevem tais fenômenos podem ser dos seguintes tipos (figura 1.1):



Faccion (2002)

Figura 1.1 – Tipos de modelos geológicos e processos envolvidos.

- **Conceitual:** teórico, baseado em premissas e descrições qualitativas;

- **Interpretativo:** baseado na correlação de dados e associação espacial de unidades geológicas de modo a testar um modelo conceitual;
- **Físico:** busca a representação de um fenômeno geológico em um experimento ou em um simulador físico, sob condições quantitativamente controladas;
- **Matemático:** baseados em algoritmos numéricos, geralmente computacionais, buscam reproduzir a geometria deposicional/estrutural e a coerência quantitativa de um modelo geológico.

Ao manejar questões simples, a utilização e formulação de um modelo conceitual ou mesmo interpretativo pode ser suficiente. Entretanto, para situações que envolvem sincronismo ou respostas quantitativas, os benefícios da modelagem numérica são ressaltados, e suas principais vantagens são:

- a) Fornecer respostas qualitativas coerentes para situações complexas;
- b) Gerar respostas quantitativas para problemas simples;
- c) Dar coerência qualitativa e quantitativa a modelos interpretativos.

Este último item é uma das maiores vantagens da modelagem numérica e computacional, uma vez que os modelos conceituais e/ou interpretativos tendem a permitir níveis de incerteza que muitas vezes comprometem a precisão ou até mesmo a consistência de uma solução final.

A modelagem pode partir de um conjunto de parâmetros e processos determinados e com eles chegar a uma arquitetura sedimentar final (modelagem direta – figura 1.2) ou partir de uma geometria conhecida e obter os processos e parâmetros que determinaram aquela geometria (modelagem inversa – figura 1.2). Neste último caso os processos e parâmetros são obtidos utilizando, por exemplo, técnicas de *backstripping* ou balanceamento de seção (Ferraz, 1993).

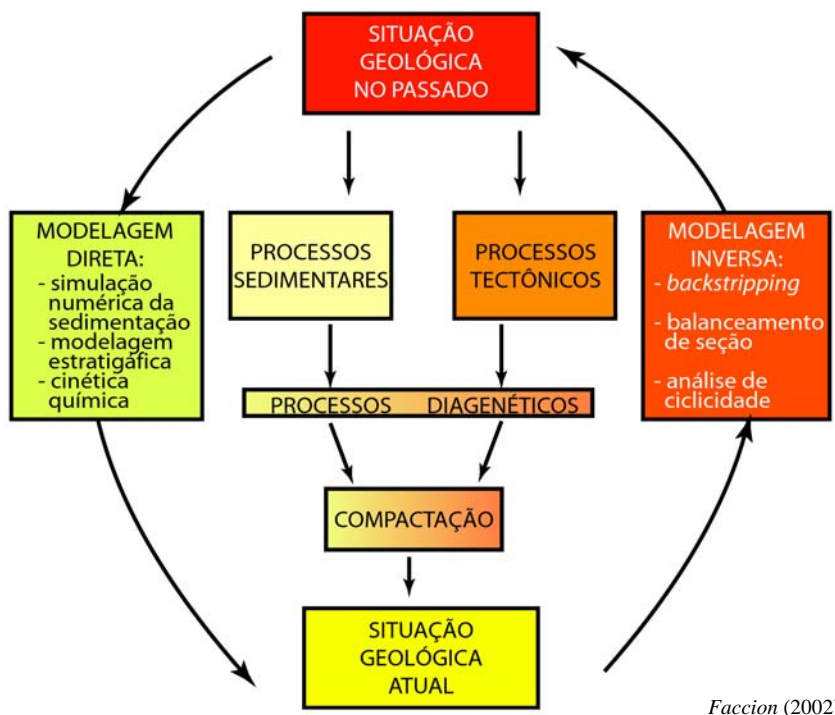


Figura 1.2 - Classificação dos Programas de Simulação Numérica em Geologia quanto ao sentido da Modelagem.

Na modelagem direta, onde este trabalho está inserido, o ponto de partida são as condições iniciais (por exemplo, a paleosuperfície deposicional de uma seqüência) e os processos, ou seja, as direções de transporte, taxa de subsidência, ciclos sedimentares, representados por suas variações (taxas) ao longo do tempo geológico.

1.1

Histórico da Simulação Numérica em Geologia (Modelagem Direta)

As definições dos conceitos da estratigrafia foram fundamentais para determinar a evolução computacional da modelagem sedimentar numérica. Historicamente, os conceitos da estratigrafia podem ser dividido em duas fases. Na primeira fase, que se deu do início da década de 40 ao final da década de 60, foram formulados os conceitos da estratigrafia clássica. Na segunda fase, que aconteceu no final da década de 70 e início da década de 80, foram desenvolvidos os conceitos e definições da Sismoestratigrafia e da Estratigrafia de Sequências (Fávera, 2001). As interpretações dos dados sísmicos feitas utilizando tanto a Sismoestratigrafia quanto a Estratigrafia de Sequências permitiram a formação

dos conceitos quantitativos sobre as variações de um pequeno conjunto de parâmetros de segunda e terceira ordens (variações eustáticas do nível do mar, subsidência e aporte sedimentar) como mecanismos de controle primário da arquitetura dos estratos sedimentares.

O desenvolvimento dos algoritmos numéricos são posteriores à segunda fase e tem como base conceitual não só as teorias clássicas desenvolvidas na primeira fase, mas principalmente os conceitos quantitativos que foram estudados na Sismoestratigrafia e na Estratigrafia de Seqüências, sendo fundamentais para o desenvolvimento numérico dos processos de sedimentação. Por sua vez, observações feitas em escala de afloramento permitiram identificar os efeitos dos ciclos de menor periodicidade e de frequência mais alta na ordem das variações climáticas relacionadas com os ciclos orbitais, ou Ciclos de Milankovitch como mostra a Figura 1.3 (Faccion, 2002).

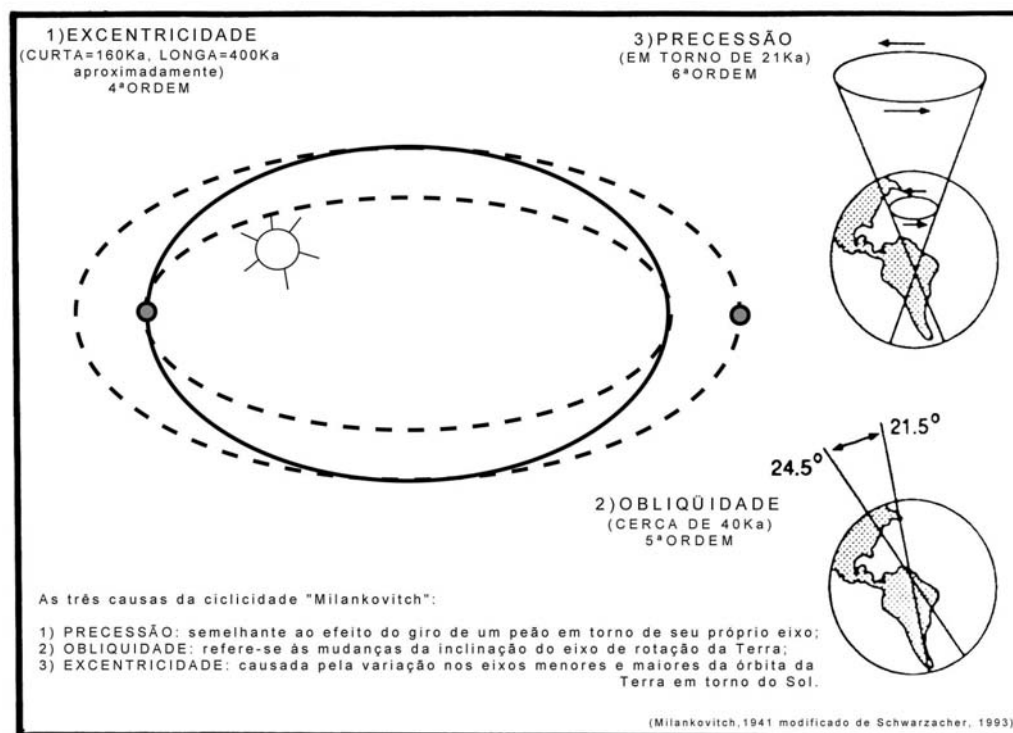


Figura 1.3 - Os Ciclos Orbitais de Milankovitch.

Dentre os principais algoritmos numéricos podem-se destacar os desenvolvidos por Helland-Hansen *et al.* (1988), que utilizou um algoritmo geométrico, criando a primeira versão do programa *SEDPACK*, na Universidade da Carolina do Sul (Figura 1.4). O trabalho pioneiro visava estudar as oscilações das

taxas de acumulação de sedimentos em margem continental em função das taxas de subsidência e de variações eustáticas (variações do nível do mar).

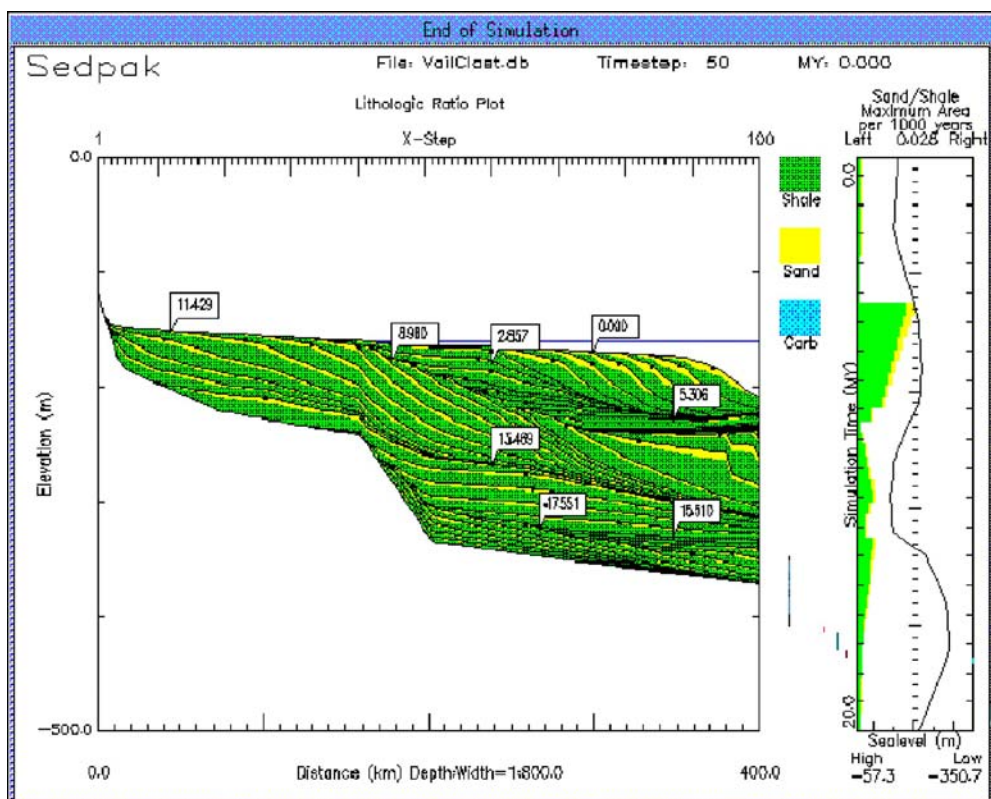
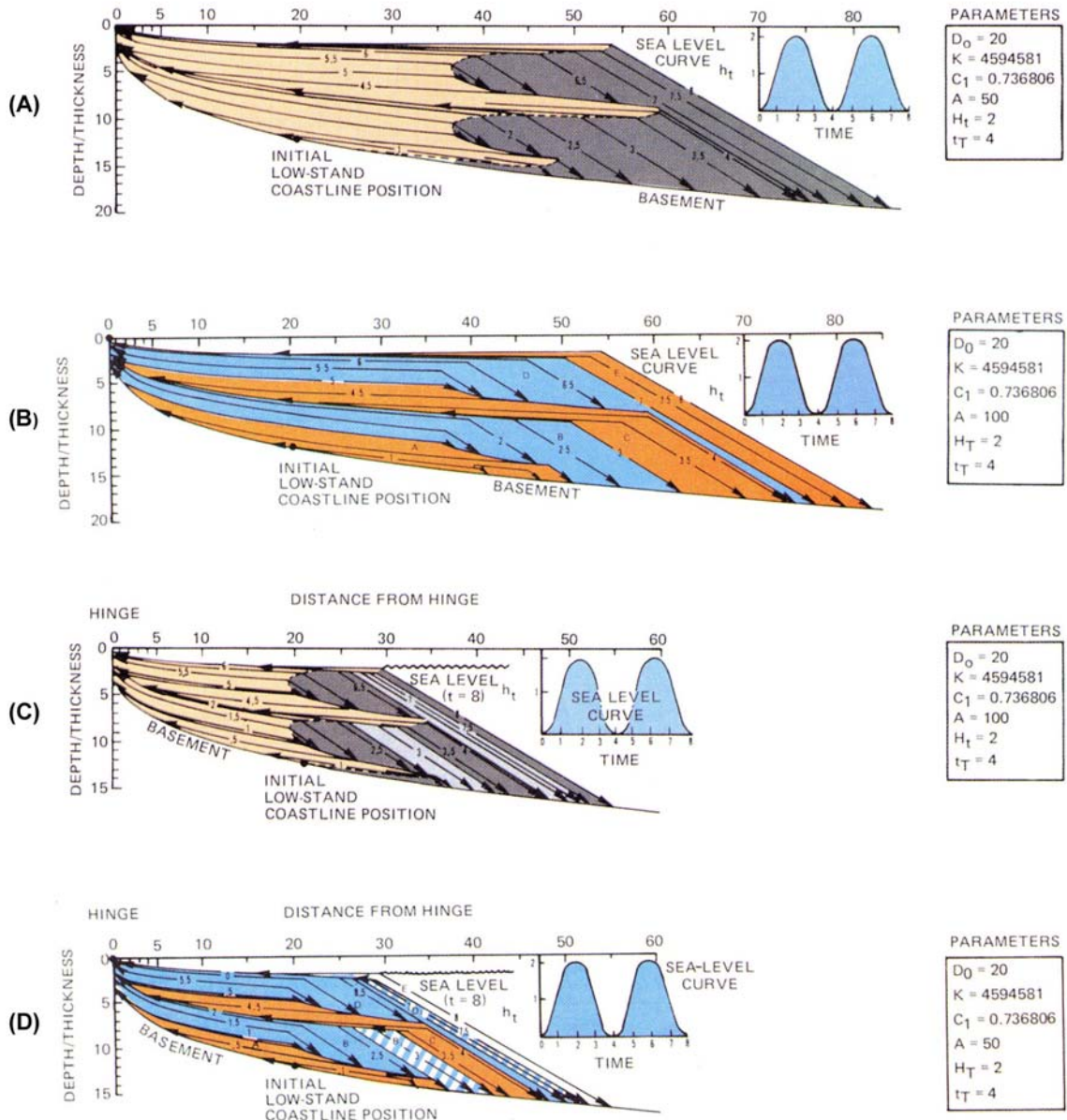


Figura 1.4 - Simulação de Sedimentação Siliciclástica com o *SEDPAK*.

Jervey (1988) utilizou um simulador numérico baseado na equação da difusão para demonstrar os princípios da Estratigrafia de Sequências (figura 1.5).

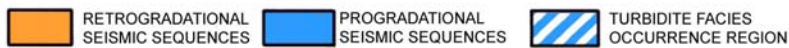
Tetzlaff & Harbaugh (1989), utilizando um algoritmo baseado na equação de fluxo (*Navier-Stokes*), desenvolveram o programa *SEDSIM* (figura 1.6), para simulação de sedimentação siliciclástica (sedimentos formados principalmente por fragmentos detríticos originados pela erosão de áreas fonte emersas), aperfeiçoado por Martinez & Harbaugh (1993) para aplicação em ambiente plataformal misto (siliciclástico e carbonático).



Facies types

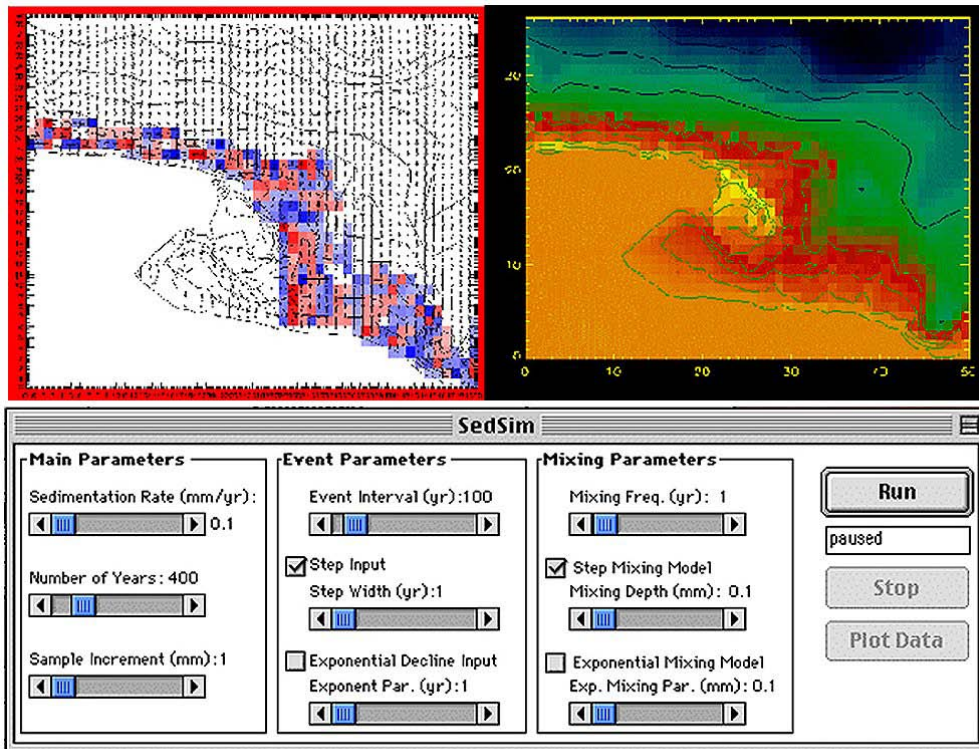


Seismic sequences



modified from Jervey (1988)

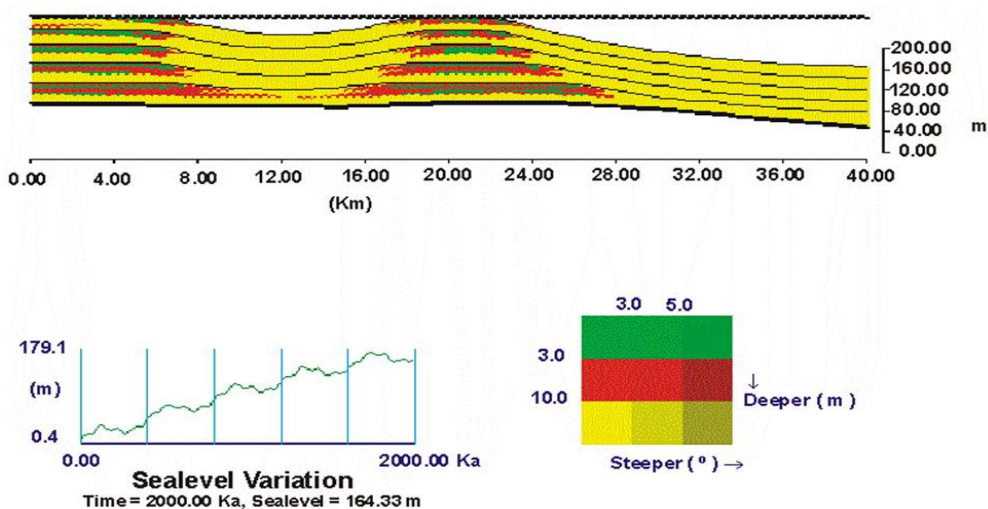
Figura 1.5 - Simulação Estratigráfica baseada na Equação da Difusão. Notar a reduzida escala vertical e o pequeno intervalo de tempo simulado.



modified from Tetzlaff & Harbaugh (1989)

Figura 1.6 - Simulação em Mapa produzida pelo *SEDSIM* (dir) confrontada com os dados reais (esq). A captura de tela abaixo dos mapas mostra os parâmetros de entrada.

Bosence & Waltham (1990) apresentaram um programa (*FAULT DYNAMICS*) com algoritmo baseado na Equação da Velocidade inicialmente para estudo da arquitetura interna de plataforma carbonáticas (figura 1.7). Posteriormente foram feitas simulações nos mais diversos ambientes geológicos (Waltham, 1992).



modified from Bosence & Waltham (1990)

Figura 1.7 - Modelo geológico sintético produzido com o simulador *FAULT DYNAMICS*.

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).

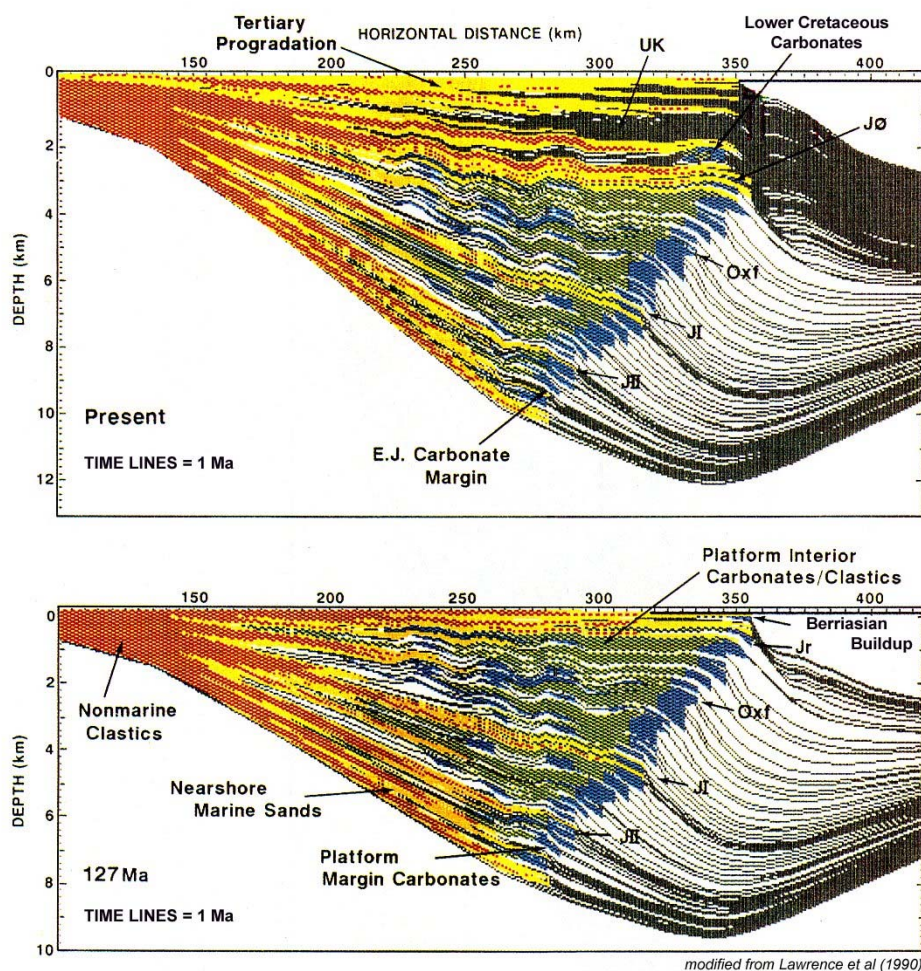


Figura 1.8 - Seções sintéticas produzidas pelo simulador de algoritmo empírico de Lawrence et al 1990.

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).

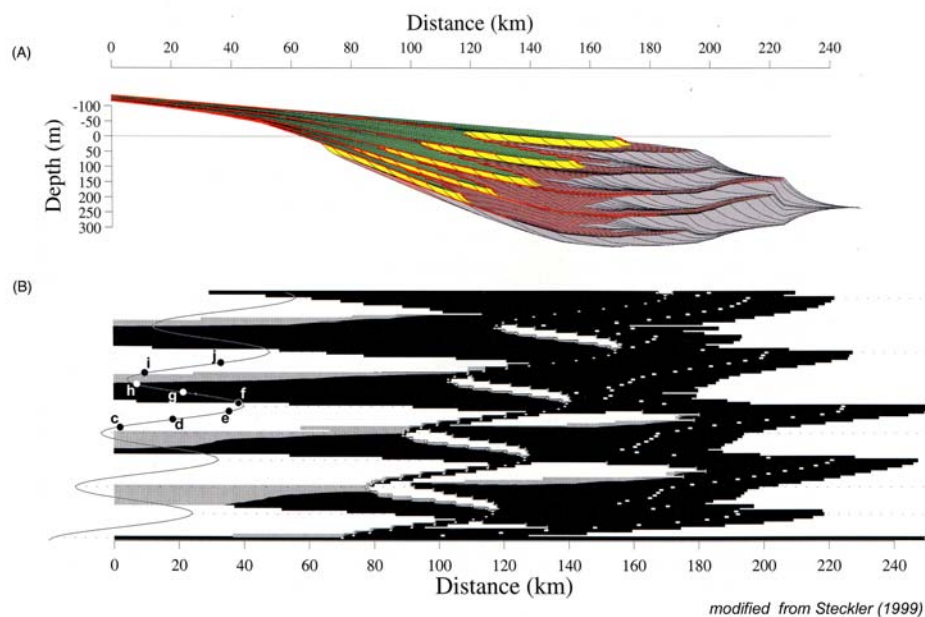


Figura 1.9 -Seção geológica sintética gerada por algoritmo misto, baseado na Equação da Difusão e em equações da geomorfologia.

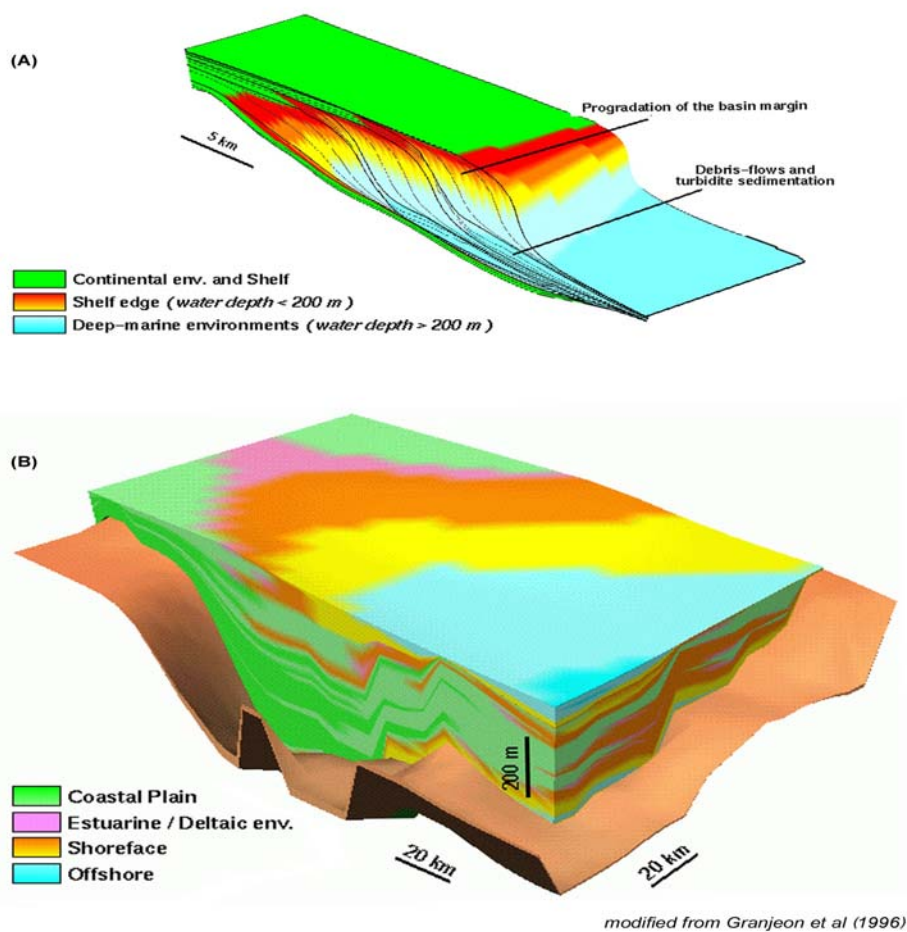


Figura 1.10 - Blocos-diagrama gerados pelo simulador tridimensional *DIONISOS*. O simulador está baseado nas Equações de Difusão (plano XZ) e Advecção (plano XY).

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.

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

Geométricos	- 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*¹, 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

¹Nicolaus 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.

2

Processos Geológicos Utilizados na Simulação

Para o desenvolvimento do STENO foram feitos estudos sobre os principais processos que controlam os padrões de estratos e distribuições litofácies nas bacias sedimentares. Segundo Vail (1987), há três variáveis principais que controlam o preenchimento das bacias sedimentares (figura 2.1): subsidência tectônica; variação eustática do nível do mar; volume de sedimentos.



Figura 2.1: Processos responsáveis para formação de bacias sedimentares.

A acomodação, que é o espaço colocado em disponibilidade para potencial acumulação de sedimentos na bacia, é função das variações eustáticas e da subsidência (figura 2.2). Nas próximas seções será mostrado um resumo teórico do estudo feito sobre os três processos citados acima e como eles foram considerados no STENO.

2.1

Curvas Eustáticas

A Eustasia é o conceito que representa a variação absoluta do nível do mar. A variação relativa do nível do mar é a alteração na distância vertical entre a posição da superfície do corpo d'água e um *datum* situado no fundo do mar ou próximo dele, como por exemplo, o embasamento. A lâmina d'água é a distância entre a superfície do mar e o fundo do mar, e este parâmetro estará sendo modificado ao longo da simulação devido à sedimentação e/ou erosão (figura 2.3).

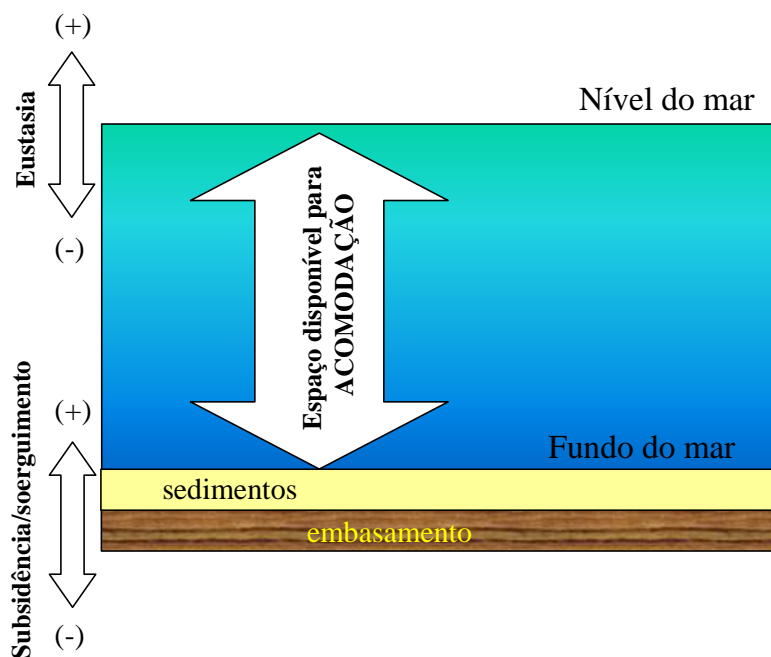


Figura 2.2: Espaço disponível para acomodação gerado pela inter-relação entre a eustasia (subida/queda) e a tectônica (soerguimento/subsidência). Adaptado de Posamentier et al., 1998.

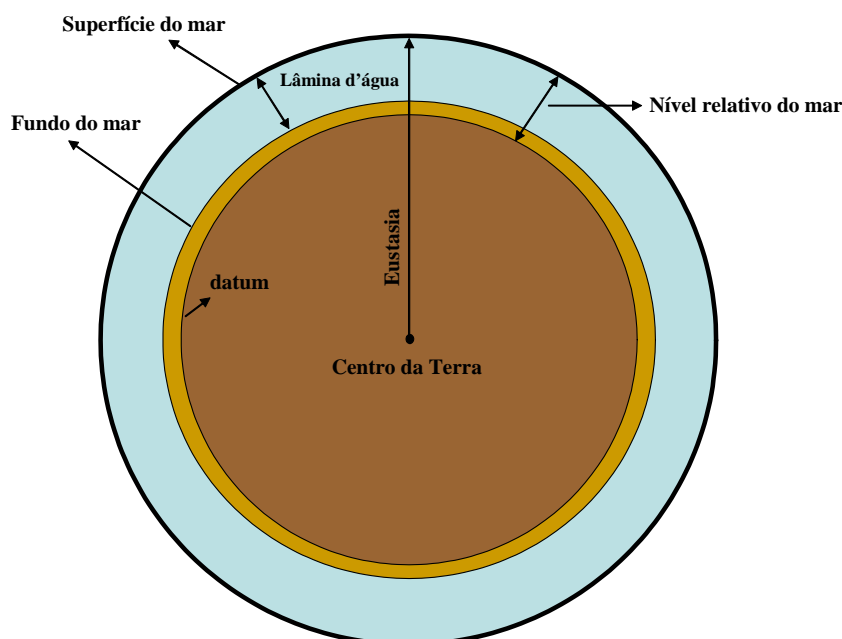


Figura 2.3: Definições de Eustasia, nível do mar relativo e profundidade da lâmina d'água. (Posamentier et al. 1998).

As causas da variação relativa do nível do mar são (Fávera, 2001):

Glacioeustática – Relacionam-se à formação de calotas glaciais em áreas continentais da Terra em épocas determinadas. Seus efeitos mais notáveis acontecem no Neógeno (2 Ma a 25 Ma), apesar de a primeira calota terciária ter sido percebida no Eoceno (36 Ma a 54 Ma). Esses períodos podem ser vistos na

figura 2.4. Nos períodos glaciais, a água líquida dos oceanos é retida em forma de gelo sobre os continentes; sendo o volume total de água no planeta relativamente constante, tem-se como consequência a diminuição do nível eustático. Por outro lado, em outras épocas pode ocorrer o derretimento das calotas glaciais, gerando aumentos significativos no nível eustático.

Tectono-eustáticas – Estão relacionadas com o movimento das placas litosféricas. Em períodos de existência de supercontinentes (massas agrupadas), a tendência é que o nível eustático esteja baixo, uma vez que em tais intervalos de tempo a maior parte da crosta oceânica circundando o continente será “antiga”, já resfriada e abatida estruturalmente, trazendo como resultado a máxima capacidade volumétrica possível para as bacias oceânicas.

A ruptura dessas grandes massas continentais, e a consequente criação de oceanos, injeta grandes volumes de material sub-crustal agora à superfície (cadeias meso-oceânicas). Estas massas rochosas “novas”, quentes e elevadas, reduzem a capacidade volumétrica dos oceanos, e a consequência é uma subida eustática (efeito de transbordamento).

Eustasia do geóide – Hipótese propagada por Mörner (1976), que relaciona o nível do mar à forma do geóide. Segundo ele, o nível do mar atual conteria protuberâncias (80m em 8000km) correspondentes a variações do campo gravitacional, e, portanto, a sua variação seria totalmente diácrona, isto é, não ocorre ao mesmo tempo na superfície.

Esforços intraplacas – Relacionam-se à variação relativa do nível do mar, sendo difundida por Cloethig (1998). Considera que seqüências de 3º ordem seriam geradas por movimentos verticais da litosfera, induzidos tectonicamente, em bacias de margem passiva. Estes esforços seriam gerados pela dinâmica das placas.

No que diz respeito ao espectro de frequência as curvas eustáticas contém contribuições de baixa frequência (*long term* – ciclos de 1º e 2º ordens e *short term* – ciclos de 3º ordem) e de alta frequência (Ciclicidade Orbital de Milankovitch), relativamente ao tempo geológico.

ERA	SUB-ERA PERIOD	SUB-PERIOD	EPOCH	AGE	Abb- rev	Ma	AGE DURATION				
							Ma	Ma			
CENOZOIC	Tertiary	Quaternary (Q) or Pleistocene (Ptg)	Holocene		Hol	0.0	0.01	2.0			
			Pleistocene		Ple	2.0	1.99				
		Neogene	22.6 (Ng)	Pliocene (Pl)	Piacenzian		Pia	3.1	3.1		
					Zancian		Zan	5.1			
				Miocene (Mio)	Messinian		Mes	6.2	22.6		
					Tortonian		Tor	11.3			
					Serravallian		Srv	3.1			
				Paleogene	19.5	Langhian - Late	Langhian - Late		Lan ₂	14.4	40.4
							Langhian - Early		Lan ₁	0.2	
						Burdigalian		Bur	24.6		
						Aquitanian		Aqt	32.8		
						Oligocene (Ol)	13.4	1	Chattian		
		Paleogene	16.3	Eocene (Eoc)	Rupelian		Rup	5.2	40.4		
					Priabonian		Prb	4.0			
				Oligocene (Ol)	Bartonian		Brt	8.5			
					Lutetian		Lut	4.4			
				Paleocene (Pal)	Ypresian		Ypr	50.5			
					Thanetian		Tha	54.9			
		Paleocene (Pal)	10.1	1	Thanetian		Tha	5.3	4.8		
					Danian		Dan	6.6			

Figura 2.4: Escala Geológica de tempo de *Harland* (Harland, 1982).

Existem, na literatura, dois tipos básicos de curvas eustáticas de baixa frequência: a de *Haq*, mostrada na figura 2.5 e que foi utilizada para fazer as simulações deste trabalho e a de *Harland* (Harland, 1982).

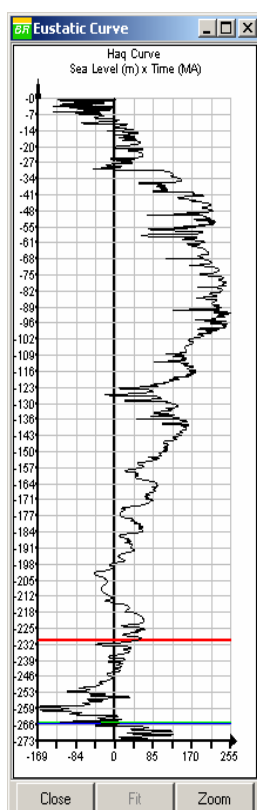


Figura 2.5: Curva de *Haq* disponível no STENO.

As curvas eustáticas de alta frequência são representadas pela composição de harmônicas baseadas na equação do movimento ondulatório como abaixo:

$$SL = A \sin(\omega t + \phi) \quad (2.1)$$

Onde:

SL → nível do mar (*Sea Level*);

A → Amplitude Máxima, obtida através da análise estatística das funções periódicas extraídas da Transformada de Fourier de um perfil elétrico de um poço;

ω → $2\pi/T$; onde T é o período do ciclo de Milankovitch relativo à amplitude escolhida;

t → tempo geológico da simulação;

Φ → Ângulo de fase: é o ângulo equivalente à amplitude do nível do mar no início da simulação.

Será utilizada a seguinte classificação das curvas eustáticas, de acordo com o período:

3^a ordem → 1.000.000 a 5.000.000 anos

4^a ordem → 100.000 e 400.000 anos

5^a ordem → 40.000 anos

6^a ordem → 20.000 anos

Estas curvas foram organizadas em tabelas que relacionam o nível do mar com um determinado tempo geológico, de modo que na primeira coluna indica o tempo geológico em milhões de anos (MA) e a segunda coluna a posição do nível do mar naquele tempo.

A escolha das curvas eustáticas depende do tipo de simulação a ser feito. Neste trabalho o STENO pode simular eventos relacionados a ciclos de 1^o, 2^o ordens e 3^o ordem. Esta escolha é feita utilizando a diálogo mostrado na figura 2.6.

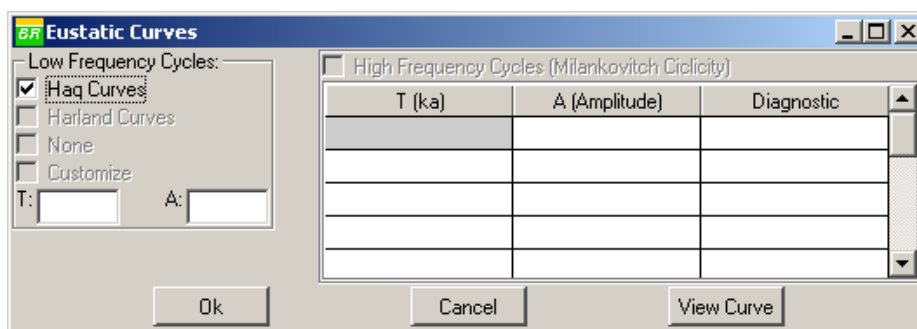


Figura 2.6 - Diálogo do STENO: definição das curvas de baixas e altas frequências.

2.2

Subsidência

Subsidência é o movimento de natureza tectônica ou termal que afeta o substrato das bacias. Segundo Vail *et al.* (1977) a subsidência não varia em curtos períodos de tempo (dentro da 3ª ordem de grandeza ou menor que 3 Ma). A subsidência torna-se maior à medida que se avança para o centro da bacia. A porção onde a subsidência passa a ser expressiva numa bacia é chamada de *linha de charneira*. A subsidência tectônica é a resposta da litosfera sob a forma de movimentação vertical negativa a estímulos promovidos por campos de tensões de origem tectônica, A subsidência térmica é o abatimento litosférico gerado por processos de perda de calor e contração que ocorre na restauração da estrutura térmica original de regiões da crosta previamente aquecidas. A figura 2.7 mostra o efeito da subsidência passo a passo.

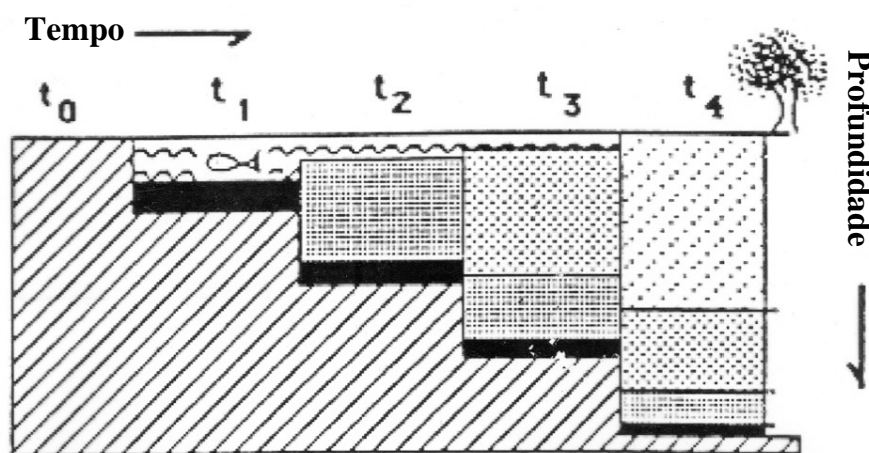


Figura 2.7: Efeito da subsidência passo a passo. (Adaptado de Einsele, 1992).

Basicamente ela é função dos seguintes fatores:

- Rebaixamento ou elevação devido a eventos tectônicos do embasamento da bacia (subsidência tectônica);
- Peso da cunha sedimentar depositada sobre o embasamento;
- Compactação da cunha sedimentar;
- Variação do nível do mar; e
- Paleobatimetria.

Para o STENO, a subsidência é fornecida uma tabela de taxas de subsidência tectônica/térmica em função do tempo geológico para alguns pontos do conjunto inicial de pontos fornecidos como mostra a figura 2.8. Na seção 3.1 do capítulo 3 é explicado o algoritmo utilizado para interpolar as taxas de subsidência em toda a região que será modelada. O estudo da subsidência propriamente dito será objeto de implementação em etapa posterior, sendo o usuário orientado, na primeira etapa, a obter os dados através de um programa apropriado para tal tarefa. Neste trabalho as curvas de subsidência são obtidas utilizando o aplicativo BASS (Kiang, 1991).

Entretanto, o programa BASS fornece as curvas de subsidência na forma de deslocamento absoluto do horizonte correspondente ao embasamento da bacia sedimentar em função do tempo geológico. Tais curvas, no STENO, são transformadas para tabelas de taxa *versus* tempo, utilizando a curva sem sobrecarga sedimentar daquele programa.

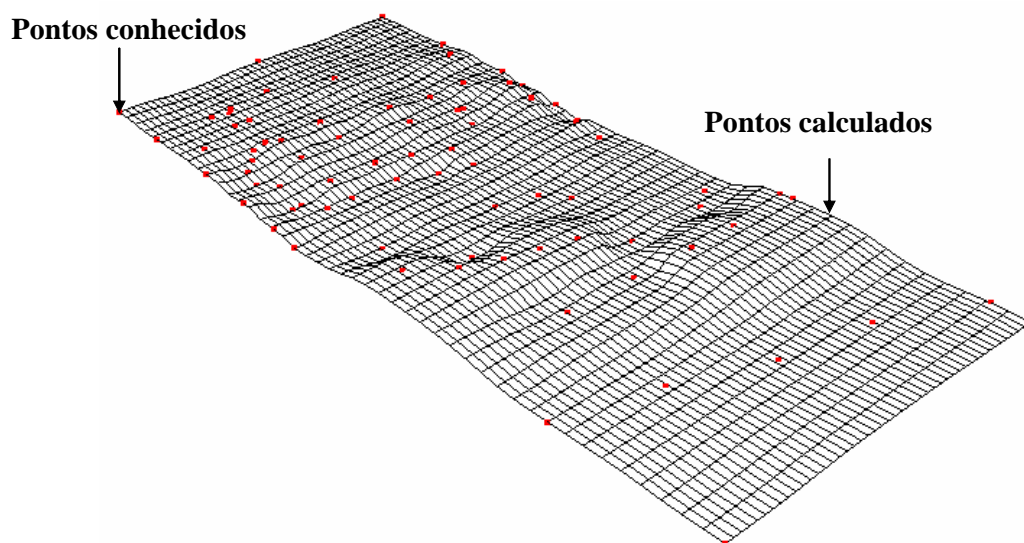


Figura 2.8 – Região a ser modelada mostrando pontos onde se conhece a variação da subsidência (pontos em vermelho são conhecidos, pontos da malha são calculados).

2.3

Aporte de sedimentos

O aporte de sedimentos é estabelecido através do volume de sedimentos ao longo da linha de costa, que pode ser uma função, dada nas colunas ao longo da borda de costa do modelo numérico. O usuário deve fornecer o volume de sedimentos por litologia (areia, argila e silte). Caso os volumes sejam fornecidos

em apenas algumas colunas, os demais valores serão obtidos por interpolação ao longo da linha de costa, isso é mostrado na figura 2.9.

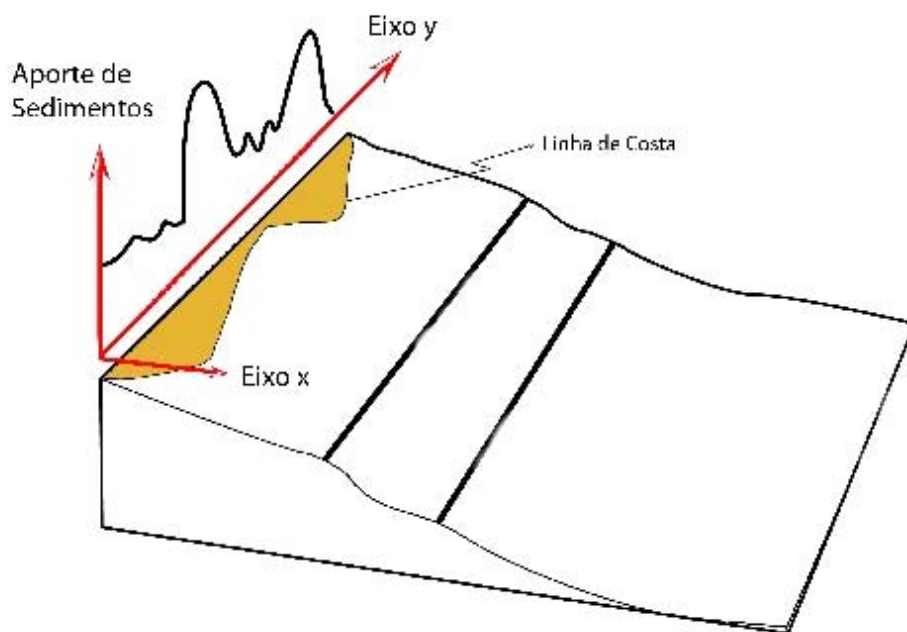


Figura 2.9 – Aporte de Sedimentos

Para indicar esse volume de sedimentos o usuário deverá utilizar o banco de dados de concentrações e volumes de litologias. Este banco de dados foi elaborado pela equipe do setor de Geologia do Cenpes (Centro de Pesquisa da PETROBRAS). A seguir é mostrado o método utilizado para construir esse banco de dados.

2.3.1

Método

Para especificar este banco de dados foram utilizados os mapas (Hansen & Poulain, 1996 e Harris & Coleman, 1998) que foram construídos com base em estimativa global de sedimentos costeiros/plataformais em suspensão e mostram a distribuição percentual de diferentes tamanhos de grãos na linha de costa, no período de 1992 a 1995.

Inicialmente, foram escolhidos globalmente pontos que melhor representassem os diferentes ambientes deposicionais, selecionando-se tipos de

sistemas costeiros, segundo o clima (tabela 2.1), além de pontos de descarga de rios significativos, de porte médio a grande (tabela 2.2).

Tipo de Costa	Tamanho do Grão	Concentrações Parciais de Sedimentos Remobilizados			Porcentagens Ajustadas	
		col.3 1992 - 93	col.4 1993 - 94	col.5 1994 - 95	col.6 A	col.7 B
Mar do Norte	ARG (0.01m)			>10%, <=50%	2	5
	SLT (0.1mm)			>10%, <=50%	3	5
	AFN (0.5mm)			>10%, <=50%	25	20
	AMD (1mm)			>10%, <=50%	40	40
	AGR (2mm)			>1%, <=10%	30	30
Labrador	ARG (0.01m)			>10%, <=50%	2	5
	SLT (0.1mm)			>1%, <=10%	3	5
	AFN (0.5mm)			>1%, <=10%	25	20
	AMD (1mm)			>1%, <=10%	40	40
	AGR (2mm)			<1%	30	30
Alasca	ARG (0.01m)			>10%, <=50%	5	2
	SLT (0.1mm)			>10%, <=50%	5	3
	AFN (0.5mm)			>1%, <=10%	20	25
	AMD (1mm)			>1%, <=10%	40	40
	AGR (2mm)			<1%	30	30
Complexo Recifal	ARG (0.01m)	>10%, <=50%	>1%, <=10%	>1%, <=10%	79	43
	SLT (0.1mm)	>1%, <=10%	>1%, <=10%	<=1%	16	43
	AFN (0.5mm)	<=1%	0,01	<=1%	2	6
	AMD (1mm)	<=1%	0,01	0,01	1	4
	AGR (2mm)	<=1%	0,01	0,01	1	4

Tabela 2.1: Exemplos de Concentrações Parciais em Sistemas Costeiros.

Tipo de Rio	Tamanho do Grão	Concentrações Parciais de Sedimentos Remobilizados			Porcentagens Ajustadas	
		col.3 1992 - 93	col.4 1993 - 94	col.5 1994 - 95	col.6 A	col.7 B
São Francisco	ARG (0.01m)	>10% <=50%	>10% <=50%	>10% <=50%	79	72
	SLT (0.1mm)	>1%, <=10%	>1%, <=10%	>1%, <=10%	16	7
	AFN (0.5mm)	<=1%	<=1%	>1%, <=10%	2	7
	AMD (1mm)	<=1%	<=1%	<=1%	2	7
	AGR (2mm)	<=1%	<=1%	<=1%	1	7
Amazonas	ARG (0.01m)	>50%, <100%	>50%, <100%	>50%, <100%	79	58
	SLT (0.1mm)	>10%, <=50%	>10%, <=50%	>10%, <=50%	16	29
	AFN (0.5mm)	>1%, <=10%	>1%, <=10%	>10%, <=50%	2	6
	AMD (1mm)	>1%, <=10%	<=1%	>1%, <=10%	2	6
	AGR (2mm)	<=1%	<=1%	>1%, <=10%	1	1
Orinoco	ARG (0.01m)	>50%, <100%	>50%, <100%	>50%, <100%	79	50
	SLT (0.1mm)	>10%, <=50%	>10%, <=50%	>10%, <=50%	16	25
	AFN (0.5mm)	>1%, <=10%	>1%, <=10%	>10%, <=50%	2	23
	AMD (1mm)	>1%, <=10%	0,01	<=1%	2	1
	AGR (2mm)	<=1%	0,01	<=1%	1	1
Foz do Ganges (Índia)	ARG (0.01m)	>50%, <100%	>50%, <100%	>50%, <100%	79	62
	SLT (0.1mm)	>10%, <=50%	>10%, <=50%	>10%, <=50%	16	31
	AFN (0.5mm)	>1%, <=10%	>1%, <=10%	>1%, <=10%	2	6
	AMD (1mm)	<=1%	<=1%	<=1%	2	1
	AGR (2mm)	<=1%	<=1%	<=1%	1	1

Tabela 2.2: Descarga Sedimentar Total.

Posteriormente, a partir desses pontos, foram obtidas as porcentagens referentes às concentrações parciais de sedimentos em suspensão, correspondentes a cinco frações granulométricas: argila, silte, areia fina, média e grossa. Cabe ressaltar que os mapas fornecem a percentagem da fração que entra em suspensão, devido a remobilização dos sedimentos de fundo, ocasionada pela energia das ondas influenciadas pelo clima (tempestades). Por esse motivo o somatório das

concentrações parciais originais (Tabelas 2.1 e 2.2 – colunas 3, 4 e 5) não totalizam os 100%. A aproximação adotada (colunas 6, 7 e 8) foi obtida através da simples proporcionalidade entre o total obtido e os 100%.

Region col.1	Coast col.2	Drainage Area (million Km ²) col.4	Sediment Discharge (million tons/year) col.5
North America	US Atlantic Coast	0,74	~ 13
	Gulf Coast	4,5	~ 256
	S. Alaska (glacial)	0,34	~ 340
	N.NE Canada	3,73	~ 30
South America	Northwest	0,3	~ 150
	Magdalena	0,24	~ 220
	Eastern	3	~ 28
	Southern	4,38	~ 154
Europe	Alpine	0,55	~ 66
Asia	Yellow (Huangho)	0,77	1080
	SE Asia and Himalayas	3,93	3128
Africa	West	6,86	~ 113
	Nile	2,16	~ 0
Australia	East / North	2,2	~ 62

Tabela 2.3: Descarga Sedimentar em Sistemas Costeiros (adaptado de Hansen & Poulain, 1996 e Harris & Coleman, 1998).

Foram elaboradas, ainda, tabelas de descarga sedimentar na desembocadura de rios significativos e ao longo das plataformas rasas das mesmas regiões costeiras citadas anteriormente (Tabelas 2.3 e 2.4). Os valores de descarga inicialmente obtidos foram calculados com dimensional de massa/tempo (milhões de toneladas/ano). A conversão para volume/tempo foi feita através da Tabela 2.5.

Region col.1	River col.2	Sediment Discharge (million tons/year)			
		col.4	col.5	col.6	Average
North America	Colorado (México)	135	135	~ 0.1	135
	Copper (Alaska)			70	70
	Mississ. (+Atchafalaya)	500	349	210 ~	350
South America	Magdalena (Colomb.)	~	~	220	220
	Orinoco (Venez.)	~ 86	~ 86	210	130
	Amazon (Brazil)	496	354	900	600
	San Francisco (Brazil)	~	~	~ 6	6
	La Plata (Argentina)	129	~ 82	~ 92	100
Europe	Rhone (France)	~ 31	~	~ 10	20
	Po (Italy)	~ 18	~ 15	~ 15	15
	Danube (Romania)	~ 67	~ 19	~ 67	67
Asia	Mekong (Vietnam)	170	170	160	170
	Indus (Pakistan)	435	440	100	320
	Ganges/Brahmaputra (Bang.)	2180	2180	1670	2000
Africa	Yellow (Huangho) (China)	1890	1890	1080	1600
	Nile (Egypt)	110	111	~ 0	100
	Niger (Nigeria)	~ 67	~ 4	~ 40	40

Tabela 2.4: Descarga Sedimentar de rios significativos (adaptado de Hansen & Poulain, 1996 e Harris & Coleman, 1998).

DESCARGA VOLUMÉTRICA POR FRAÇÃO SEDIMENTAR														
Tipo de Rio / Costa	Descarga Sedimentar Total (milhões ton/ano)	Concentrações Parciais de Sedimentos (%)					Descargas Volumétricas (milhões de Km ³ /ano)					Valores Finais		
		ARG	SLT	AFN	AMD	AGR	ARG	SLT	AFN	ARM	AGR	ARG	SLT	AREIA
São Francisco	220	72	7	7	7	1	59	6	6	6	1	59	6	12
		79	16	2	2	1	65	13	2	2	1	65	13	4
Amazonas	600	45	23	22	5	5	101	52	50	11	11	101	52	72
		58	29	6	6	1	130	66	14	14	2	130	66	29
		79	16	2	2	1	177	36	5	5	2	177	36	11
Orinoco	100	50	25	23	1	1	19	9	9	0	0	19	9	9
		79	16	2	2	1	29	6	1	1	0	29	6	2
Ganges (Índia)	2180	62	31	6	1	1	504	255	49	8	8	504	255	66
		79	16	2	2	1	643	132	16	16	8	643	132	41
Austrália	60	43	43	6	4	4	10	10	1	1	1	10	10	3
		79	16	2	2	1	18	4	0	0	0	18	4	1
Mar do Norte	40	32	17	17	17	17	5	3	3	3	3	5	3	8
		56	11	11	11	11	8	2	2	2	2	8	2	5
Labrador	40	56	11	11	11	11	8	2	2	2	2	8	2	5
		72	7	7	7	7	11	1	1	1	1	11	1	3
Alasca	40	39	19	19	19	4	6	3	3	3	1	6	3	6
		62	12	12	12	2	9	2	2	2	0	9	2	4
DADOS DE DENSIDADE (g/cm ³)		Argila	2,68		Fontes : Hansen & Poulain (1996) e Harris & Coleman (1998)									
		Silte	2,65											
		Areia	2,65											

Tabela 2.5: Composição percentual de Sedimentos.

A Tabela 2.5 foi incorporada no STENO e é com ela que o usuário irá estimar o volume de sedimentos ao longo da linha de costa.

No próximo capítulo, serão mostradas as soluções numéricas adotadas para efetuar o transporte e deposição dos sedimentos.

3

Transporte e Deposição dos Sedimentos

Como descrito nos capítulos anteriores o algoritmo proposto neste trabalho consiste em uma combinação dos principais processos geológicos (subsidência, eustasia e aporte de sedimentos) com os resultados obtidos de uma análise numérica de fluxo bidimensional de um fluido incompressível, em regime permanente, não-viscoso, em função da batimetria da região a ser modelada. Esta análise como será visto, é fundamental para efetuar o transporte e/ou deposição dos sedimentos durante a simulação.

Este capítulo mostra os procedimentos computacionais do algoritmo proposto, implementados no STENO. A figura 3.1 mostra as principais etapas da simulação. Inicialmente é descrita a modelagem do embasamento e das modificações do mesmo ao longo da simulação a partir das curvas de subsidência. Em seguida é mostrada a metodologia utilizada para determinação o campo de velocidades em cada passo da simulação. Depois são definidas as soluções numéricas para determinar a trajetória do fluxo de sedimentos e a distribuição dos sedimentos no momento da deposição. É mostrado também como a compactação foi considerada no sistema STENO.

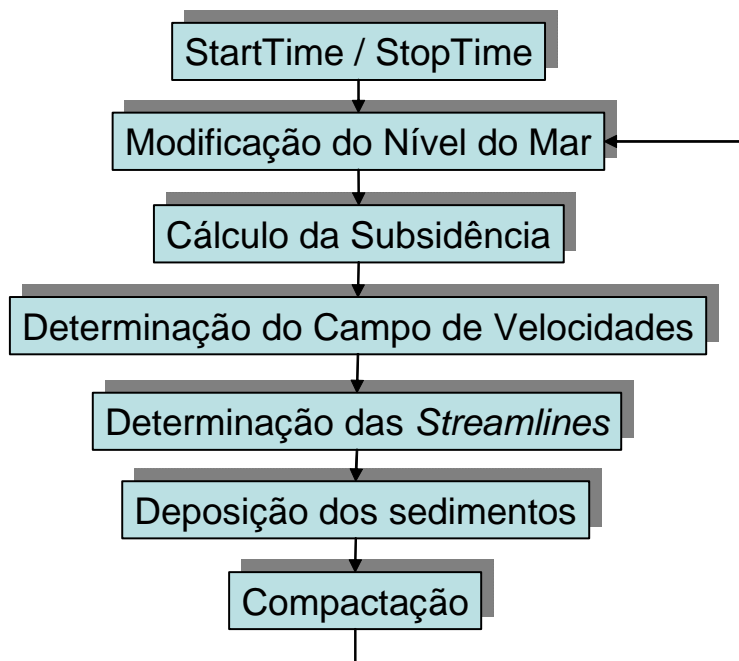


Figura 3.1: Algoritmo utilizado no STENO, proposto neste trabalho.

3.1

Modelo Digital de Terreno (MDT)

Para iniciar a simulação, o usuário deve definir uma superfície inicial, chamada de embasamento. No STENO, esta superfície é representada por um Modelo Digital de Terreno (MDT). Um MDT pode ser representado por equações analíticas ou por pontos na forma de um *grid* regular ou irregular. Neste trabalho será utilizado um *grid* regular, pois o mesmo permite extrapolar a superfície estimada para além dos limites da área amostrada, apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do *grid* e possui uma estrutura de dados simples. No STENO, o embasamento é definido pelo usuário através de um arquivo texto com todos os pontos da superfície no formato (x,y,z) ou através de um arquivo texto com a definição de alguns pontos da superfície. O restante dos pontos é definido utilizando uma representação matemática da distribuição espacial da subsidência. Como já descrito no capítulo 2, ao longo da simulação a subsidência modificará a região a ser modelada e como ela é definida somente em alguns pontos do modelo também serão necessários novos MDT's para gerar as novas superfícies (figura 3.2).

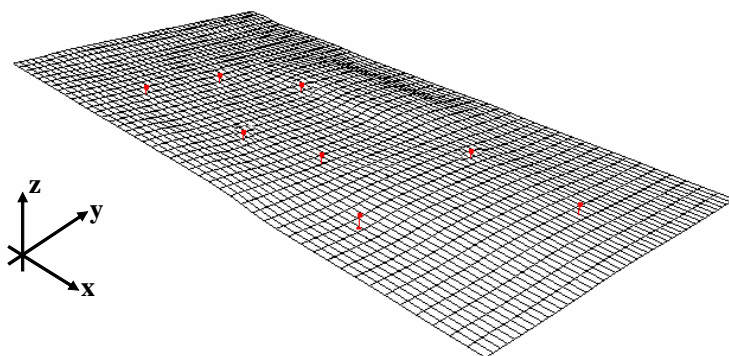


Figura 3.2: Região que será modelada e pontos em vermelho, com valores da subsidência ou pontos do embasamento conhecidos.

O espaçamento do *grid*, isto é, a resolução em x e y , deve ser idealmente menor ou igual à menor distância entre duas amostras com cotas diferentes. Ao se gerar um *grid* muito refinado (denso), existirá um maior número de informações sobre a superfície analisada necessitando maior tempo para sua geração. Ao contrário, considerando distâncias grandes entre os pontos, será criado um *grid*

que pode acarretar perda de informações (Felgueiras, 1987). No STENO, a resolução da superfície que será estimada e as dimensões da mesma, pode ser qualquer valor ou o menor retângulo que contiver os pontos conhecidos.

Definido o tamanho, a resolução e conseqüentemente as coordenadas x e y de cada ponto do *grid*, pode-se utilizar um dos métodos de interpolação descritos abaixo para calcular o valor aproximado da subsidência nos pontos do *grid*.

Os métodos de interpolação para confecção de superfícies podem ser classificados em (Landim, 2000).

Globais: são interpolações onde existe uma função que é utilizada em toda a região a ser modelada. Geralmente utiliza-se uma função polinomial bi-dimensional para aproximar a superfície. A adição e remoção de um valor terão conseqüências no domínio de definição da função. É muito utilizado quanto existe uma hipótese de como é a tendência da superfície a ser modelada.

Locais: são interpolações onde o algoritmo se repete em subconjuntos do conjunto total de pontos, e uma alteração de um valor afeta localmente os pontos próximos ao mesmo. Dentro desses métodos de interpolação pode-se destacar o Método do Inverso da Potência das Distâncias (IPD) (Landim, 2000) que foi utilizado neste trabalho.

O IPD é um método de interpolação local, determinístico e exato, comumente utilizado em Sistemas de Informação Geográfica (*SIG*) para geração de mapas a partir de dados pontuais. Consiste em obter as cotas do *grid* pela média ponderada das amostras. Os pesos devem levar em conta a pouca influência dos pontos mais distantes na determinação das grandezas desconhecidas, ou seja, o peso é utilizado como sendo o inverso da distância do ponto (x, y) de que se quer obter o valor da subsidência a uma das amostras. O valor estimado da grandeza é dado pela eq. 3.1. Para os pontos pertencentes ao conjunto de amostras, utiliza-se a eq. 3.3. Isso evita erros de interpolação para valores pré-existentes.

$$z(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (3.1)$$

$$h_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3.2)$$

$$z(x, y) = z_i \quad (3.3)$$

Onde:

$z(x, y)$ - valor interpolado para o nó do *grid*;

z_i - valor da subsidência da amostra i ;

h_{ij} - distância entre o nó do *grid* e o ponto da amostra i . É calculado pela eq. (3.2);

β - expoente de ponderação;

n - número de amostras utilizadas para interpolar cada nó do *grid*.

O valor do expoente de ponderação é muito importante, pois pode gerar superfícies altamente tendenciosas a favor dos pontos mais próximos e superfícies onde o peso é praticamente o mesmo para todos os pontos do *grid*. Geralmente o valor do expoente é igual a 2 unidades, e quando isso acontece o Método é chamado de Inverso do Quadrado da Distância (IQD). Este foi o Método implementado no STENO para estimar a superfície do embasamento e suas modificações ao longo do processo devido à subsidência. No STENO, o usuário deverá definir como cada ponto conhecido evoluirá durante a simulação, isto é, cada ponto estará associado a uma curva de subsidência (figura 3.3). Como foi dito no capítulo 2, as curvas de subsidência são curvas que mostram a variação da profundidade (km) ao longo do tempo (Ma). A tabela 3.1 mostra um exemplo das curvas de subsidência da Bacia de Campos.

Logo, para avaliar o quanto cada ponto será modificado durante a simulação adotou-se o seguinte procedimento (que foi implementado no STENO):

- a) Para cada passo da simulação, procurar na curva de subsidência em que intervalo se encontra o tempo, em (Ma), da simulação;
- b) Calcular a taxa de subsidência utilizando a fórmula:

$$taxa = \frac{D_f - D_i}{I_f - I_i}$$

Onde:

I_f é o valor da idade imediatamente acima da idade atual da simulação;

I_i é o valor idade imediatamente abaixo da idade atual da simulação;

D_f é o valor da profundidade correspondente a idade imediatamente acima da idade atual da simulação;

D_i é o valor da profundidade correspondente a idade imediatamente abaixo da idade atual da simulação;

Taxa é a taxa de subsidência em km/Ma.

Curva de Subsidência de Campos	
Idade (Ma)	Profundidade (km)
-150	0
-130	1450
-126	1725
-123	2100
-116	2110
-100	2190
-70	2200
-53	2240
-49	2480
-40	2800
-25	2940
-13	3030
-10	3170
0	3220

Tabela 3.1: Tabela utilizada para montar uma curva de subsidência da Bacia de Campos.

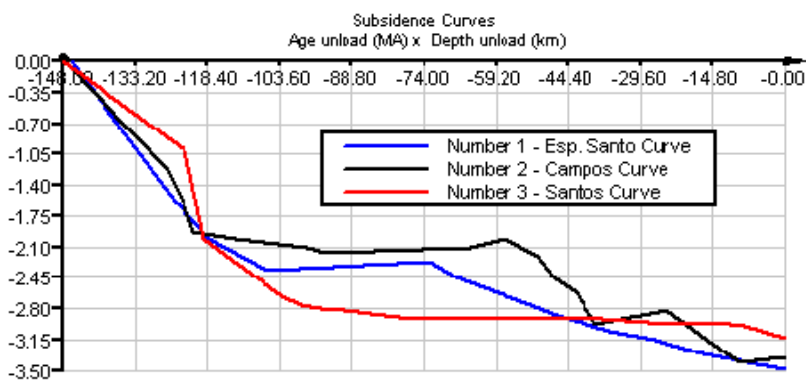


Figura 3.3: Curvas de subsidência disponíveis no STENO.

Com isso, os novos pontos serão modificados pelos valores interpolados nas curvas de subsidência e a nova superfície será gerada utilizando o Método IQD.

As figuras abaixo mostram superfícies geradas a partir de um conjunto de pontos definido pelo usuário. A figura 3.4 mostra um *grid* de 35x35 células. A figura 3.5 indica um *grid* de 45x 45 células. A figura 3.6 mostra um *grid* de 40x40 células.

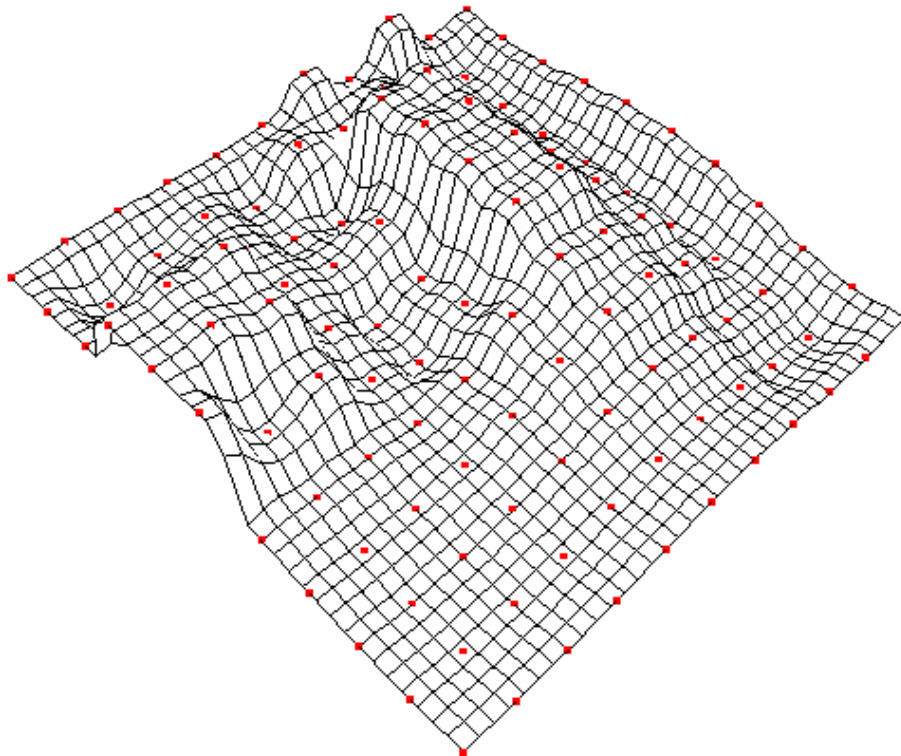


Figura 3.4: *Grid* de 35x35 células gerado pelo Método do Inverso do Quadrado da Distância.

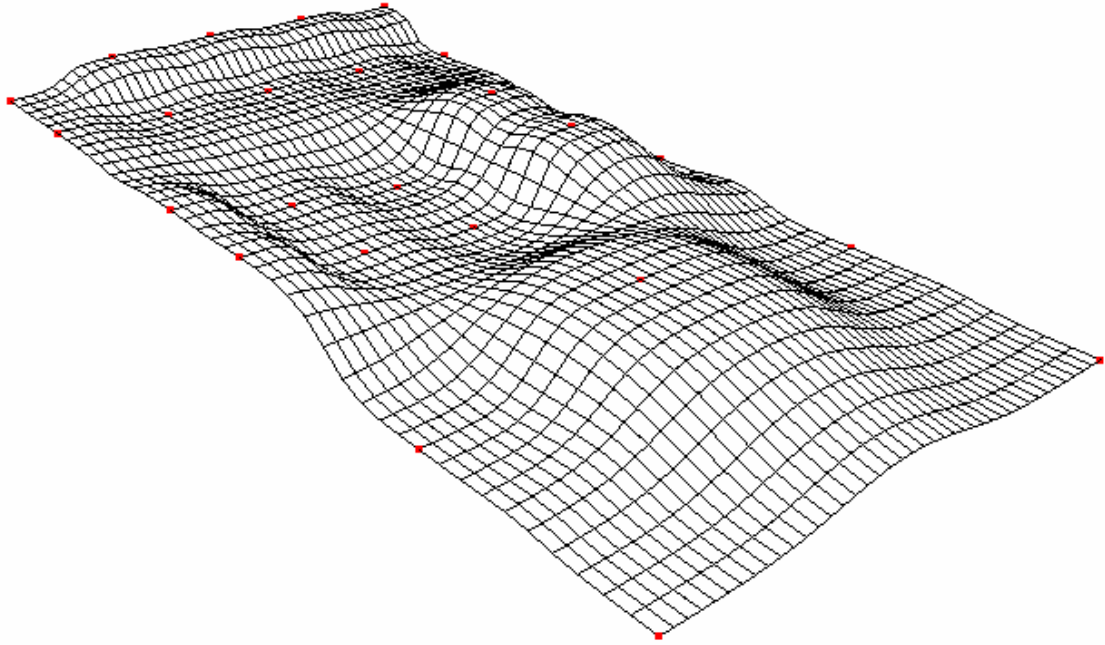


Figura 3.5: *Grid* de 45x45 células gerado pelo Método do Inverso do Quadrado da Distância.

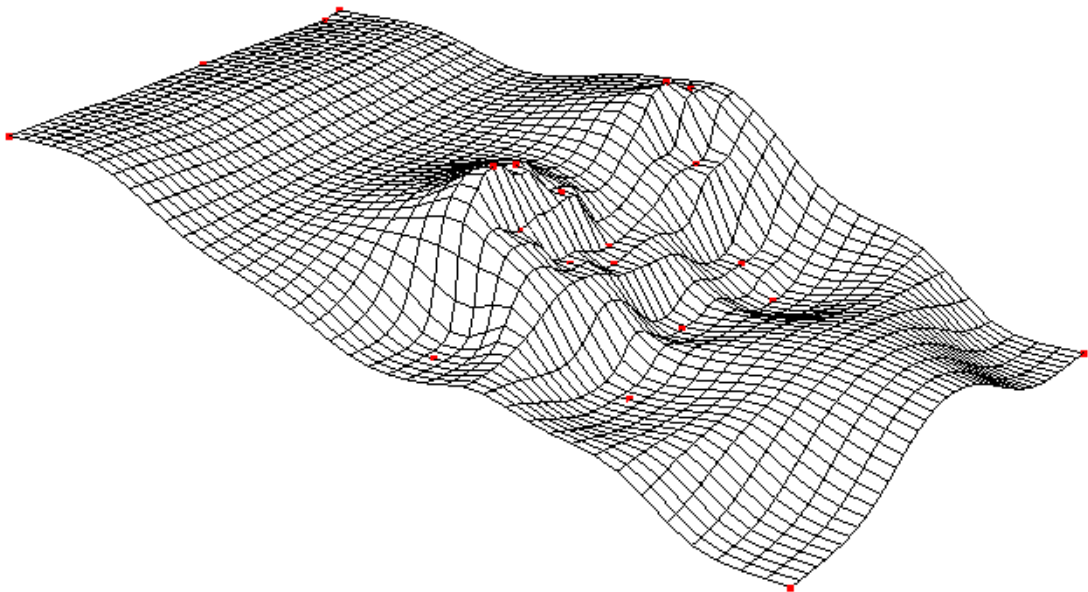


Figura 3.6: *Grid* de 40x40 células gerado pelo Método do Inverso do Quadrado da Distância.

3.2

Princípios Gerais dos Movimentos dos Fluidos

O estudo dos movimentos dos fluidos é uma atividade que vem sendo desenvolvida há séculos. O objetivo inicial era estudar o comportamento dos fluidos de forma experimental (mecânica dos fluidos). Posteriormente, surgiu a necessidade de estabelecer relações entre os movimentos dos fluidos e as forças que causam esse movimento. A disciplina que tenta estabelecer essas relações é chamada de hidrodinâmica. Segundo a hidrodinâmica, o movimento de um fluido ficará determinado se, em qualquer instante t , forem conhecidas a grandeza e a direção da velocidade \vec{v} , relativa a qualquer ponto, ou seja, conhecer as componentes de velocidade (u, v, w) segundo os três eixos de referência (x, y e z).

Vários estudos e descrições matemáticas foram formulados para tentar resolver esse problema. A primeira tentativa de deduzir as equações que descrevem os movimentos dos fluidos foi feita por Leonard Euler, considerado como um dos fundadores da hidrodinâmica. Porém, somente no século XIX o estudo ganhou força com o desenvolvimento das equações de *Navier - Stokes*, a partir dos trabalhos pioneiros dos franceses Claude Navier (1822) e Simeon Poisson (1829) e do inglês George Stokes (1845) (Fortuna, 2000).

3.2.1

Formulação

A dedução das equações que governam os movimentos dos fluidos, no contexto deste trabalho, pode ser inicialmente feita considerando uma área elementar, com as forças atuantes nas faces opostas, situado no interior da massa de um fluido em movimento, como mostra a figura 3.7.

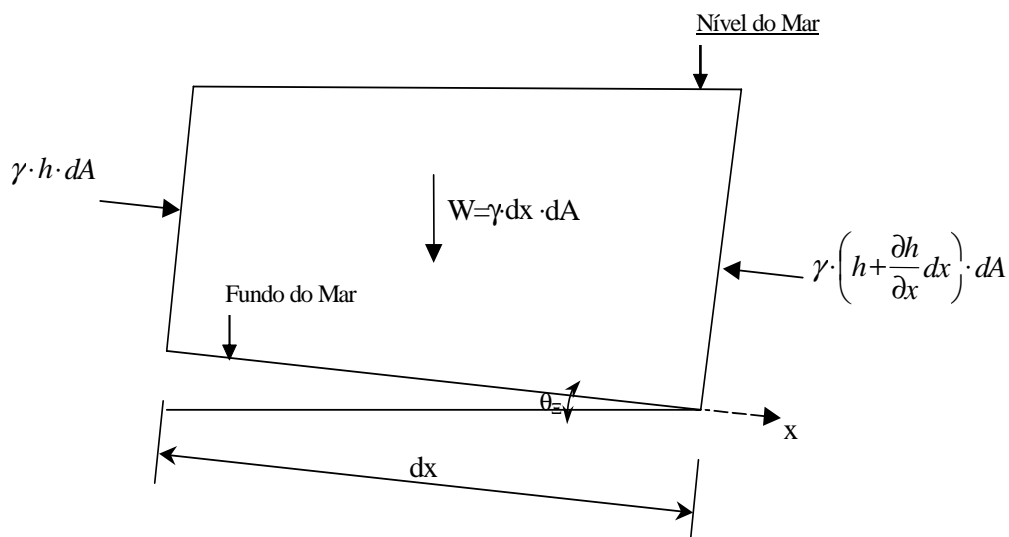


Figura 3.7 – Área elementar para a dedução das equações que governam os movimentos dos fluidos.

As forças atuantes nessa área elementar são:

- Peso do fluido;
- Pressões atuantes nas faces.

Essas equações são definidas por expressões matemáticas dos seguintes princípios físicos:

- Conservação da massa (equação da continuidade);
- Segunda lei de Newton (equação do movimento);
- Conservação da Energia (primeira lei da termodinâmica).

Neste trabalho será considerado um problema de escoamento de fluido bidimensional, uma vez que o transporte de sedimentos será efetuado apenas nas direções x e y (direções de marés e correntes) e como não será considerada a variação de temperatura durante a simulação a equação decorrente desse princípio (primeira lei da termodinâmica) não será usada na formulação do problema.

Será admitido um escoamento incompressível e com tensões viscosas muito pequenas, uma vez que o transporte será efetuado quase que totalmente submerso no mar tornando um fluido quase sem viscosidade. Desse modo o problema será descrito somente pelas equações da continuidade e do movimento.

Definida a área elementar e as forças e tensões atuantes, pode-se utilizar as simplificações e os princípios físicos mostrados acima para descrever o movimento do fluido.

3.2.2

Equação do Movimento

Sabe-se que a pressão hidrostática de um fluido é dada por:

$$P = -\gamma \cdot h \quad (3.4)$$

e que pressão é definida por

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.5)$$

Devido a este fato, pode-se considerar a força que atua em uma das faces da porção de fluido como:

$$F = \gamma \cdot h \cdot dA \quad (3.6)$$

Onde:

γ = peso específico;

h = altura do fluido;

dA = área em que o fluido está atuando;

Na outra face tem-se a mesma força mais um incremento. Pode-se então aplicar a segunda Lei de Newton, na direção x:

$$\sum F_x = m \cdot a \quad (3.7)$$

As forças que atuam na direção do eixo x são as devido a pressão e a componente do peso nesta direção:

$$\sum F_x = \gamma \cdot h \cdot dA - \gamma \cdot \left(h + \frac{\partial h}{\partial x} dx \right) \cdot dA - \gamma \cdot dx \cdot dA \cdot \text{sen} \theta_x = m \cdot a \quad (3.8)$$

Sabe-se que a massa é definida pela eq. (3.9) onde ρ é massa específica do fluido.

$$m = \rho \cdot dx \cdot dA \quad (3.9)$$

A aceleração pode ser definida utilizando o conceito de derivada substantiva, também chamada de derivada material ou total (Fortuna, 2000). A figura 3.8 mostra um elemento de fluido que se desloca com o escoamento entre os pontos 1 e 2 em um intervalo de tempo Δt . No caso geral de um escoamento transiente, a velocidade depende das coordenadas espaciais e temporal do elemento fluido. Admitindo que no ponto 1 o elemento de fluido tem coordenadas espaciais (x_1, y_1) e temporal t_1 e que no ponto 2 essas coordenadas são (x_2, y_2) e t_2 , respectivamente. As velocidades valem $u_1 = u(x_1, y_1, t_1)$ e $u_2 = u(x_2, y_2, t_2)$.

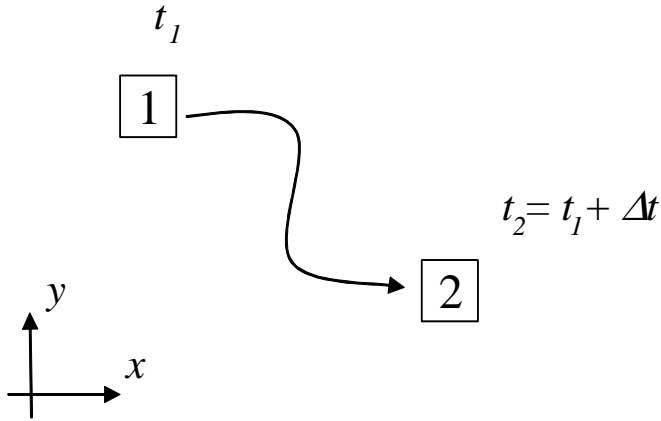


Figura 3.8: Elemento de fluido se deslocando com o escoamento (adaptado de Fortuna, 2000).

Para determinar como a velocidade varia em função das coordenadas espaciais e temporal do elemento fluido, deve-se expandir u_2 em série de Taylor (até os termos de primeira ordem) em torno de u_1 . Logo, tem-se:

$$u_2 \approx u_1 + (x_2 - x_1) \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_1 + (y_2 - y_1) \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_1 + (t_2 - t_1) \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_1 \quad (3.10)$$

Dividindo a expressão anterior por $t_2 - t_1$, tem-se

$$\frac{u_2 - u_1}{t_2 - t_1} \approx \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_1 + \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_1 + \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_1 \quad (3.11)$$

O termo da esquerda na eq. (3.11) indica que o lado direito da mesma equação fornece a variação média da densidade do elemento de fluido entre os instantes 1 e 2. Considerando agora o limite $t_2 \rightarrow t_1$, tem-se a variação instantânea da densidade do elemento de fluido, confirme ele passa pelo ponto 1.

$$\lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{u_2 - u_1}{t_2 - t_1} = \frac{Du}{Dt} \quad (3.12)$$

No lado direito da eq. (3.11) a aplicação do limite fornece

$$\lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = u \quad \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} = v \quad (3.13)$$

que são os valores instantâneos das componentes da velocidade no ponto 1.

Finalmente, no limite $t_2 \rightarrow t_1$, pode-se escrever:

$$a = \frac{Du}{Dt} = u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.14)$$

A eq. (3.14) é chamada de derivada substantiva, material ou total.

Admitindo que o fluxo é permanente, o termo $\frac{du}{dt}$ pode ser desprezado,

logo a eq. (3.14) para fluxo permanente é

$$a = u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.15)$$

Substituindo as eqs. (3.9 e 3.15) na eq. (3.7), tem-se:

$$\gamma \cdot h \cdot dA - \gamma \cdot \left(h + \frac{\partial h}{\partial x} dx \right) \cdot dA - \gamma \cdot dx \cdot dA \cdot \text{sen } \theta_x = \rho \cdot dx \cdot dA \cdot \left[u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (3.16)$$

Sabendo que o peso específico é dado por:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (3.17)$$

onde g é a aceleração da gravidade, pode-se substituir a eq. (3.17) na eq. (3.16), e fazendo algumas simplificações chega-se a equação do movimento para a direção x .

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \text{sen } \theta_x + \frac{u}{g} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{g} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (3.18)$$

Analogamente para a direção y :

$$\frac{\partial h}{\partial y} + \text{sen } \theta_y + \frac{u}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.19)$$

3.2.3

Equação da Continuidade

Na figura 3.9, tem-se a componente da velocidade na direção x e a altura de fluido dada por h . Na face oposta, tem-se a mesma velocidade mais o seu incremento e a altura mais seu incremento. Como a vazão que entra na área elementar é igual à vazão que sai, tem-se:

$$Q_{entra} = Q_{sai} \quad (3.20)$$

Sabendo que:

$$Q_{entra} = uh \quad (3.21)$$

$$Q_{sai} = \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) \left(h + \frac{\partial h}{\partial x} dx \right) \quad (3.22)$$

Substituindo as eqs. (3.20) e (3.21) na eq. (3.22) e fazendo algumas simplificações ignorando os termos de segunda ordem, tem-se:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0 \quad (3.23)$$

Seguindo a mesma seqüência para a direção y, tem-se:

$$\frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3.24)$$

Somando as eqs. (3.23 e 3.24), chega-se a equação da continuidade:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3.25)$$

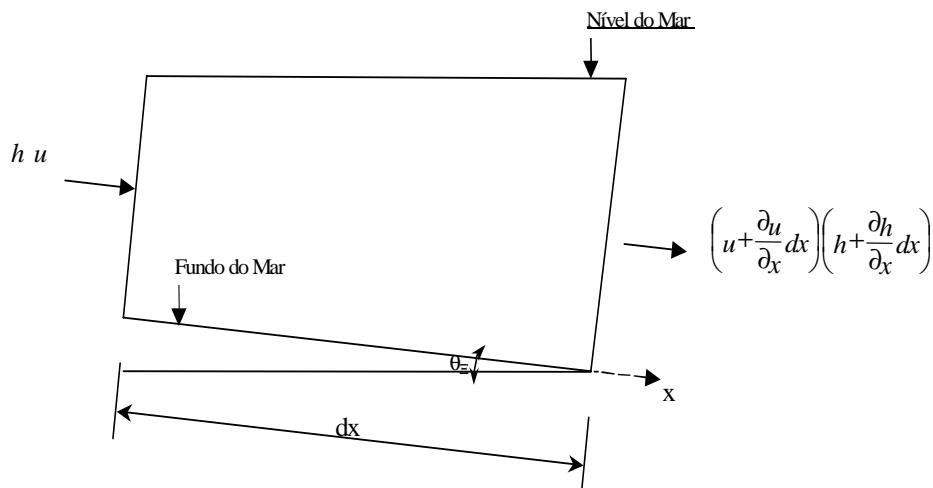


Figura 3.9 – Área elementar para dedução da equação da continuidade.

Se as derivadas da eq. (3.25) foi expandida, chega-se à equação:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{h} \left(u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (3.26)$$

As eqs. (3.18), (3.19) e (3.26), são as equações que descrevem o movimento dos fluidos no contexto presente.

3.2.4

Discretização

Combinando as eqs (3.18), (3.19) e (3.26), chega-se à eq. (3.27), chamada equação de Poisson. Esta é uma equação diferencial parcial elíptica escrita em coordenadas Cartesianas. Em geral, equações desse tipo representam problemas de equilíbrio, onde a propriedade de interesse não se altera com o passar do tempo.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = f(x, y) \quad (3.27)$$

Na eq. (3.27) $f(x, y)$ é a cota do fundo da região que está sendo analisada e ϕ é o potencial de velocidade do fluxo. O potencial de velocidade do fluxo se relaciona com as componentes de velocidades através das eqs. (3.28) e (3.29).

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3.28)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (3.29)$$

As declividades são consideradas na discretização e calculadas utilizando o esquema de pontos mostrado na figura 3.9 como será visto a seguir.

A solução para esse tipo de problema é obtida especificando condições sobre a variável dependente na fronteira ∂R da região R , em que se quer obter a solução. Problemas que exigem condições ao longo da fronteira (contorno) ∂R de toda a região são denominados de Problemas de Valor de Contorno (PVC).

Neste trabalho foi utilizado o Método das Diferenças Finitas (MDF) para discretizar a equação acima. O MDF foi um dos primeiros métodos numéricos desenvolvidos, sendo aplicado, até na atualidade, a uma extensa gama de problemas. Neste método, utiliza-se uma malha sobre todo o domínio físico do problema, a qual contém determinados pontos onde são efetuadas as aproximações envolvidas. Representações das derivadas em diferenças finitas são baseadas na expansão em série de Taylor, Por exemplo, se $u_{i,j}$ denota a componente x da velocidade no ponto (i, j) , então a velocidade $u_{i+1,j}$ no ponto $(i+1, j)$ pode ser expressa em termos de uma expansão em série de Taylor sobre o ponto (i, j) :

$$u_{i+1,j} = u_{i,j} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i,j} \Delta x + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_{i,j} \frac{\Delta x^2}{2} + \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \right)_{i,j} \frac{\Delta x^3}{6} + \dots \quad (3.30)$$

A eq. (3.30) é matematicamente uma expressão exata se:

- (a) Número de termos é infinito e a série converge
- (b) e / ou $\Delta x \rightarrow 0$

Dessa maneira, para uma solução numérica a eq. (3.30) deve ser truncada. Por exemplo, se os termos de magnitude $(\Delta x)^3$ e termos de ordens mais altas forem desprezados, a eq (3.30) reduz-se a:

$$u_{i+1,j} \cong u_{i,j} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \Delta x + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} \frac{\Delta x^2}{2} \quad (3.31)$$

A equação acima tem acurácia de segunda ordem, porque os termos iguais ou maiores que $(\Delta x)^3$ foram desprezados. Se os termos de ordem $(\Delta x)^2$ e de ordens maiores foram desprezados, tem-se:

$$u_{i+1,j} \cong u_{i,j} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \Delta x \quad (3.32)$$

Nas eqs. (3.31) e (3.32) os termos desprezados representam o erro de truncamento na representação da série finita. Por exemplo, o erro de truncamento para a eq. (3.31) é:

$$\sum_{n=3}^{\infty} \left(\frac{\partial^n u}{\partial x^n}\right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^n}{n!} \quad (3.33)$$

O erro de truncamento pode ser reduzido por:

- (a) Tomando-se mais termos na série de Taylor. Isto leva ao aumento na ordem de acurácia na representação de $u_{i+1,j}$
- (b) Reduzindo-se a magnitude de Δx .

Expandindo em série de Taylor sobre o ponto $(i-1,j)$ para $u_{i+1,j}$ tem-se:

$$u_{i-1,j} = u_{i,j} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} (-\Delta x) + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} \frac{(-\Delta x)^2}{2} + \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_{i,j} \frac{(-\Delta x)^3}{6} + \dots, \text{ ou}$$

$$u_{i-1,j} = u_{i,j} - \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} (\Delta x) + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^2}{2} - \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^3}{6} + \dots \quad (3.34)$$

Subtraindo a eq. (3.34) da eq. (3.30), obtém-se:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2\Delta x} + O(\Delta x)^2 \quad (3.35)$$

Está é a derivada central, com acurácia de segunda ordem, para o ponto (i,j) da primeira derivada. Da mesma forma pode-se obter as expressões em diferenças finitas para derivada parcial de segunda ordem. A eq. (3.36) é a derivada central, com acurácia de segunda ordem, para o ponto (i,j) da segunda derivada. As eqs. (3.37) e (3.38) representam, respectivamente, as aproximações por diferenças finitas da derivada primeira e segundas e elas serão utilizadas para discretizar a eq. (3.27).

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + O(\Delta x)^2 \quad (3.36)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{i,j} = \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2\Delta y} + O(\Delta y)^2 \quad (3.37)$$

$$\left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)_{i,j} = \frac{v_{i+1,j} - 2v_{i,j} + v_{i-1,j}}{(\Delta y)^2} + O(\Delta x)^3 \quad (3.38)$$

Considerando a figura 3.10 como sendo o esquema utilizado para discretizar a eq. (3.27) pelo MDF e substituindo as eqs (3.36) e (3.38) na eq (3.27) tem-se:

$$\frac{(\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1})}{(\Delta x)^2} + \frac{(\phi_{i-1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j})}{(\Delta y)^2} = f(x_i, y_j) \quad (3.39)$$

Simplificando, chega-se a:

$$(\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1})(\Delta y)^2 + (\phi_{i-1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j})(\Delta x)^2 = (\Delta x)^2(\Delta y)^2 f(x_i, y_j) \quad (3.40)$$

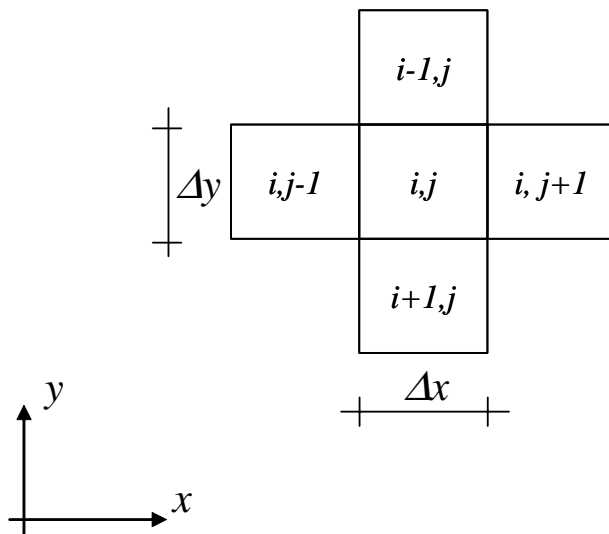
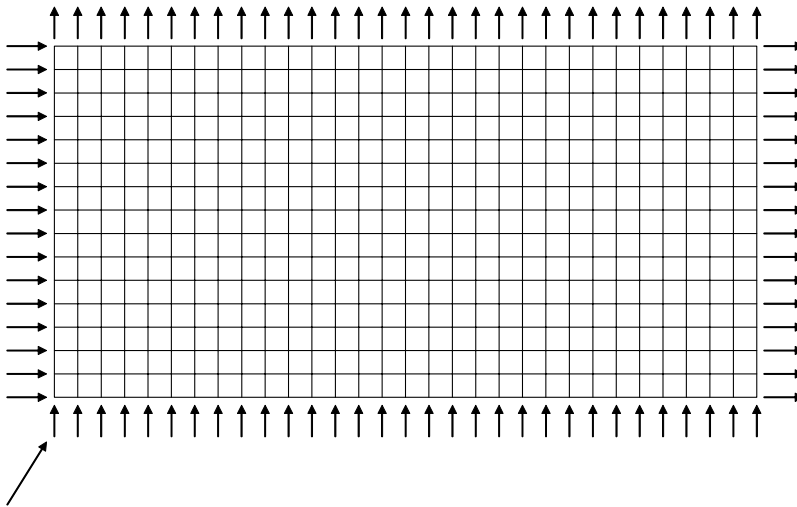


Figura 3.10: Esquema dos pontos utilizados para discretização das equações.

A eq. (3.40) é a equação discretizada que foi utilizada para determinar o potencial de velocidade em todas as células internas do *grid*. A partir do potencial de velocidade, as componentes, u e v , do vetor velocidade em cada célula interna do *grid* são determinadas utilizando as relações abaixo.

É importante observar que, no caso deste trabalho, as condições de contorno não são definidas na forma de potencial de velocidades, mas sim na

forma de um vetor velocidade, como mostra a figura 3.11. Logo, é necessário modificar a eq. (3.40) para considerar a condição de contorno.



Velocidades de contorno

Figura 3.11: Modelo discretizado mostrando as velocidades de contorno.

Considerando a velocidade u como sendo a componente x do vetor velocidade, como mostra a figura 3.12, pode-se discretizar a eq. (3.40) por diferenças finitas e chegando a

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \cong \frac{\phi_{i,j} - \phi_{i,j-1}}{\Delta x} \quad (3.41)$$

Da expressão acima, chega-se,

$$\phi_{i,j-1} = \phi_{i,j} - u\Delta x \quad (3.42)$$

Substituindo na equação (3.40), tem-se,

$$(\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j} - u\Delta x)(\Delta y)^2 + (\phi_{i-1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j})(\Delta x)^2 = (\Delta x)^2(\Delta y)^2 f(x_i, y_j) \quad (3.43)$$

A eq. (3.43) considera as condições de contorno para as células que estão na borda esquerda do *grid* (exceto as do canto). Para as células do lado direito, na borda de cima e na borda de baixo do *grid*, o tratamento das condições de contorno é feito da mesma forma.

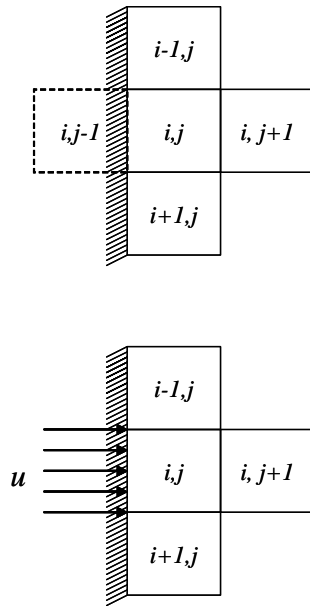


Figura 3.12: Diagrama mostrando o tratamento das condições de contorno das células que estão na borda do modelo discretizado.

Para as células do contorno que estão nos cantos do modelo (figura 3.13), deve-se considerar as componentes de velocidades u e v , ou seja, como foi feito para a velocidade u , a eq. (3.29) pode ser discretizada chegando à forma

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \cong \frac{\phi_{i,j} - \phi_{i-1,j}}{\Delta y} \quad (3.44)$$

Com isso tem-se,

$$\phi_{i-1,j} = \phi_{i,j} - v\Delta y \quad (3.45)$$

Substituindo as eqs (3.42) e (3.45) na eq (3.40) chega-se a,

$$(\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j} - u\Delta x)(\Delta y)^2 + (\phi_{i,j} - v\Delta y - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j})(\Delta x)^2 = (\Delta x)^2(\Delta y)^2 f(x_i, y_j) \quad (3.46)$$

A eq. (3.46) é a equação que considera as condições de contorno para a célula do canto superior esquerdo *grid*. Para as células do canto superior direito, inferior direito e inferior esquerdo do *grid* o tratamento das condições de contorno é feito da mesma forma.

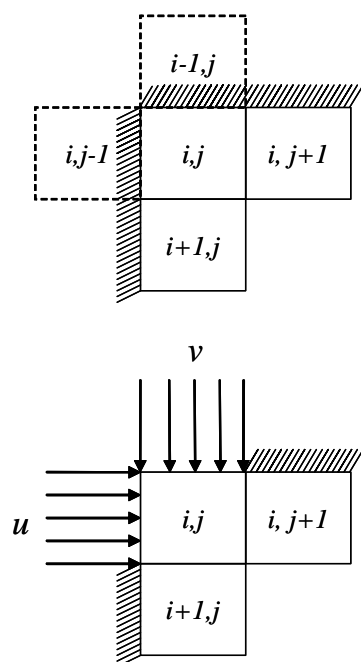


Figura 3.13: Diagrama mostrando o tratamento das condições de contorno das células que estão nos cantos do modelo discretizado.

Desse modo, com as equações discretizadas e as condições de contorno tratadas, tem-se um sistema de equações. Esse sistema forma uma matriz conhecida como pentadiagonal, devido à concentração dos elementos ao longo de cinco diagonais.

A solução desse sistema pode ser obtida por métodos diretos ou iterativos, sendo esse último normalmente empregado devido à matriz de coeficientes ser esparsa, isto é, possuir uma elevada proporção de elementos nulos; em geral, quanto maior a ordem da matriz maior é essa proporção. Detalhes sobre esses métodos podem ser visto em Fortuna, (2000).

Assim, o sistema de equações foi montado e resolvido utilizando o método iterativo de *Gauss-Seidel*. Como resultado foi obtido o potencial de velocidade em todas as células do *grid*. Utilizando as relações (3.28) e (3.29) foram calculadas as componentes do vetor velocidade em cada célula.

A figura 3.14 mostra um exemplo da estratégia implementada. Ela mostra um modelo plano retangular com dimensões 100 km x 300 km e com velocidade constante entrando pela borda esquerda na área discretizada e saindo pela borda direita da área discretizada. Como era previsto, o campo de velocidades calculado se manteve horizontal e paralelo, conforme mostra a figura 3.15.

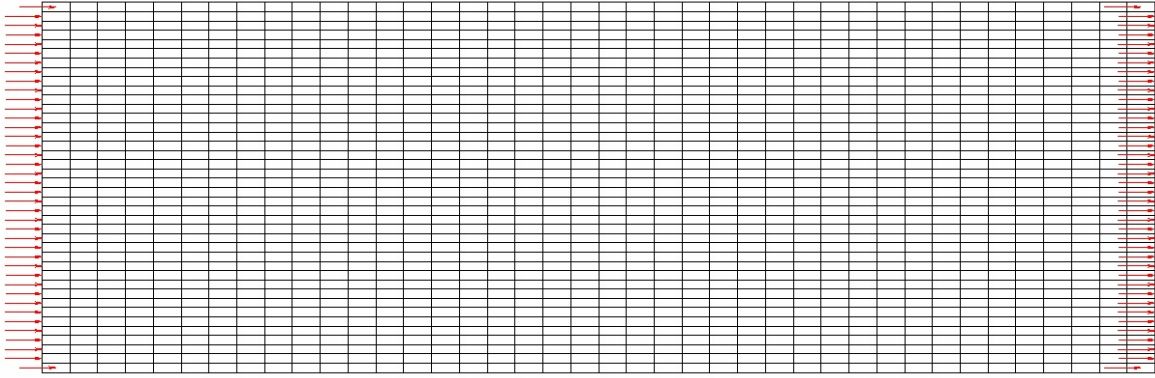


Figura 3.14: Modelo mostrando uma área plana com velocidades constantes nas bordas esquerda e direita.

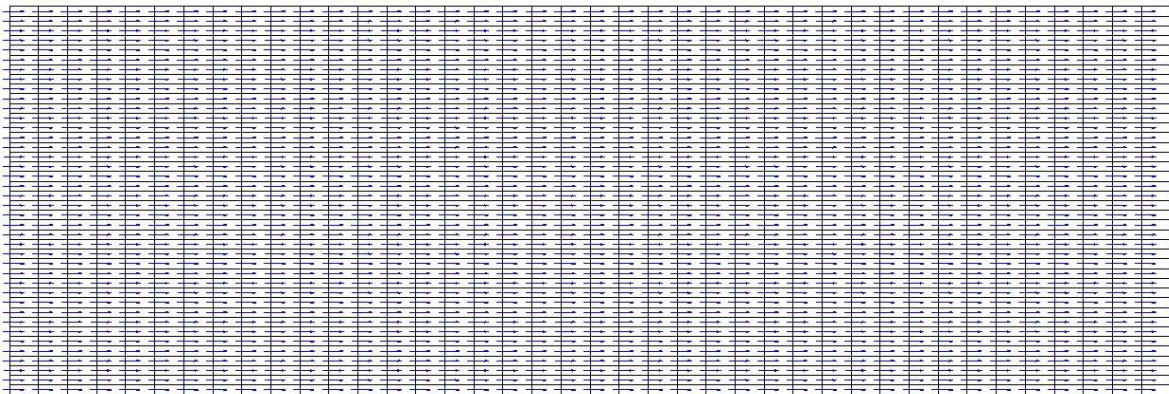


Figura 3.15: Campo de velocidades obtido após a análise.

A figura 3.16 mostra um modelo com batimetria variada. As velocidades de contorno continuam sendo definidas nas bordas esquerda e direita. A figura 3.17 mostra o campo de velocidades obtido da análise.

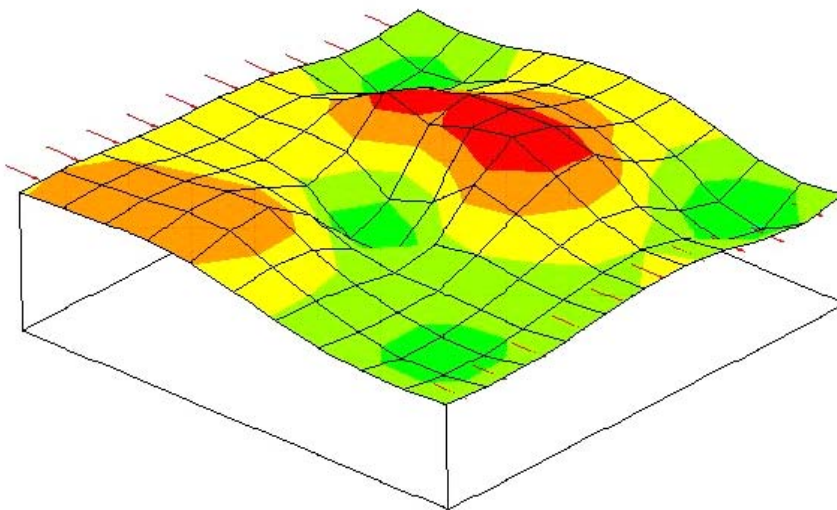


Figura 3.16: Modelo analisado com batimetria variada.

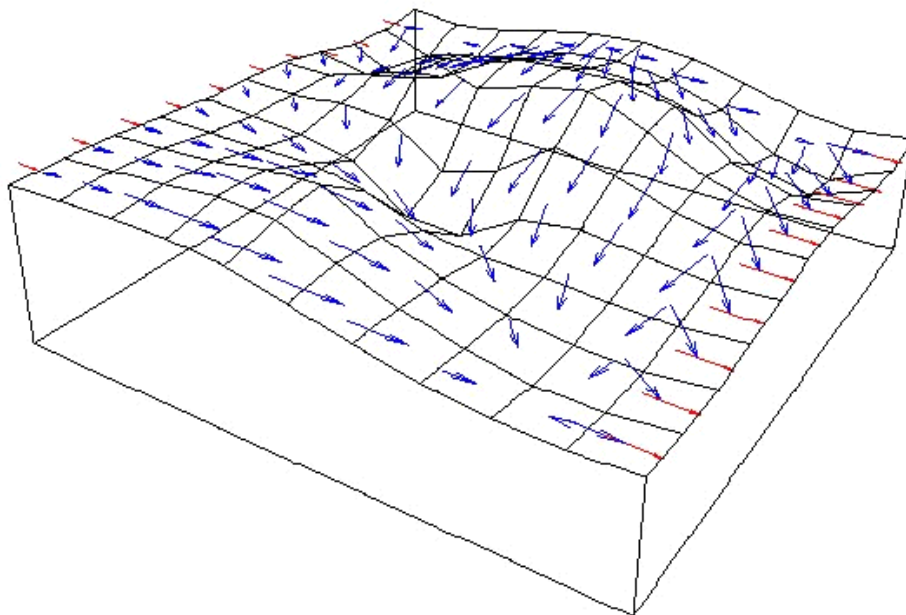


Figura 3.17: Campo de velocidades obtido após a análise do modelo da figura 3.16.

Com o campo de velocidades calculado, o próximo passo é determinar as linhas de fluxo ou linhas de correntes que serão utilizadas para processar o transporte e a sedimentação dos sedimentos.

3.3

Linhas de Correntes - Trajetórias do Fluxo

Com o campo de velocidades determinado, deve-se agora avaliar a trajetória dentro do *grid* por onde os sedimentos serão transportados e/ou depositados. Na visualização e análise de escoamento de fluidos, tornou-se comum, para avaliar essas trajetórias, a utilização de linhas de correntes (Martinez, 1995).

Linhas de correntes são curvas integrais do campo vetorial de velocidade instantânea, que passa por um dado ponto do espaço num dado instante de tempo. Em outras palavras, são linhas tangentes em todos seus pontos ao campo velocidades, num dado instante de tempo. Cada linha de corrente possui o mesmo potencial de velocidade.

A determinação das linhas de correntes consiste em resolver um Problema de Valor Inicial (PVI), onde o valor inicial de cada linha de corrente são as coordenadas (x, y) na borda da região a ser modelada por onde os sedimentos

começam a ser transportados e depositados, como mostra a figura 3.18. Esse ponto inicial (x, y) está associado a um vetor velocidade, que será a velocidade de entrada do fluxo utilizada na análise de escoamento.

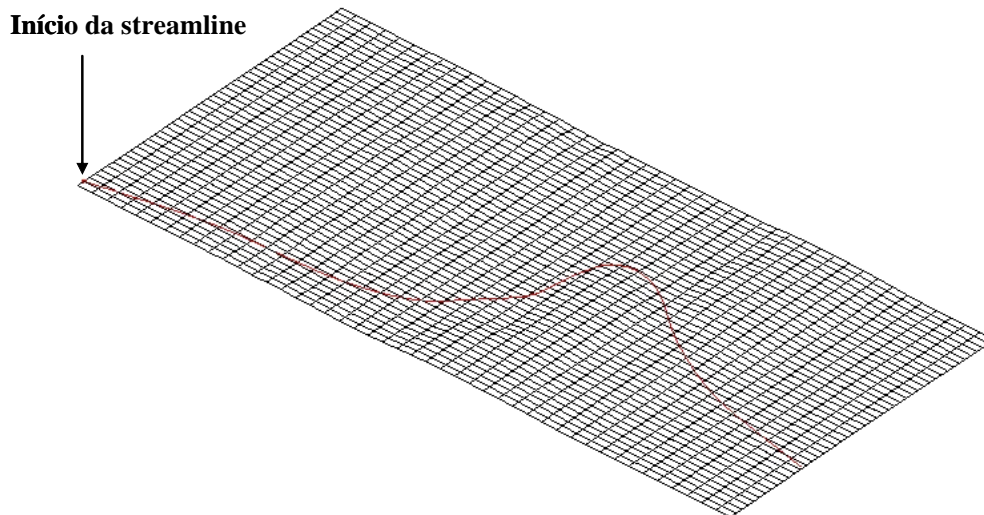


Figura 3.18: Visualização de uma linha de corrente que foi iniciada a partir da borda por onde os sedimentos entraram na superfície da simulação.

Existem diversos métodos numéricos para determinar essas trajetórias (Boyce, 1992). Neste trabalho foi utilizado o método de Runge - Kutta por ser um método de passo único, possuir erros da ordem de h^5 , onde h é o tamanho do passo, e fácil de implementar, combinando muito bem exatidão e simplicidade (Royer, 2001).

Admitindo uma variável qualquer w , onde se conhece o valor w_n e se deseja calcular w_{n+1} que deve ser obtido utilizando uma função $f(t, w)$ caracterizando assim, um problema de PVI que pode ser resolvido utilizando o método de Runge - Kutta que tem a seguinte expressão:

$$w_{n+1} = w_n + \frac{h}{6}(k_{n1} + 2k_{n2} + 2k_{n3} + k_{n4}) \quad (3.46)$$

Onde:

$$\begin{aligned} k_{n1} &= f(t_n, w_n) \\ k_{n2} &= f\left(t_n + \frac{1}{2}h, w_n + \frac{1}{2}k_{n1}\right) \\ k_{n3} &= f\left(t_n + \frac{1}{2}h, w_n + \frac{1}{2}k_{n2}\right) \end{aligned}$$

$$k_{n4} = f(t_n + h, w_n + k_{n3}) \quad (4.47)$$

Como neste trabalho a linha de corrente é definida em um plano, é necessário calcular suas coordenadas x e y para cada ponto. Portanto, deve-se utilizar o método nas duas direções como mostra as eqs. (3.48) e (3.49).

$$x_{n+1} = x_n + \frac{h}{6} [k1(x, y) + 2 * k2(x, y) + 2 * k3(x, y) + k4(x, y)] \quad (3.48)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} [m1(x, y) + 2 * m2(x, y) + 2 * m3(x, y) + m4(x, y)] \quad (3.49)$$

onde:

$k_1(x, y) = v_x(x, y)$ é o valor da componente x do vetor velocidade;

$m_1(x, y) = v_y(x, y)$ é o valor da componente y do vetor velocidade;

$$\begin{aligned} k2(x, y) &= F \left[x + \frac{h}{2} k1(x, y), y + \frac{h}{2} m1(x, y) \right] \\ m2(x, y) &= G \left[x + \frac{h}{2} k1(x, y), y + \frac{h}{2} m1(x, y) \right] \\ k3(x, y) &= F \left[x + \frac{h}{2} k2(x, y), y + \frac{h}{2} m2(x, y) \right] \\ m3(x, y) &= G \left[x + \frac{h}{2} k2(x, y), y + \frac{h}{2} m2(x, y) \right] \\ k4(x, y) &= F \left[x + \frac{h}{2} k3(x, y), y + \frac{h}{2} m3(x, y) \right] \\ m4(x, y) &= G \left[x + \frac{h}{2} k3(x, y), y + \frac{h}{2} m3(x, y) \right] \end{aligned} \quad (3.50)$$

Os valores $v_x(x, y)$ e $v_y(x, y)$ são calculados utilizando uma interpolação linear baricêntrica. Considerando uma célula do *grid* que possui uma propriedade escalar ou vetorial α definida em cada vértice da célula (figura 3.19), a interpolação baricêntrica da propriedade α em qualquer ponto localizado dentro da célula é definido como uma combinação de quatro coeficientes baricêntricos correspondentes a cada vértice da célula de acordo com a seguinte expressão:

$$w(\alpha) = \sum_{\text{vértice}} b[i] w(\alpha_i) \quad (3.51)$$

onde $b[i]$ são os coeficientes baricêntricos da célula. Considerando um sistema de coordenadas paramétricos (u, v) , os valores de $b[i]$ são:

$$(0,0) \quad \rightarrow \quad b[0] = (1 - \xi) * (1 - \eta)$$

$$(1,0) \quad \rightarrow \quad b[1] = \xi * (1 - \eta)$$

$$(0,1) \quad \rightarrow \quad b[2] = (1 - \xi) * \eta$$

$$(1,1) \quad \rightarrow \quad b[3] = \xi * \eta$$

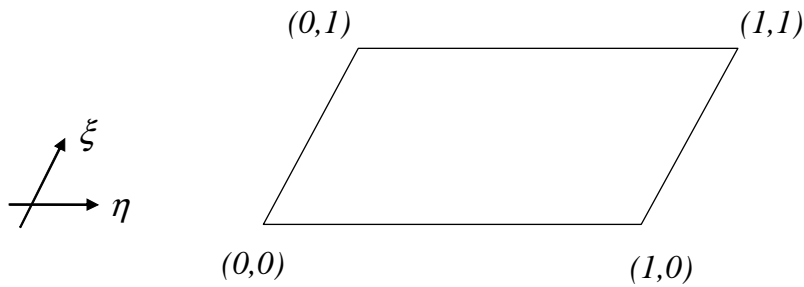


Figura 3.19: Coordenadas dos vértices utilizadas para a interpolação baricêntrica.

No STENO, o número de linhas de correntes do modelo pode ser definido pelo usuário antes do início a simulação (linha de costa). No momento, esse número é definido como sendo o número de células na direção y (linha de costa) menos um como mostra a figura 3.20.

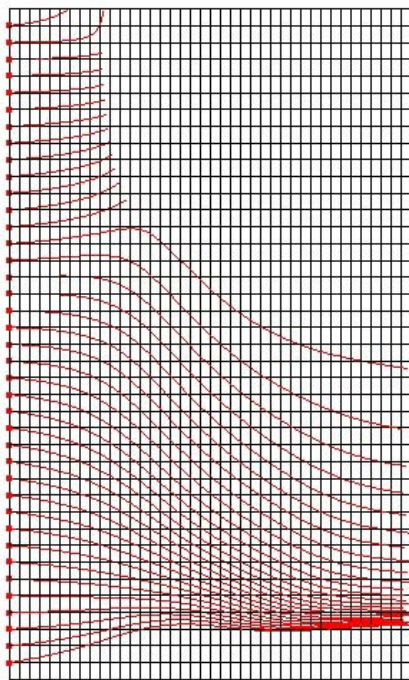


Figura 3.20: Visualização das *linhas de correntes*. Número de linhas de correntes é igual ao número de células na direção y menos um.

Desse modo, é mostrado na figura 3.21 o algoritmo implementado para a construção de cada *linha de corrente*.

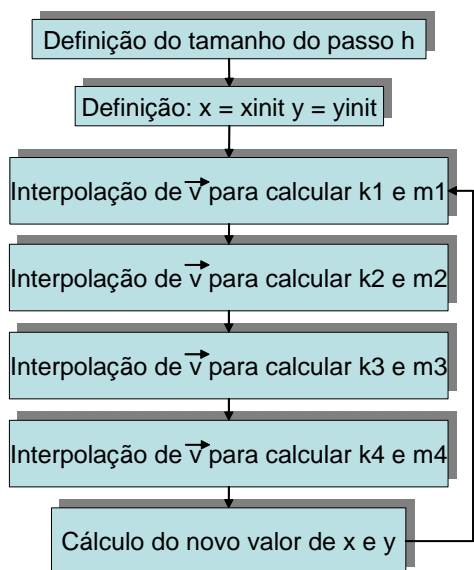


Figura 3.21: Algoritmo para construção da *linha de corrente*.

As figuras 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28 e 3.29 mostram alguns modelos com suas linhas de correntes. Como dito anteriormente, será com essas linhas de correntes que os sedimentos serão transportados e/ou depositados. É possível observar nas figuras abaixo que as linhas de correntes acompanham o fluxo seguindo as baixas batimetrias, o que era previsto pela análise numérica mostrada na seção 3.2 deste capítulo. Nas figuras abaixo, o mapa de cores indica a batimetria. Cores quentes mostram batimetrias altas e cores frias mostram batimetrias baixas.

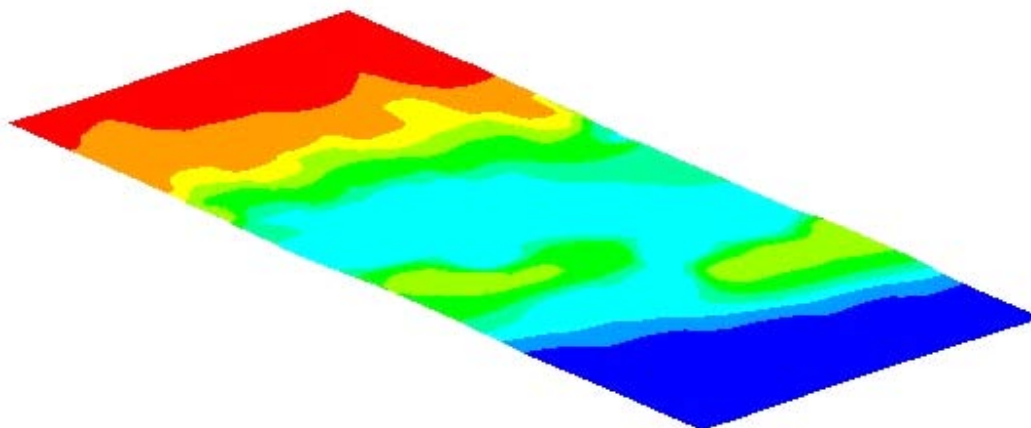


Figura 3.22: Modelo utilizado na simulação mostrando a batimetria. Dimensões: 100km x 300 km.

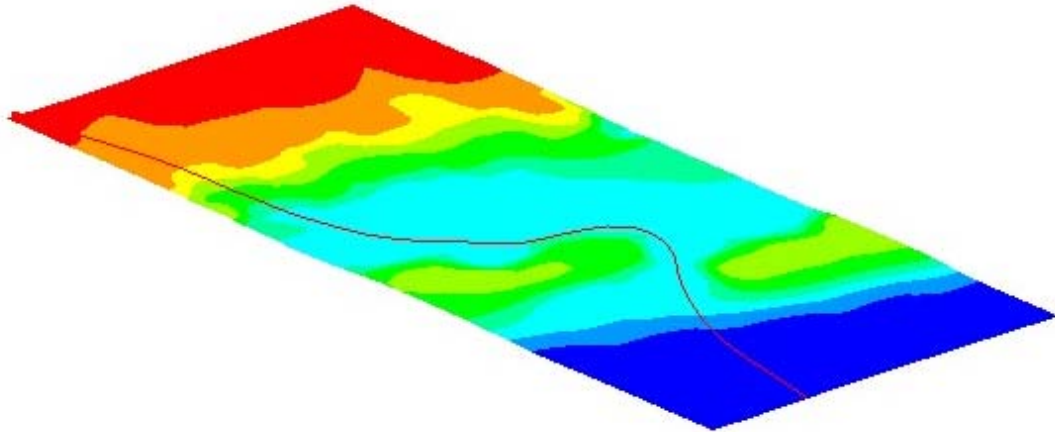


Figura 3.23: Mesmo modelo da figura anterior mostrando uma linha de corrente.

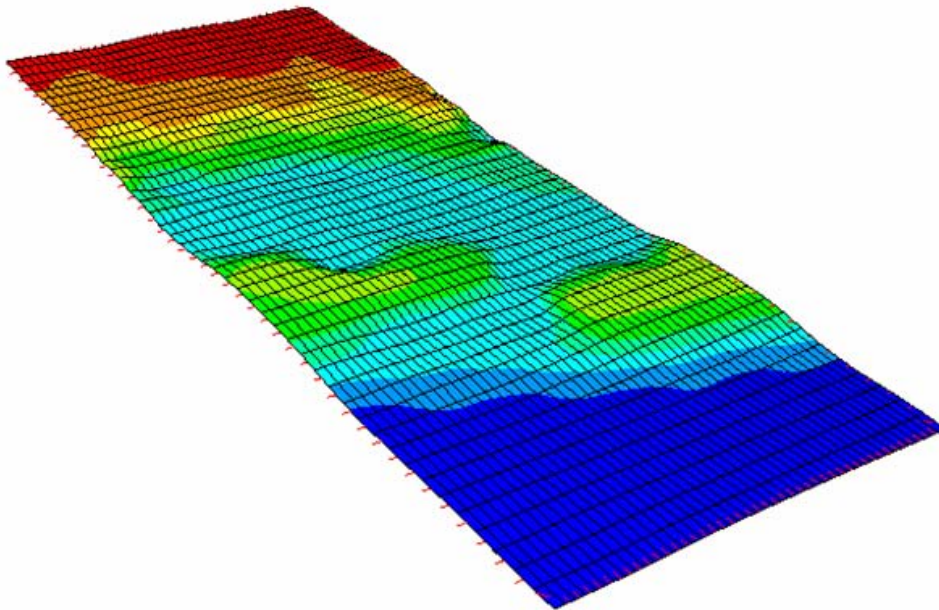


Figura 3.24: Modelo com sua batimetria. Dimensões: 100 km x 300 km.

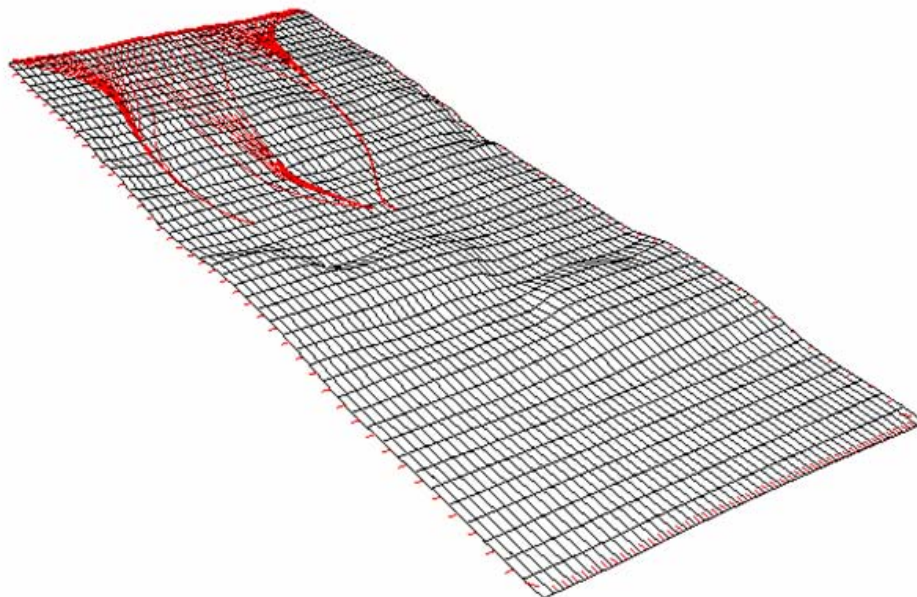


Figura 3.25: Mesmo modelo da figura anterior mostrando as linhas de correntes.

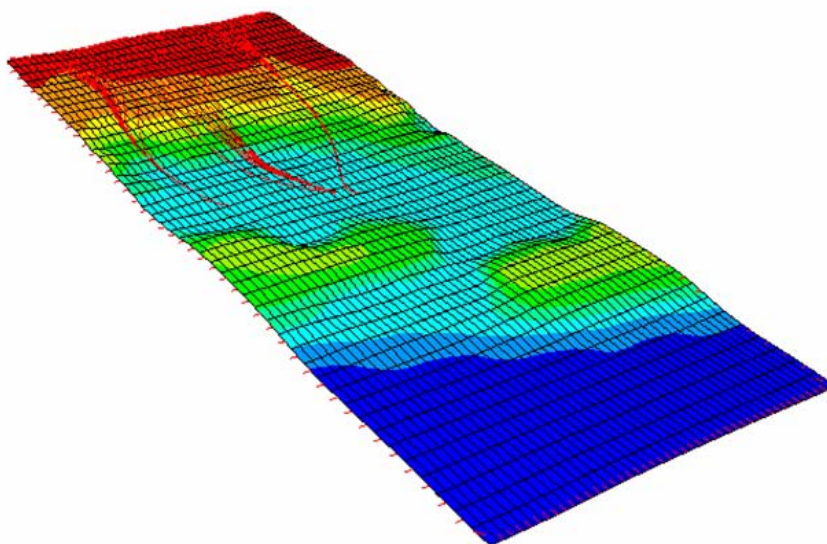


Figura 3.26: Mesmo modelo da figura anterior mostrando as linhas de correntes e a batimetria.

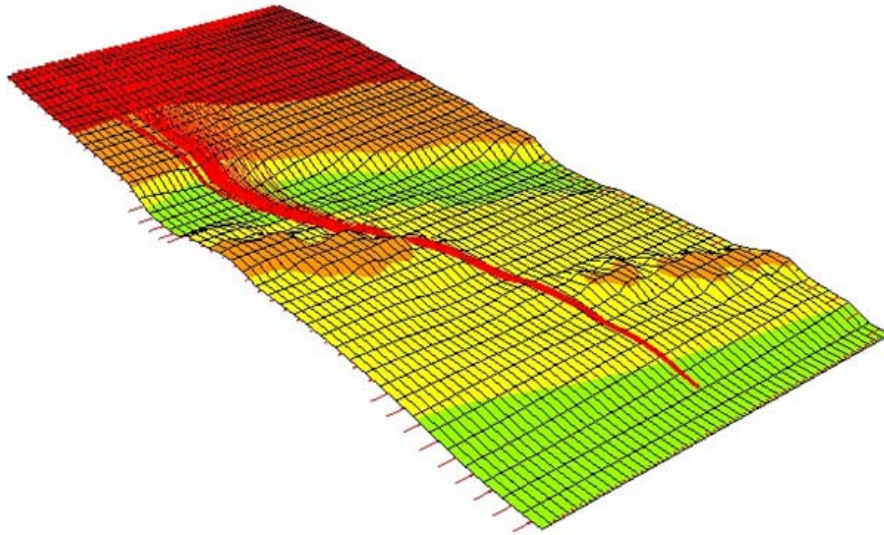


Figura 3.27: Modelo mostrando as linhas de correntes e a batimetria. Dimensões: 100 km x 300 km.

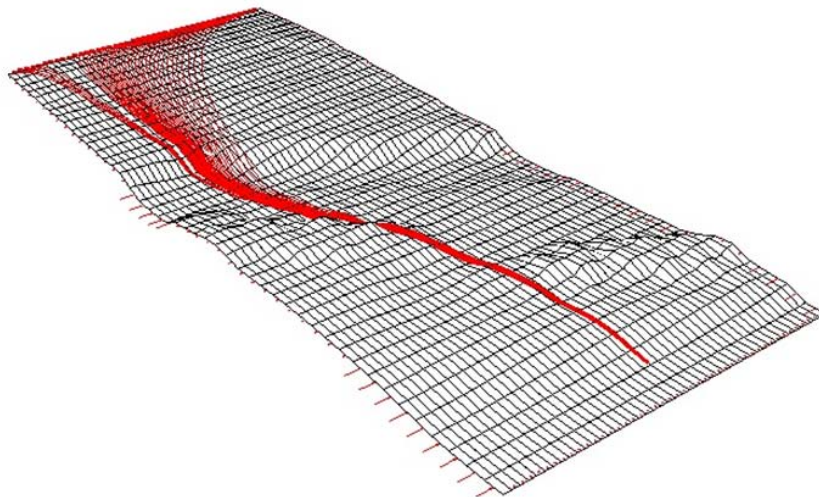


Figura 3.28: Mesmo modelo da figura anterior mostrando as linhas de correntes e a batimetria.

A figura abaixo mostra as linhas de correntes do exemplo mostrado nas figura 3.16 e 3.17.

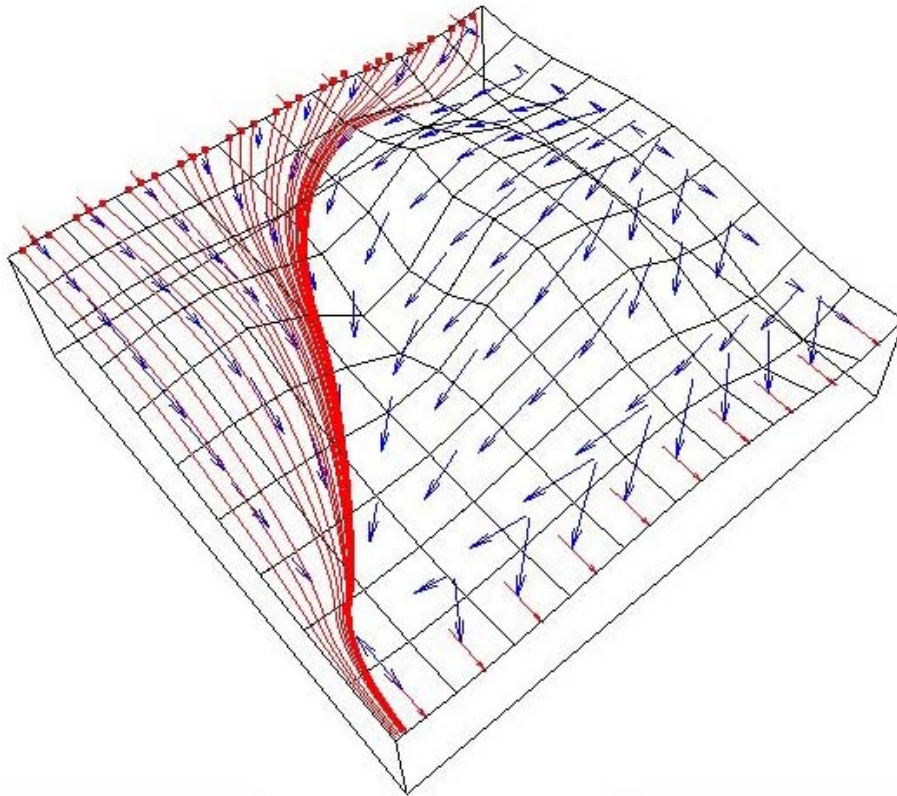


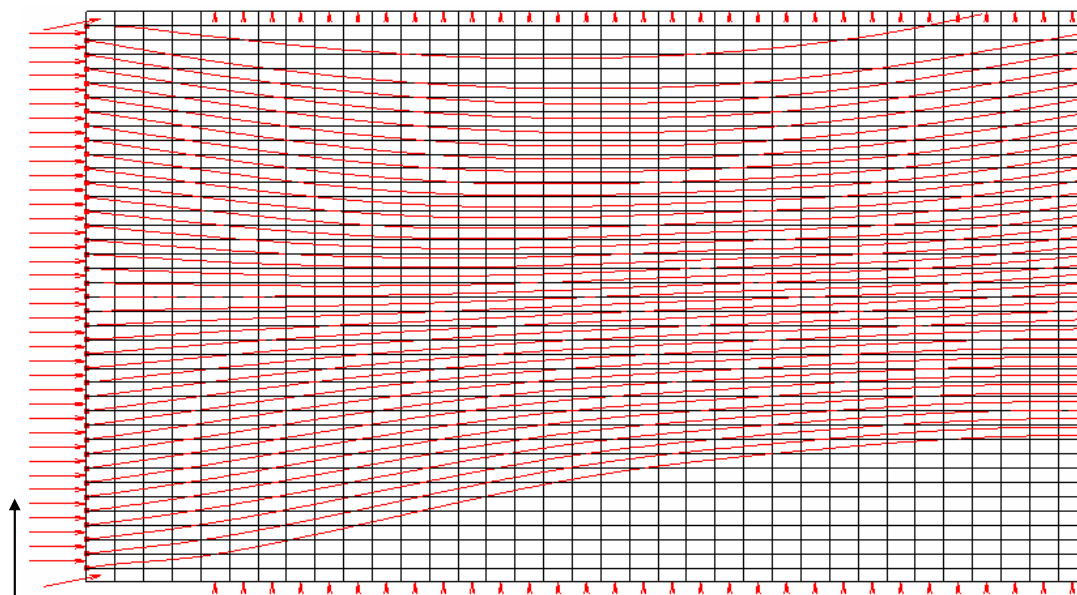
Figura 3.29: Linhas de correntes da figura 3.16 e 3.17.

3.4

Deposição dos Sedimentos

Com as linhas de correntes calculadas e armazenadas pode-se efetuar o transporte e/ou deposição ao longo delas. Para isso, considerou-se que cada linha de corrente do modelo recebe uma fração da descarga volumétrica do volume total do aporte de sedimentos. Essa fração está dividida em três litologias: areia, silte e argila.

Com os volumes de areia, silte e argila definidos para cada linha de corrente, o processo de transporte e deposição pode ser iniciado. O processo será feito seguindo o sentido mostrado na figura 3.30.



Sentido do processo de deposição

Figura 3.30: Sentido utilizado para efetuar o processo de deposição.

Durante o processo, cada linha de corrente é percorrida a partir da borda onde o aporte de sedimento está definido. Como a linha de corrente é constituída por pontos (figura 3.31 e 3.32), é calculada a declividade em todos os trechos definidos pelos pontos. A declividade é calculada seguindo os passos:

1. Determinação da distância (d) entre os pontos no plano xy (figura 3.33);
2. Determinação da distância (z) entre os pontos no plano zx (figura 3.34);
3. Cálculo da declividade conforme eq. .

$$\text{declividade} = \text{arc tg } (z / d) \quad (3.52)$$

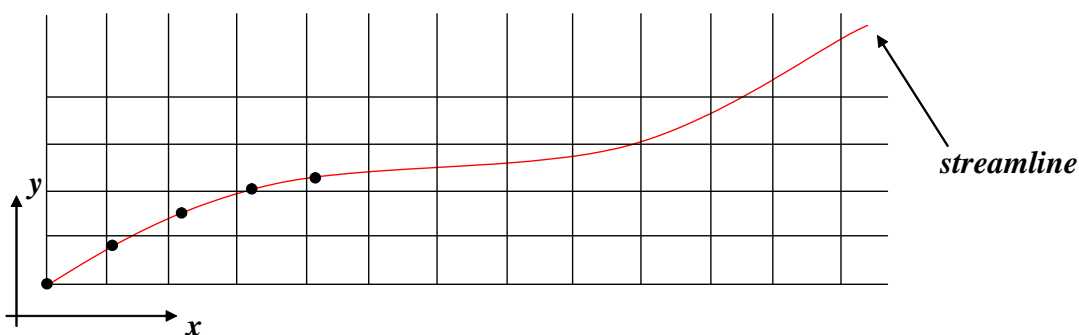


Figura 3.31: Vista superior da linha de corrente.

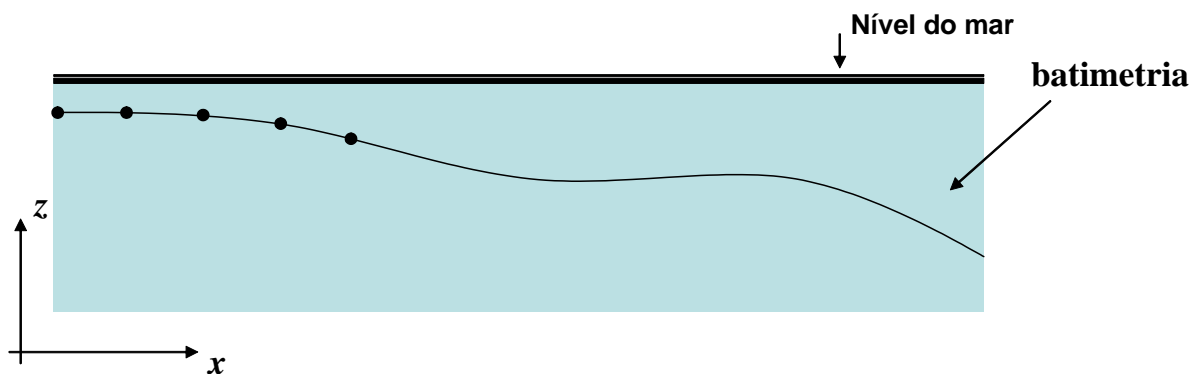


Figura 3.32: Vista lateral da linha de corrente da figura 3.31.

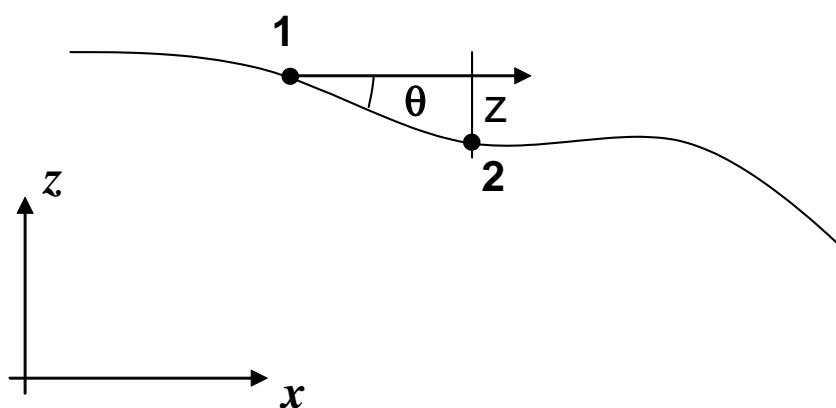


Figura 3.33: Distância z entre os pontos no plano zx .

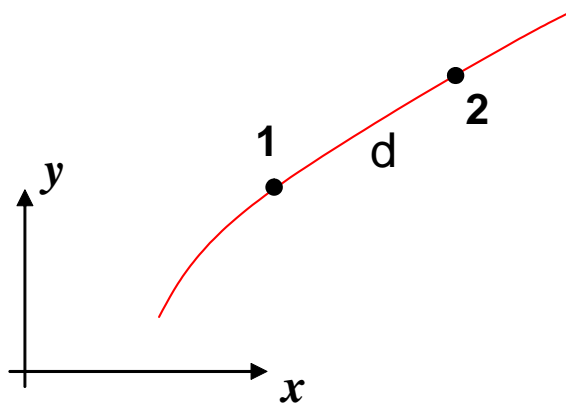


Figura 3.34: Distância entre d os pontos no plano xy .

Os sedimentos serão depositados neste trecho se a declividade calculada pela eq. (3.52) for menor que a declividade limite para deposição definida para cada litologia. Caso ocorra o contrário, os sedimentos seguirão para o próximo trecho e o processo será repetido.

Quando os sedimentos tiverem que ser depositados, deve-se definir a área de deposição. Neste trabalho esta área é definida por interpolação baricêntrica, conforme exposto na seção 3.4. Os sedimentos serão depositados seguindo a

decrecente da curva granulométrica: areia, silte e argila. A deposição na área de influência será efetuada enquanto existir sedimentos para depositar ou até a coluna de sedimentos atingir a altura do nível de base das ondas.

As figuras 3.35 e 3.36 mostram os sedimentos depositados acompanhando o traçado da linha de corrente.

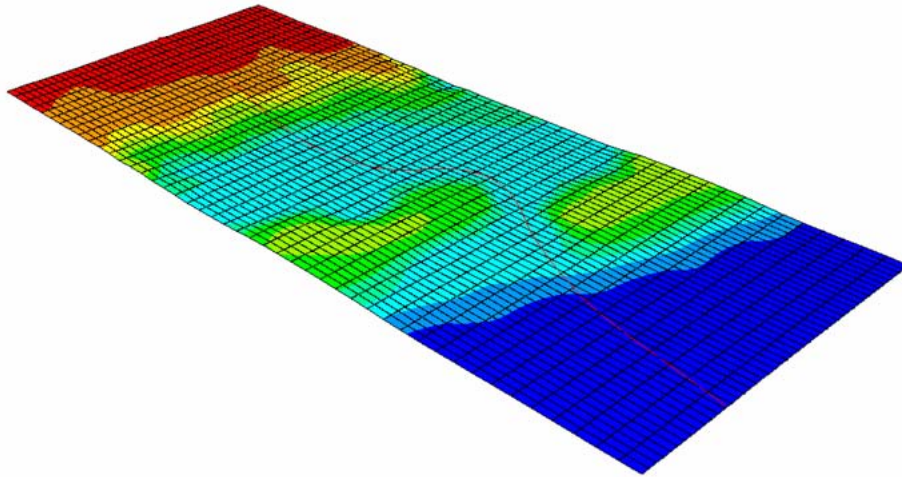


Figura 3.35: Modelo analisado mostrando a batimetria e uma linha de corrente do fluxo.

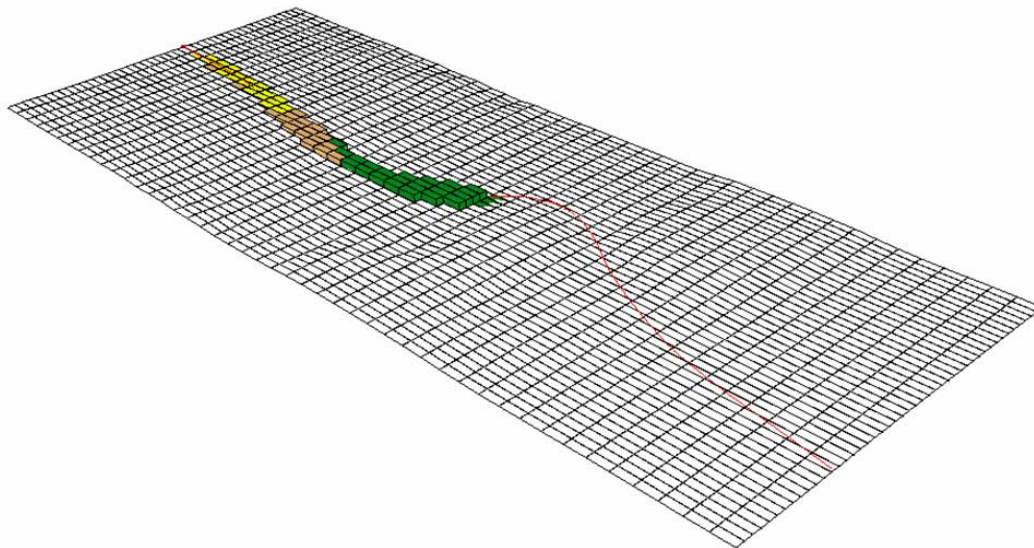


Figura 3.36: Modelo mostrando os sedimentos depositados ao longo da linha de corrente.

3.5

Compactação

A compactação é um dos processos que reduzem o volume dos sedimentos. Ocorre logo após a fase de sedimentação, e é proveniente do peso da carga sedimentar superposta, resultante principalmente da expulsão dos fluidos. Com o aumento da profundidade, o peso da sobrecarga sedimentar aumenta e, conseqüentemente, a porosidade diminui, gerando como resultado uma redução de volume. Essa fase é mais sensível para alguns tipos de litologias, sobretudo sedimentos argilosos. A compactação no STENO será feita independentemente para cada coluna do *grid* usando o modelo clássico (SCLA,1980), que estabelece que a porosidade ρ decai exponencialmente com a profundidade (z), isto é,

$$\rho(z) = \rho_0 \cdot e^{-dec \cdot z} \quad (3.49)$$

onde ρ_0 é a porosidade inicial e dec é o fator de decaimento (figura 3.37).

É importante ressaltar que durante o processo de compactação ocorre diminuição de volume, porém a massa sedimentar não se altera. A perda de volume é causada pelo decaimento da porosidade e de água da estrutura das argilas.

A integral da função de decaimento exponencial da porosidade entre as profundidades do topo (Zt) e da base (Zb) de uma camada resulta na altura equivalente de poros e água da camada. Desta forma, a integral,

$$Hs = \int_{Zt}^{Zb} (1 - \rho(z)) dz \quad (3.50)$$

é a altura equivalente de sedimento da camada. Assim,

$$Hs = Zb - Zt + (\rho_0 / dec)(e^{-dec \cdot Zb} - e^{-dec \cdot Zt}) \quad (3.51)$$

No processo de compactação, as camadas abaixo da camada do topo se comprimem devido à diminuição de porosidade provocada pela sobrecarga. A nova espessura de uma camada compactada após o depósito de uma nova camada

é calculada tomando como base a nova profundidade Z_t do topo da camada compactada e o valor de H_s da camada.

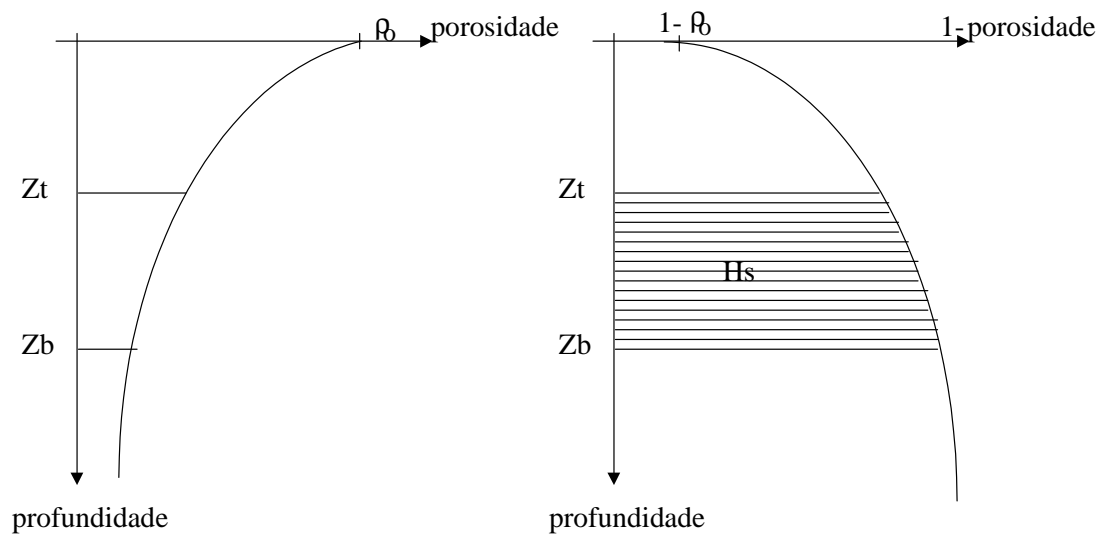


Figura 3.37 – Curva de porosidade versus profundidade e curva de complemento de porosidade (% de matriz) versus profundidade.

4

Sistema Computacional

Este trabalho está inserido na linha de Pesquisa “Computação Gráfica Aplicada” do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio e do laboratório Tecgraf (Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica) também localizado na PUC-Rio. Nesta linha são desenvolvidos simuladores computacionais de diversas áreas, como sistemas para engenharia civil, engenharia mecânica e geologia. Nesta última área destacam-se dois simuladores. O primeiro é o simulador chamado RECON, que é uma ferramenta computacional utilizada para reconstruir seções geológicas. Maiores detalhes podem ser vistos no trabalho de Santi (2002). O outro é o simulador chamado STENO que foi desenvolvido neste trabalho.

Este capítulo descreve o protótipo desenvolvido, mostrando a estratégia de programação utilizada para desenvolvê-lo, suas principais funcionalidades e o algoritmo implementado para visualizar superfícies que correspondem a horizontes geológicos de uma idade definida pelo usuário.

4.1

Sistema STENO

Para obter uma estrutura de dados consistente, de fácil modificação e manutenção, optou-se em utilizar, no desenvolvimento do STENO, uma linguagem orientada a objetos (no caso, a linguagem C++). Em programação orientada a objetos, um determinado problema é examinado por “entidades” independentes, chamadas objetos, que se relacionam com outras partes do problema. Tais entidades não são escolhidas por sua “computabilidade”, mas, sim, por terem uma relação física ou conceitual que as separa do resto do problema (Cox, 1991). Logo, o objetivo principal no uso dessa filosofia de programação é ter correspondência, uma a uma, entre entidades no problema físico e objetos no programa.

A linguagem orientada a objetos possui um tipo de dado, chamado de *classe*, a partir das quais são criados objetos. O uso de *classes* permite agrupar os dados e funções de um determinado objeto de modo a obter uma implementação

simplificada e uma maior reutilização do código. Reutilizar o código não é simplesmente evitar duplicidade de código. Isso, as “funções” e “procedimentos” já faziam (Sebesta, 2000). Reutilização do código significa que o sistema poderá crescer com consistência e novos sistemas poderão se beneficiar de objetos criados anteriormente, aumentando ainda mais a eficiência e diminuindo custos. O enfoque de orientação a objetos pode ser aplicado tanto à análise quanto à programação e essa é uma das grandes vantagens desta tecnologia.

No desenvolvimento de um sistema computacional existem duas fases bem claras: o projeto e o desenvolvimento. A fase de projeto de um sistema é fundamental, pois é nela que se estrutura toda a sua organização, isto é, a arquitetura da informação é construída. O desenvolvimento envolve a especificação e a implementação da representação de dados do programa. Em programação orientada a objetos, são três etapas a serem vencidas (Fenves, 1990):

- Seleção de classes: Determinam-se as classes de objetos necessários para representar o problema e sua solução; criam-se sub-classes para aumentar o grau de especificidade de representações do problema.
- Especificação das classes: Definem-se as operações nos objetos de uma classe ao se especificar o que faz cada mensagem, ou seu método associado; a especificação contém uma descrição precisa da operação invocada por cada mensagem.
- Implementação das classes: Selecionam-se variáveis locais para objetos; programam-se um método para executar a operação especificada.

No STENO, toda a estrutura de dados responsável pelo armazenamento da região a ser modelada, ou seja, o *grid* e dos dados criados durante a simulação, foi implementada seguindo a filosofia descrita acima. A estrutura global é definida por quatro *classes* como mostra a figura 4.1.

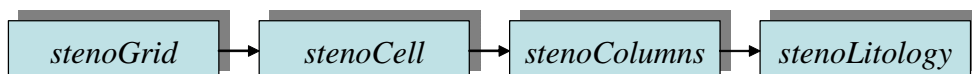


Figura 4.1 – Estrutura global das classes implementadas no STENO.

Inicialmente foi criada uma *classe*, chamada *stenoGrid*, para gerenciar todos os dados referentes ao *grid* (dimensões, números de células, resolução, etc.). Na figura 4.2 é mostradas a estrutura interna da *classe grid* e as ligações entre as principais *classes*.

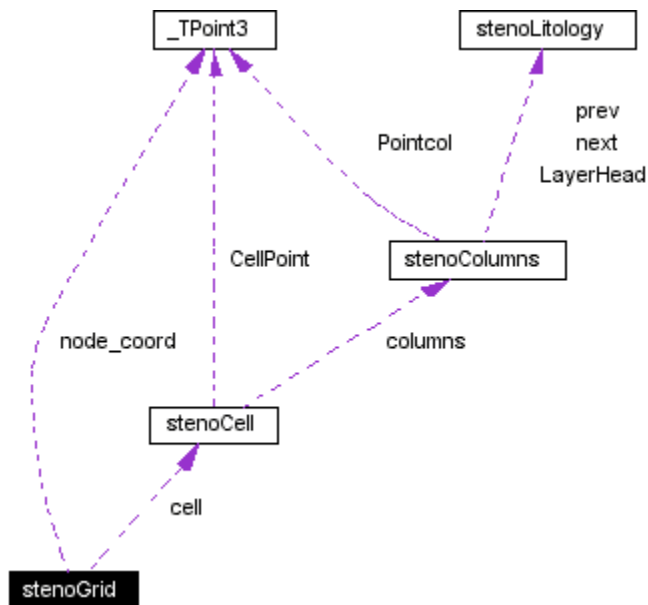


Figura 4.2 – Estrutura interna da classe *stenoGrid*.

Durante a simulação cada célula do *grid* tem um comportamento isolado, isto é, a cada passo as células terão alturas diferentes. Essas alturas corresponderão às camadas de sedimentos já depositados. Desse modo, foi implementada a classe *stenoCell* (figura 4.3), que é responsável por armazenar as características de cada célula do *grid* durante a simulação.

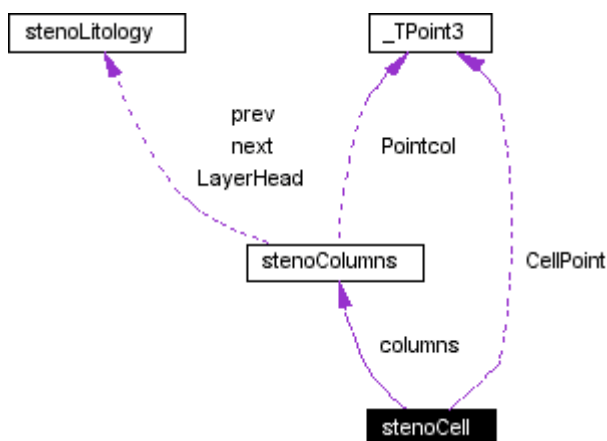


Figura 4.3 – Estrutura interna da classe *StenoCell*.

Como durante o processo de sedimentação as células podem ter diversos tipos de litologias, foi implementada a *classe stenoColumns* (figura 4.4). Essa

classe contém basicamente uma lista duplamente encadeada onde cada item da lista possui informações de cada litologia (idade, porosidade, decaimento, etc). Essas informações estão armazenadas dentro de uma *classe* chamada tipo *stenoLitology*.

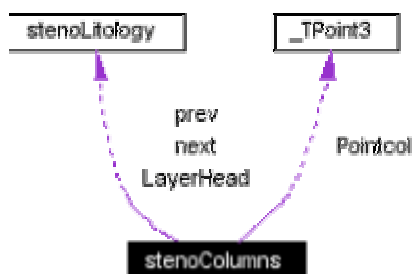


Figura 4.4 – Estrutura interna da classe *StenoColumns*.

O STENO foi desenvolvido utilizando a linguagem C++, o sistema de interface IUP (Levy, 1994) e a biblioteca gráfica *OpenGL* (Woo & Nieder, 1997). A aplicação é multiplataforma e a interface gráfica desenvolvida busca ser amigável para o usuário no que diz respeito à entrada de dados e visualização dos resultados. A figura 4.5 mostra o diálogo principal do STENO com uma superfície inicial e o nível do mar.

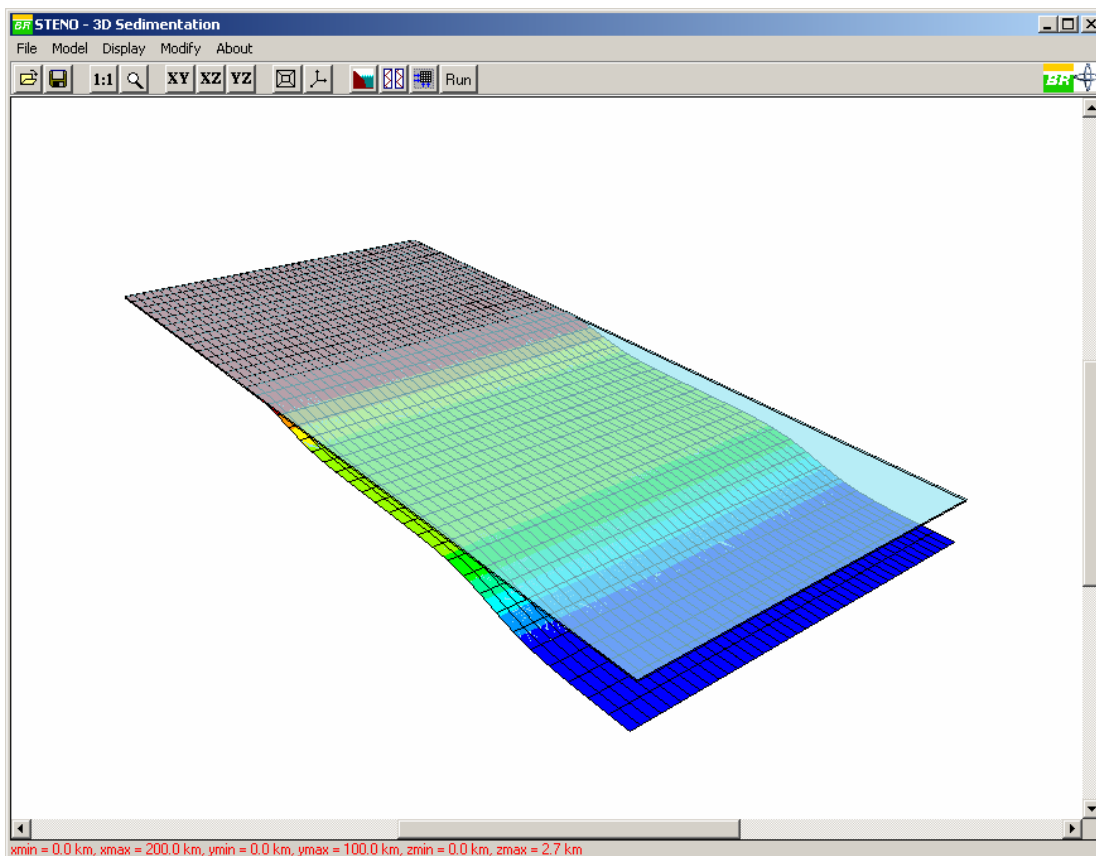


Figura 4.5: Diálogo Principal do STENO.

É a partir deste diálogo que o usuário inicia a criação do modelo, definindo os parâmetros de entrada para fazer a simulação. Primeiramente o usuário deve definir uma superfície inicial. Esta superfície deve estar armazenada em um arquivo texto no formato (x,y,z) ou deve ser gerada utilizando o método descrito na seção 3.2 do capítulo 3 (figura 4.6). Depois, o usuário deve especificar os seguintes parâmetros:

- (a) Tempo da simulação: tempo inicial, tempo final e passo da simulação. Todos os valores de tempo são especificados em Milhões de ano (Ma);
- (b) Valores de referência do nível do mar e do nível de base das ondas. No STENO esses valores são especificados em km;
- (c) Coordenadas dos pontos onde se conhece a variação da subsidência;
- (d) Curva eustática que será utilizada na simulação.
- (e) Volume de aporte de sedimentos, por fração litológica ao longo da linha de costa; e
- (f) Variação da velocidade de corrente com a batimetria.

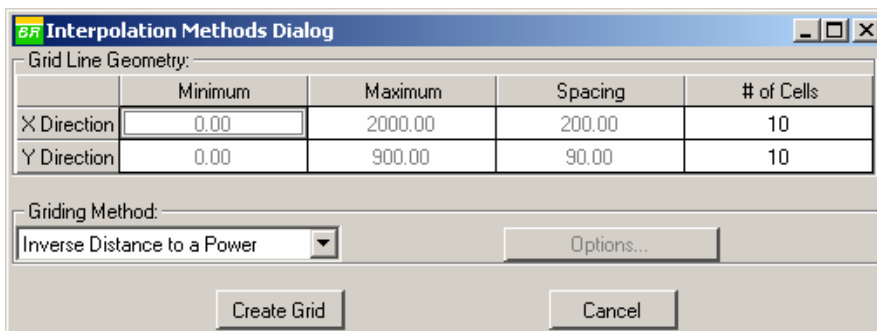


Figura 4.6: Diálogo utilizado para definir a superfície inicial (embasamento).

Os parâmetros dos itens (a) e (b) são especificados utilizando a interface mostrada abaixo (figura 4.7).

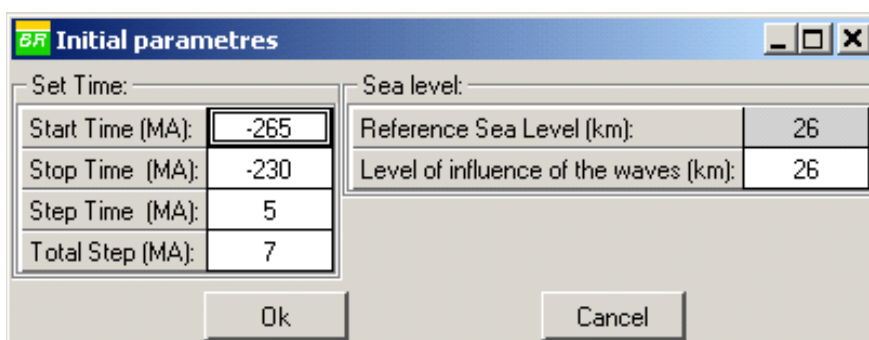


Figura 4.7: Diálogo onde o usuário especifica os parâmetros iniciais.

Os pontos onde se conhece a variação da subsidência, item (c), são definidos utilizando o diálogo da figura 4.8.

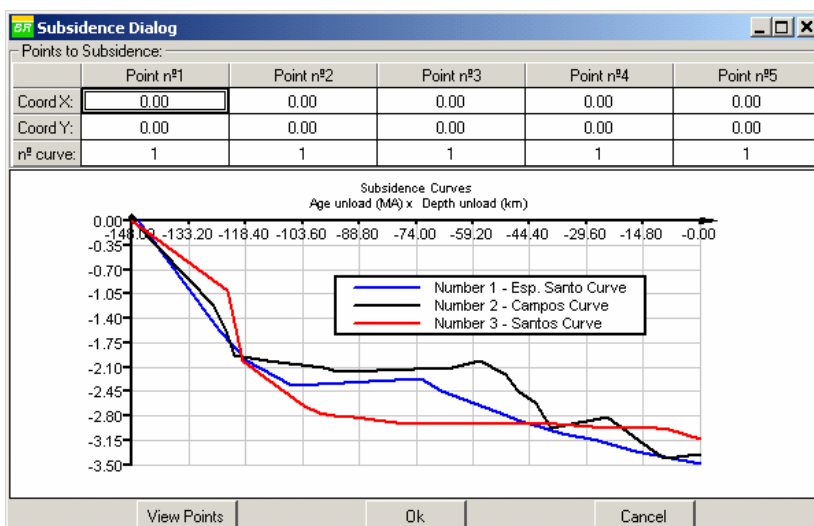


Figura 4.8: Diálogo utilizado para definir a variação da subsidência.

A curva eustática é definida pelo usuário utilizando o diálogo mostrado na figura 4.9. Até o momento, o sistema permite apenas fazer simulações utilizando a curva de baixas frequências de Haq que pode ser vista na figura 4.9. Porém o

STENO foi estruturado de forma a permitir a inclusão de novas curvas de baixas frequências e compor curvas de altas frequências.

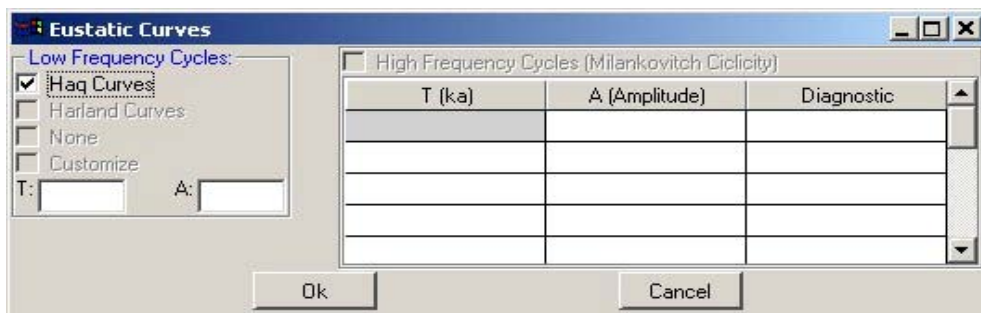


Figura 4.9: Diálogo onde o usuário define a curva eustática.

Na figura 4.10 também podem ser visualizados o tempo inicial e final e qual passo da simulação está sendo analisado.

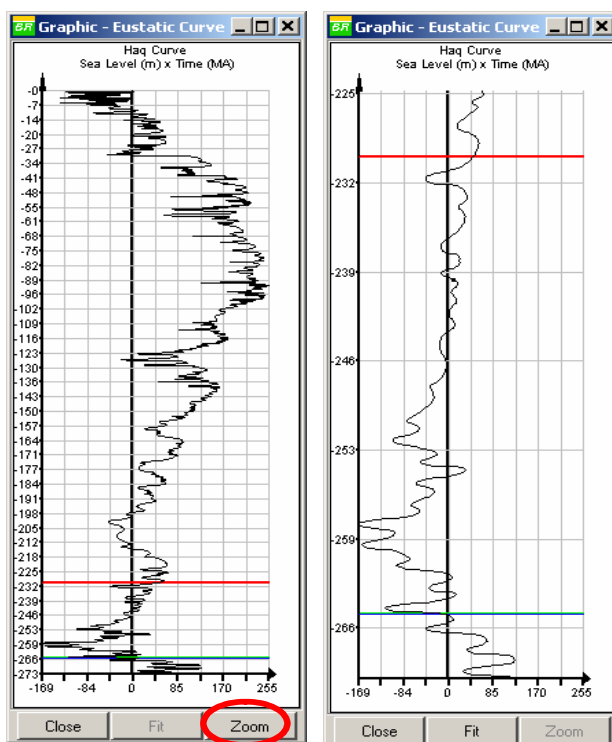


Figura 4.10 Curva de Haq, mostrando o tempo inicial (linha verde) o tempo final (linha vermelha) e o tempo atual da simulação (linha azul). A figura da esquerda mostra de forma detalhada o trecho da curva Haq que será utilizado na simulação.

O aporte de sedimentos, item (e), e definido através de dois diálogos. O primeiro diálogo (figura 4.11) é utilizado para definir em que pontos são conhecidos o volume de sedimentos por frações litológicas. Esses pontos são utilizados para interpolar o aporte de sedimentos ao longo da linha de costa. É nele também que o usuário define os volumes de sedimentos. Mas para isso,

existe um banco de dados com informações sobre as descargas volumétricas, máximas e mínimas, por frações litológicas de alguns rios significativos de descarga média e grande (figura 4.12). Essa tabela é acessada através de um botão como mostra a figura 4.11. O usuário deve escolher os dados utilizando o banco de dados ou digitar as informações diretamente na tabela do diálogo da figura 4.11.

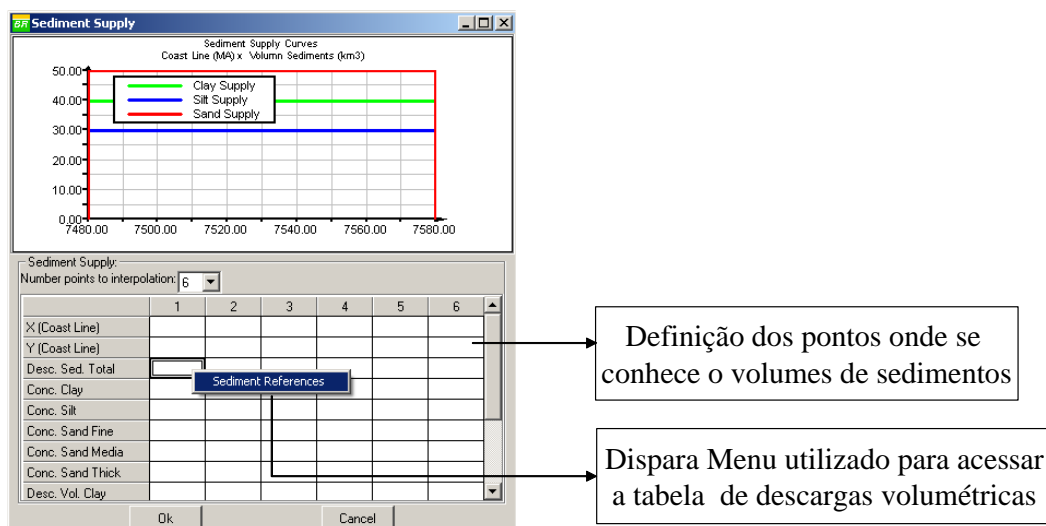


Figura 4.11: Tabela onde o usuário define o aporte de sedimentos.

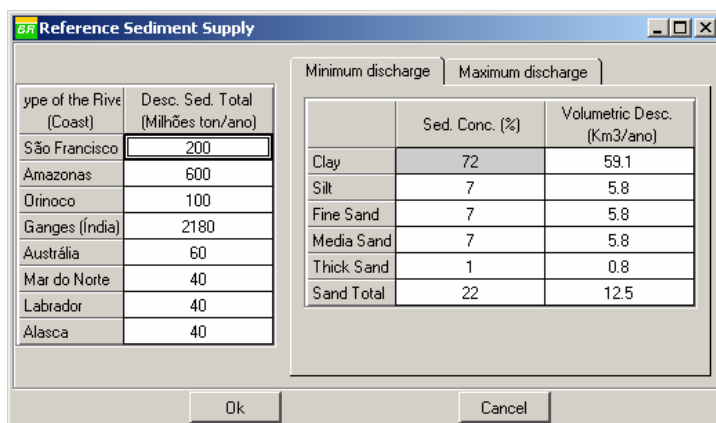


Figura 4.12: Tabela que contém as informações sobre as descargas volumétricas, máximas e mínimas, de alguns rios.

Finalmente, o usuário deve indicar como a velocidade de corrente varia com a batimetria, item (f). O usuário deverá escolher a fisiografia da borda continental:

- Tipo 1 - Plataforma / Talude / Bacia (figura 4.13); e
- Tipo 2 – Rampa (figura 4.14).

Com a fisiografia da borda continental definida, o usuário deverá escolher a velocidade de corrente para cada sub-ambiente da borda continental. Para isso, o usuário dispõe de uma tabela com informações sobre as velocidades de corrente marítimas (figura 4.15). Os valores dessa tabela foram coletados equipe do setor de Geologia do Cenpes (Centro de Pesquisa da PETROBRAS). Com isso, cada um dos sub-ambientes estará correlacionado com a batimetria, que por sua vez estará evoluindo com a variação do nível do mar ao longo da simulação.

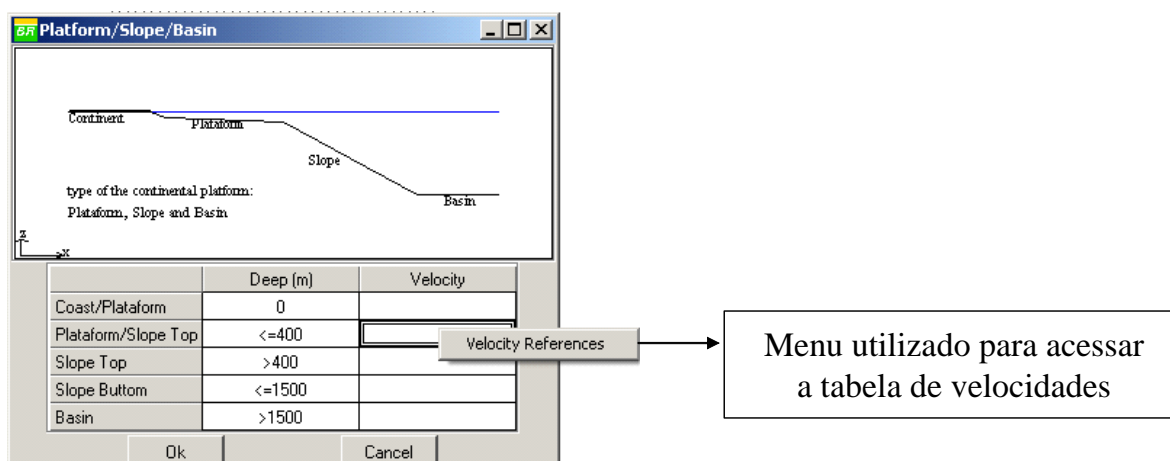


Figura 4.13: Borda continental do tipo 1.

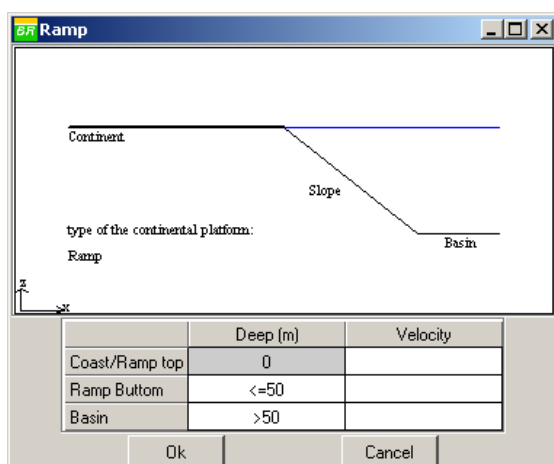


Figura 4.14: Borda continental do tipo 2.

Mean Longitude	Mean Latitude	Mean u Velocity	Mean v Velocity	Mean Velocity	Nº of 5 days Aver.
22.925	-56.483	10.337	3.572	5.052	13.000
28.301	-52.142	13.760	2.431	3.438	47.000
37.299	-46.813	15.862	1.990	2.815	48.000
35.894	-43.515	10.663	0.477	0.675	28.000
21.907	-36.898	11.333	5.157	7.292	43.000
21.246	-31.867	1.178	3.891	5.503	88.000
14.309	-28.485	-2.163	1.070	1.513	53.000
3.539	-15.907	-17.102	0.347	0.490	5.000
4.591	-11.094	-0.924	-7.358	10.406	6.000
50.437	64.604	7.010	2.246	3.176	12.000
2.660	65.359	0.533	3.826	5.411	8.000
6.288	-56.048	16.089	9.671	13.677	9.000
6.880	-51.647	12.436	0.571	0.808	38.000
7.085	-48.169	15.468	-1.908	2.698	40.000
8.086	-43.159	7.692	4.289	6.066	70.000
7.215	-36.723	5.541	3.536	5.001	47.000

Figura 4.15: Tabela com as velocidades de correntes marítimas.

Com os dados descritos da forma definida acima, a simulação pode ser iniciada. Durante cada passo, o usuário poderá, dentre outras opções, consultar informações sobre a malha (batimetria, resolução, etc.), visualizar o campo de velocidades e as linhas de correntes, visualizar o modelo de diversos ângulos e posições, alterar o aporte sedimentar e velocidades de corrente e visualizar um horizonte geológico, isto é, uma superfície do modelo com uma idade definida. A seguir será mostrado o algoritmo utilizado para visualizar essas superfícies.

4.2

Extração das superfícies

Em muitas ocasiões o geólogo precisará visualizar a estrutura tri-dimensional do topo das colunas que foram sedimentadas (figura 4.16). Isso é feito especificando a idade (Ma) de um dos passos da simulação. Essa visualização é importante, para que o geólogo possa avaliar melhor o resultados obtidos na simulação.

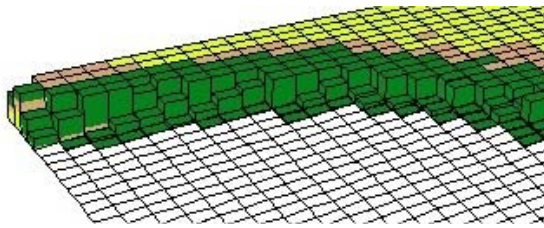


Figura 4.16: Sedimentos depositados no *grid* armazenados em colunas.

As duas abordagens básicas para a solução do problema de visualização volumétrica são a extração de superfícies (*surface fitting*) e o *rendering* direto de volumes (*volume rendering*). Elas diferem basicamente pela utilização ou não de representações intermediárias dos dados volumétricos para a geração da visualização adequada à aplicação (Costa, 1994). Enquanto no *rendering* direto de volumes a projeção é realizada diretamente a partir dos dados volumétricos, na extração de superfícies os dados volumétricos são convertidos para uma representação geométrica (polígonos). Esta técnica foi utilizada para visualizar a superfície de uma idade definida pelo usuário.

O algoritmo utilizado foi desenvolvido por Costa (1994). Neste algoritmo existem duas fases bem definidas. Primeiro o usuário define uma idade e todas as células que contenha pontos nesta idade são encontradas. Depois as células encontradas são examinadas e um conjunto de polígonos conectados é calculado e armazenado para ser visualizado posteriormente. Para construção das superfícies no STENO é necessário primeiramente, procurar em cada coluna o topo da camada cuja idade foi especificada pelo usuário. As colunas são montadas de tal forma que é possível, através de uma busca, obter a altura da coluna com idade especificada pelo usuário. A figura 4.17 mostra um exemplo esquemático de como as colunas estão armazenadas. Elas foram armazenadas utilizando uma estrutura de dados (seção 4.1) que facilitasse a busca do topo de uma idade definida pelo usuário.

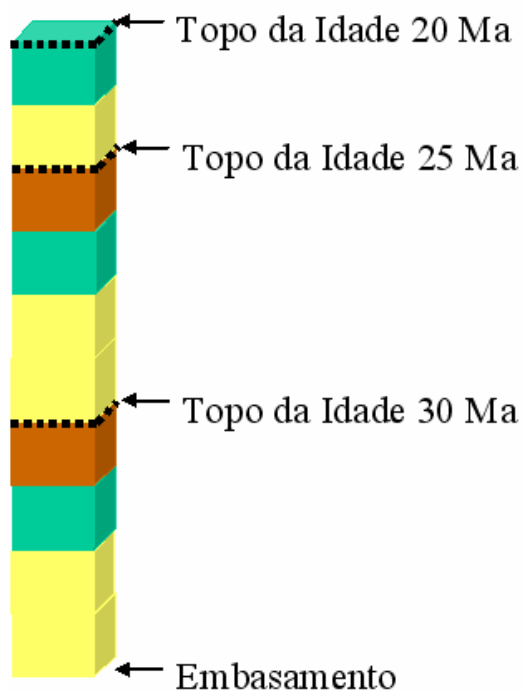
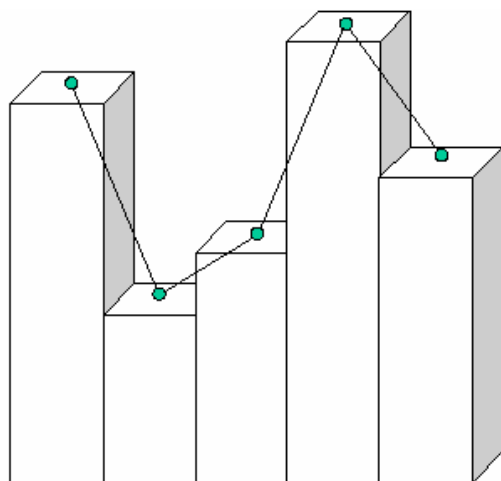


Figura 4.17: Exemplo esquemático mostrando como as colunas são montadas.



● Topo da coluna com idade definida pelo usuário

Figura 4.18: Topo das colunas após a escolha da idade pelo usuário.

Desse modo, como mostra a figura 4.18, cada coluna da malha terá altura diferente para a mesma idade. Em planta pode-se com os centros de cada célula montar uma malha interna à malha da simulação. Esta malha se chama malha de elevação da superfície e pode ser vista em planta de forma esquemática na figura 4.19.

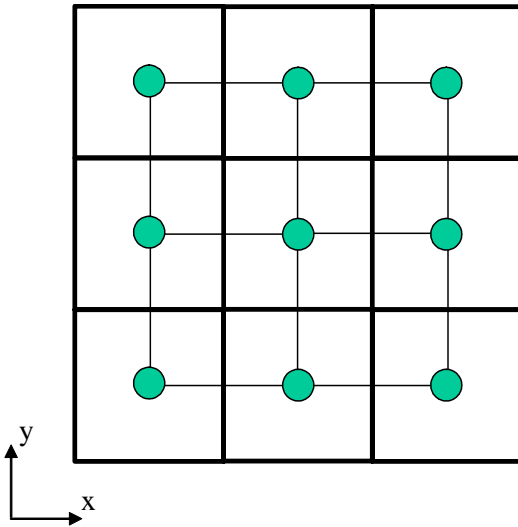


Figura 4.19: Malha de elevação da superfície de idade definida pelo usuário.

O próximo passo é estender a malha de elevação das superfícies até as bordas da malha da simulação. Isto é feito mantendo as mesmas cotas dos pontos da malha de elevação (figura 4.20).

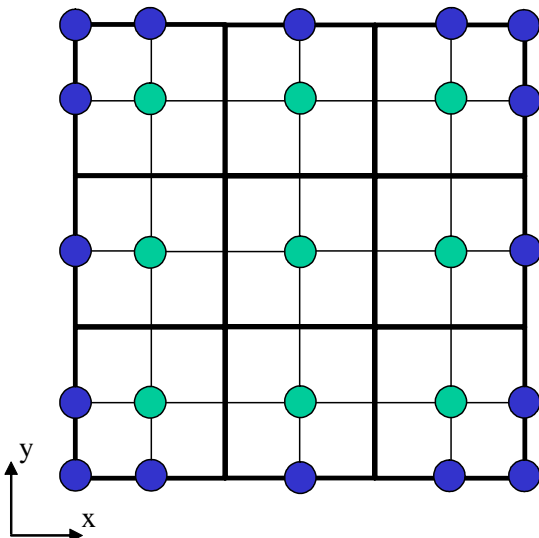


Figura 4.20: Extensão da malha de elevação da superfície até as bordas da malha de simulação.

Depois, deve-se calcular o valor da altura nas interseções das células da simulação. Com os pontos $p1$ e $p2$, deve-se calcular a coordenada z do ponto p (figura 4.21 e 4.22).

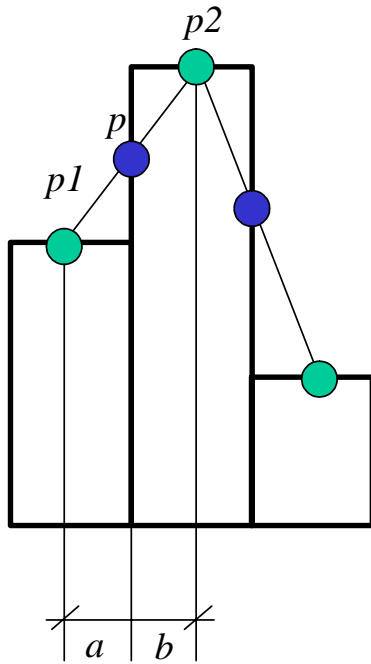


Figura 4.21: Cálculo do ponto de interseção entre pontos calculados no passo anterior.

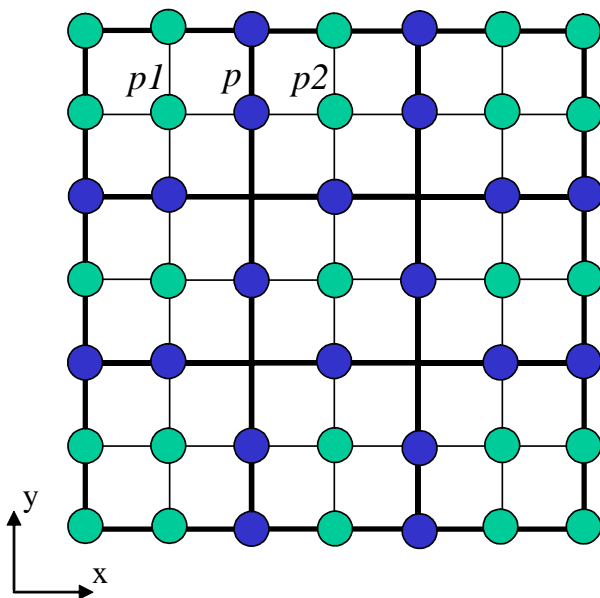


Figura 4.22: Malha gerada após o cálculo do ponto de interseção entre pontos calculados no passo anterior.

A coordenada z do ponto p é calculada em relação à componente x e y a partir da equação:

$$p_z = p1_z \times \frac{b}{a+b} + p2_z \times \frac{a}{a+b} \quad (4.1)$$

Onde a e b são as distâncias em x dos pontos $p1$ e $p2$ até p . No caso do STENO, a e b são sempre iguais ao espaçamento do *grid* (malha da simulação). O cálculo é feito da mesma forma para a direção y .

Por último, deve-se calcular o valor da altura nos vértices da malha da simulação, ou seja, vértices do *grid*. (figura 4.23 e 4.24).

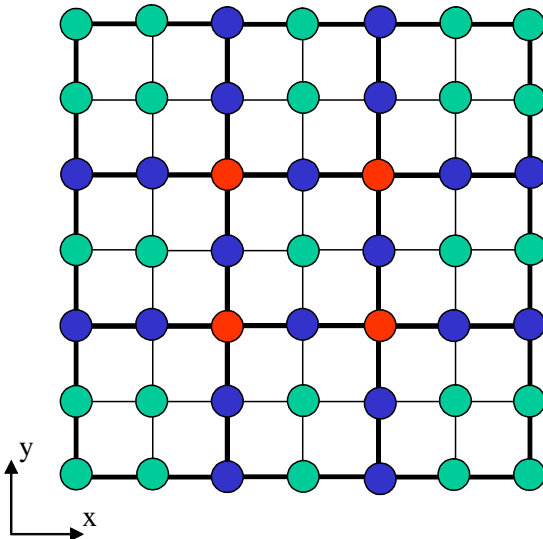


Figura 4.23: Pontos calculados após o cálculo dos valores da altura nos vértices da malha da simulação.

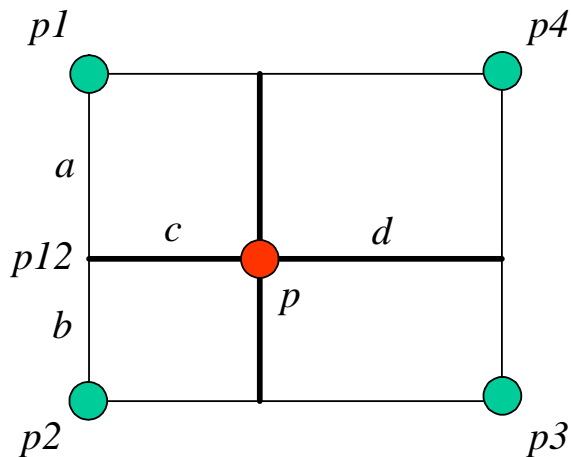


Figura 4.24: Pontos calculados após o cálculo dos valores da altura nos vértices da malha da simulação.

Na figura 4.24 a coordenada z do ponto p é aproximada por:

$$p_z = p1z_z \times \frac{d}{c+d} + p3z_z \times \frac{c}{c+d} \quad (4.2)$$

onde

$$p12_1 = p1_z \times \frac{b}{a+b} + p2_z \times \frac{a}{a+b} \quad (4.3)$$

$$p34_z = p4_z \times \frac{b}{a+b} + p3_z \times \frac{a}{a+b} \quad (4.4)$$

Com os pontos mostrados na figura 4.23, tem-se uma superfície suavizada da idade definida pelo usuário. As figuras 4.25 e 4.27 mostram a visualização tridimensional não suavizada de uma idade da simulação definida pelo usuário, ou seja, as células do *grid* em forma de colunas e as figuras 4.26 e 4.28 mostram respectivamente as superfícies 4.25 e 4.27 suavizadas pelo algoritmo mostrado acima.

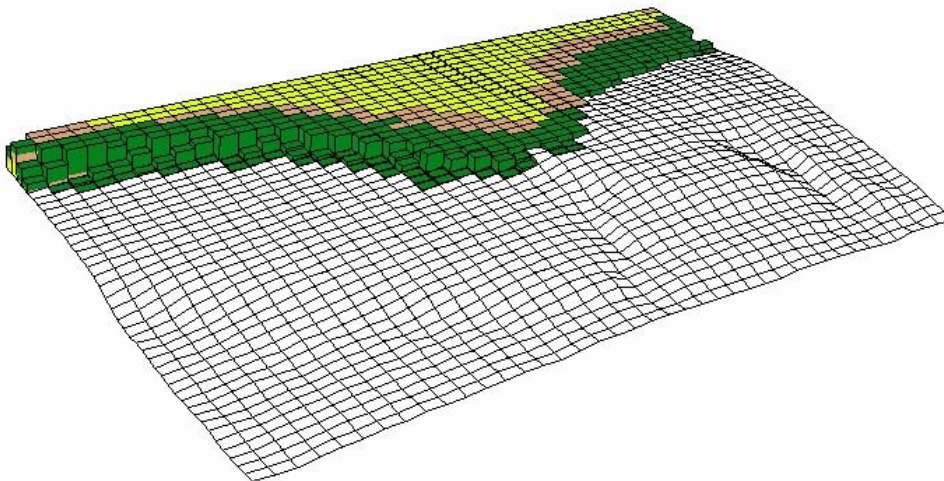


Figura 4.25: Visualização tridimensional, com as células do *grid* em forma de colunas, de uma idade definida pelo usuário.

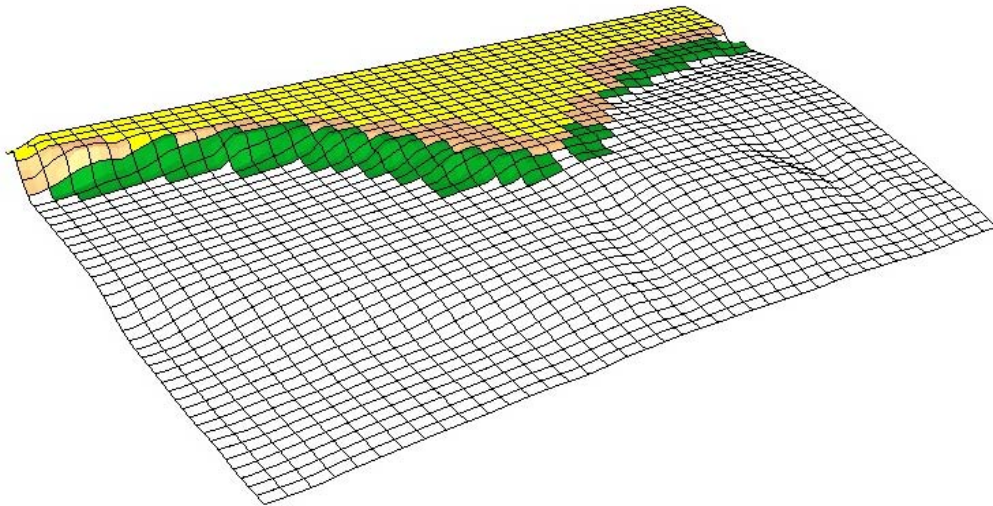


Figura 4.26: Superfície suavizada com o algoritmo mostrado.

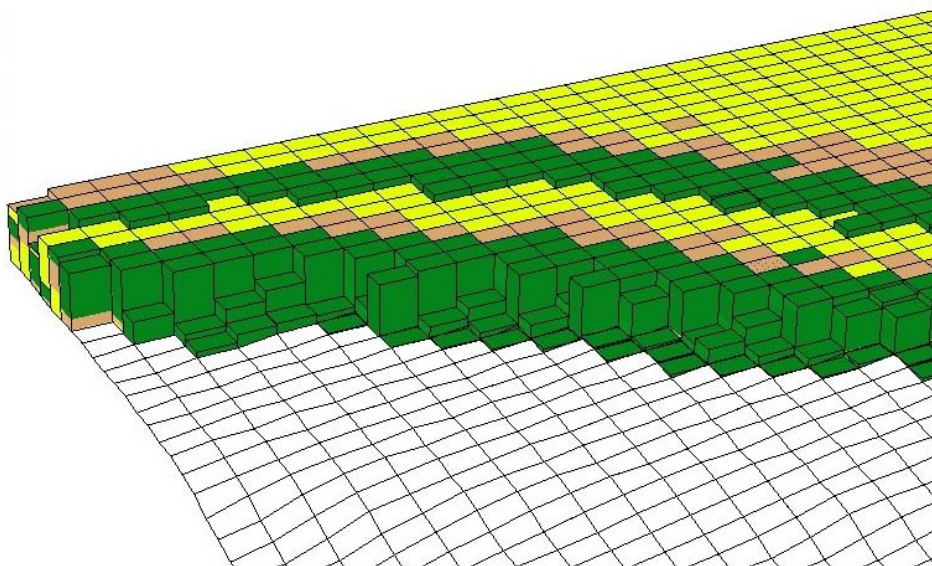


Figura 4.27: Detalhe da visualização tridimensional, com as células do *grid* em forma de colunas, de uma idade definida pelo usuário.

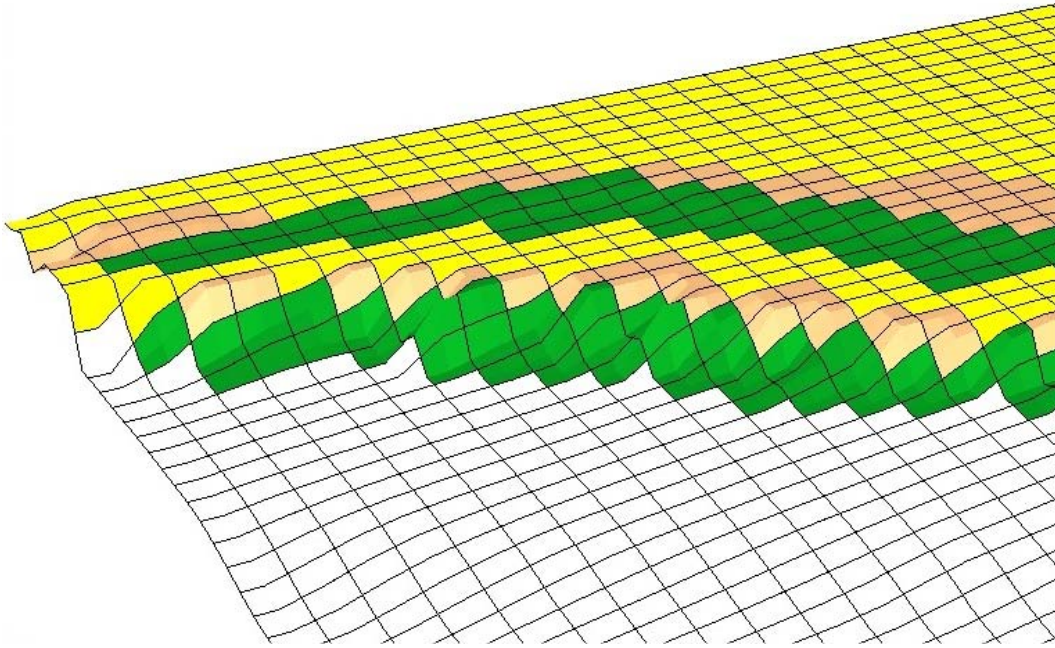


Figura 4.28: Detalhe da superfície suavizada com o algoritmo mostrado.

5 Exemplos

Neste capítulo serão mostrados alguns exemplos que foram simulados com o STENO. Primeiramente será mostrada a simulação da formação das parasseqüências. Depois, será mostrada uma simulação realística utilizando como embasamento de um trecho da bacia de Campos. No terceiro exemplo é mostrada a simulação de um rio chegando na costa marítima. No último exemplo a batimetria da área da simulação foi modificada de forma a simular os ambientes plataformais, de talude e bacia mostrando principalmente alguns *canyons* no final da plataforma início do talude um rio chegando na costa marítima, corrente no sopé do talude e alguns domos de sal na bacia.

5.1

Exemplo 1

Este exemplo mostra a simulação da formação dos conjuntos das parasseqüências. Segundo Van Wagoner et al. (1988), parasseqüências e conjuntos de parasseqüências são os blocos básicos das seqüências deposicionais. Uma parasseqüência é uma sucessão concordante de camadas ou conjunto de camadas geneticamente relacionadas limitadas por uma discordância e uma superfície de inundação. Um conjunto de parasseqüências é definido como uma sucessão de parasseqüências geneticamente relacionadas, formando um padrão de empilhamento característico e limitado por superfícies de inundação máxima (de expressão regional) ou suas superfícies correlatas. O padrão de empilhamento das parasseqüências pode ser progradacional, retrogradacional e agradacional (processo de preenchimento vertical da bacia), dependendo da razão entre a taxa de deposição e a taxa de acomodação (figura 5.1).

Como no STENO o módulo referente à erosão ainda não está implementado (este é um dos trabalhos futuros sugeridos), a simulação será efetuada no trecho da curva eustática onde ocorre subida no nível do mar. Logo, pretende-se simular o trecho mostrado na figura 5.2.

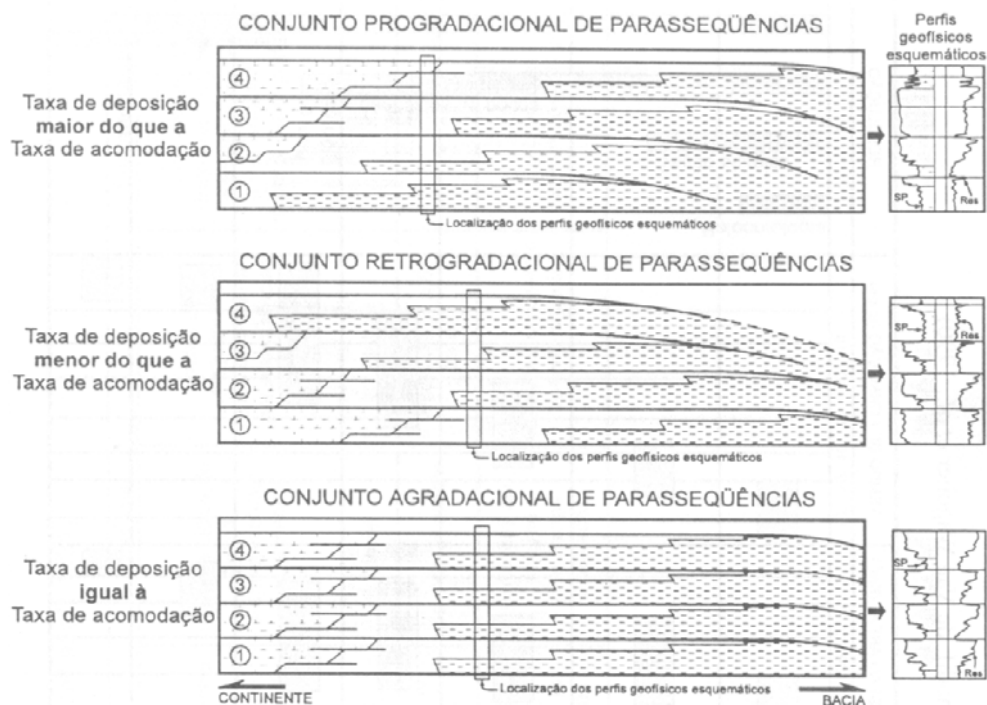


Figura 5.1: Conjunto de parasseqüências, de acordo com Van Wagoner et al (1998).

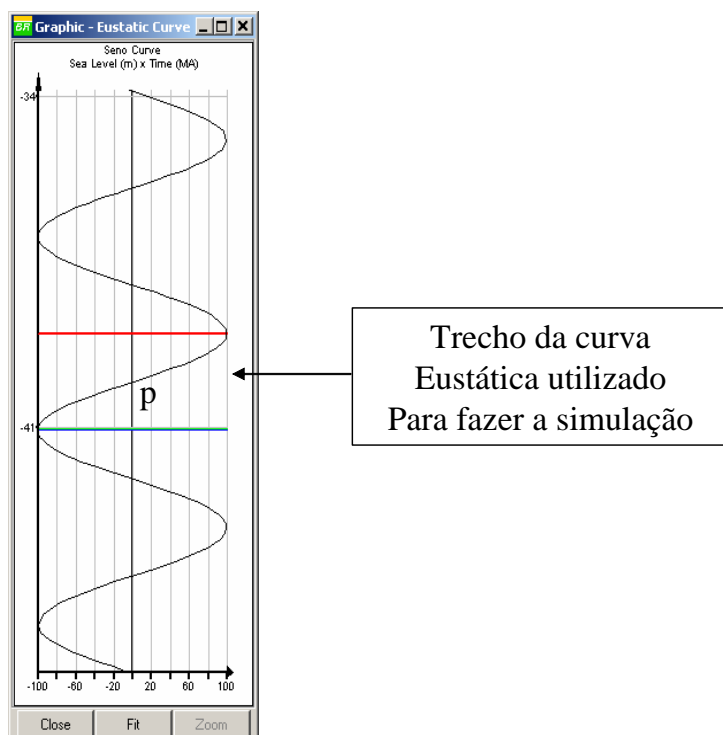


Figura 5.2: Trecho utilizado para fazer a simulação das parasseqüências, correspondente ao TST.

Neste trecho, o nível relativo do mar atinge sua posição mais baixa, tem-se então o final do Trato de Sistemas de Mar Baixo – TSMB (*Lowstand System Tract*

– LST). O nível do mar começa a subir, gerando seqüências do tipo retrogradacionais. Este trecho de subida é chamado de Trato de Sistema Transgressivo – TST (*Transgressive System Tract* – TST). No ponto de inflexão, ponto *P* da figura 5.2, as seqüências geradas são do tipo agradacionais com desenvolvimento de bacia faminta. A partir desde ponto (final do TST), são geradas seqüências progradacionais. Iniciando-se o Trato de Sistemas de Mar Alto – TSMA (*Highstand System Tract* – HST). Depois o ciclo se repete e novamente tem-se TSMB. Os TSMA e TSMB correspondem ao trecho onde o nível relativo do mar está em queda. No TSMB ocorre o fenômeno de erosão, módulo que ainda não está implementado no STENO. A figura 5.3 mostra os tratos de sistemas descritos acima.

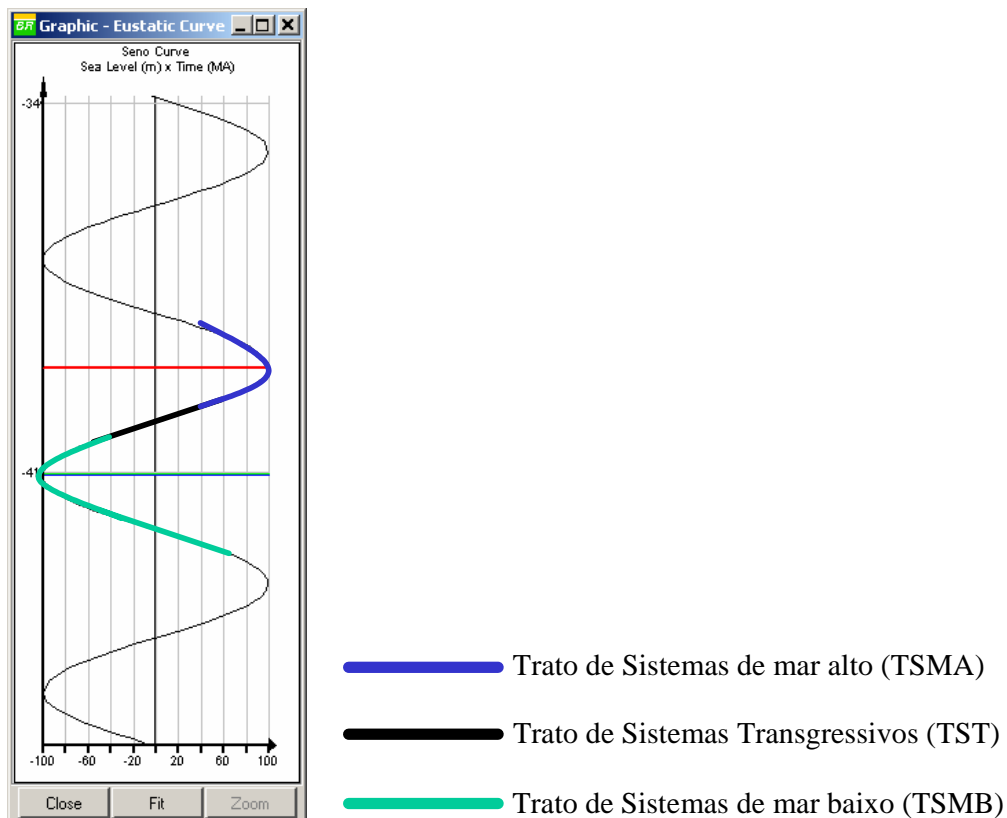


Figura 5.3: Tratos de sistemas associados à curva eustática (adaptado de Posamentier & Vail, 1998).

Este exemplo foi simulado utilizando um *grid* plano de 100 km ao longo da linha de costa e 300 km bacia adentro com 40 células em cada direção. A subsidência foi mantida constante e igual a zero. Logo, o espaço disponível será função apenas da variação da curva eustática. O tempo total da simulação é de 2 Ma (milhões de anos) com passo de 0.25 Ma. Foi adotada uma curva eustática

senoidal com amplitude de 100 m. Para melhor visualizar os resultados, foi feito um corte longitudinal perpendicular a linha de costa (50 km). O aporte foi definido em cada passo da simulação sendo função do espaço disponível para deposição.

A figura 5.4 mostra o início da simulação. Até o ponto *P*, (figuras 5.5, 5.6) pode-se observar seqüências retrogradacionais, ou seja, tem-se taxa deposição menor que a taxa de acomodação. As seqüências do tipo agradacionais (taxa de deposição igual à taxa de criação de espaço para acomodação) podem ser vistas nas figura 5.7 e 5.8. Na figura 5.9 tem-se início as seqüências progracionais (taxa de deposição maior que a taxa de acomodação). Estas seqüências também podem ser vista nas figuras 5.10 e 5.11. A figura 5.12 mostra o aspecto final da seção depois da simulação, mostrando os três tipos de paraseqüências.

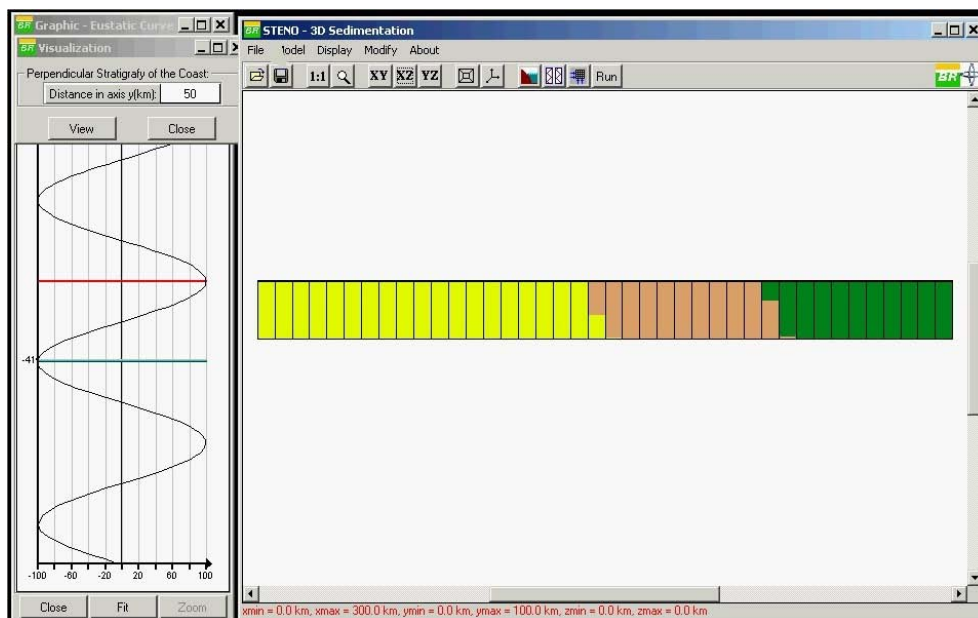


Figura 5.4: Passo um, início da simulação.

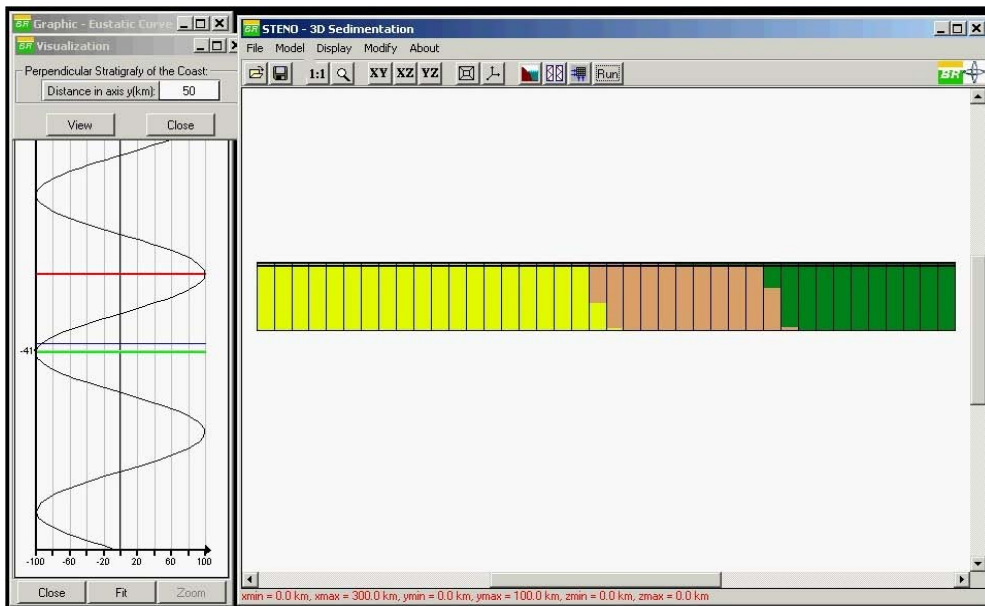


Figura 5.5: Passo dois, seqüência retrogradacional.

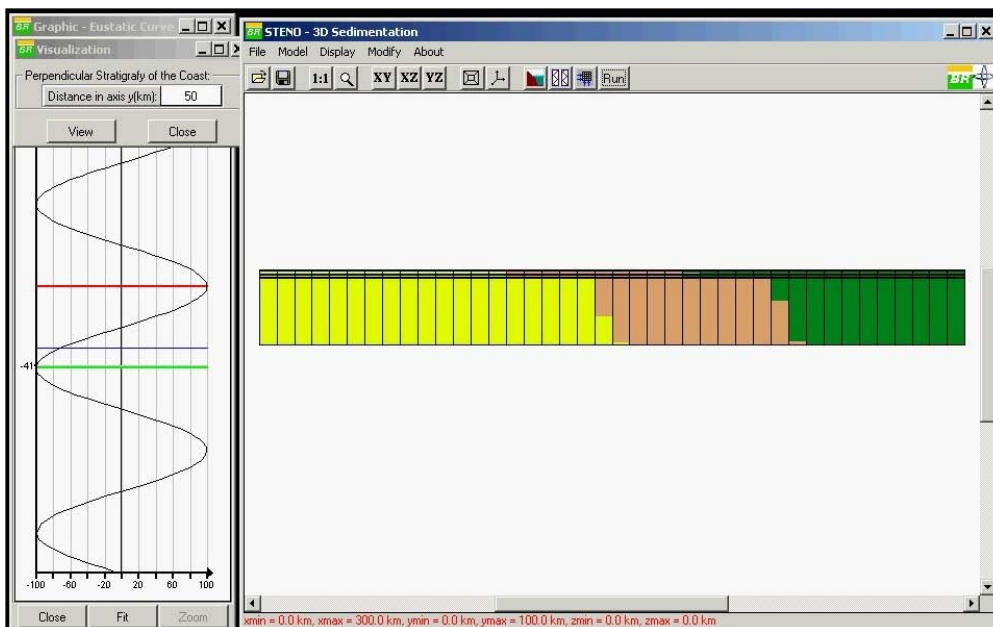


Figura 5.6: Passo três, seqüência retrogradacional.

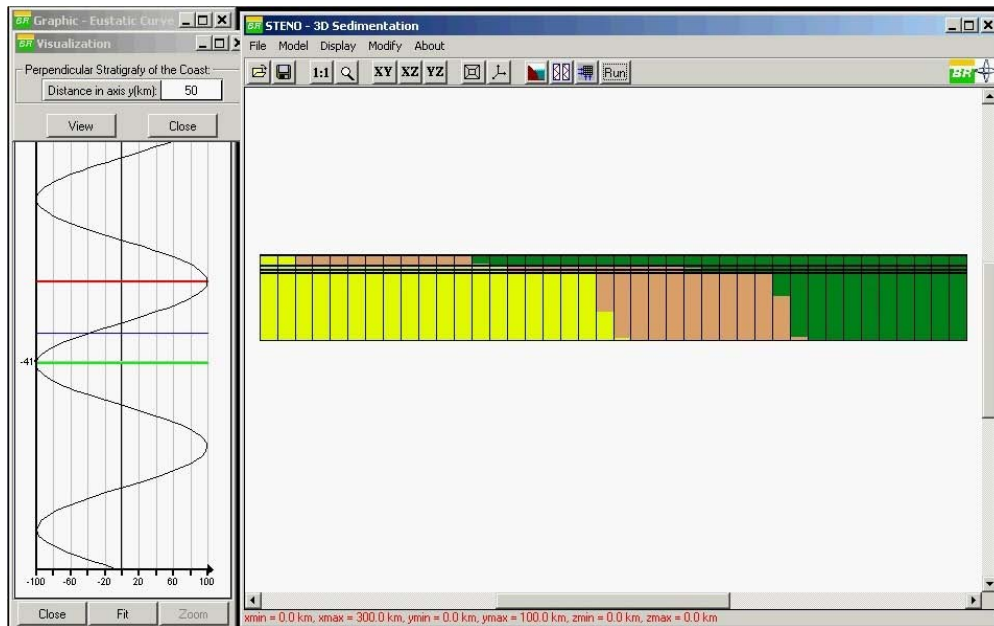


Figura 5.7: Passo quatro, seqüência retrogradacional com alguma característica de agadação.

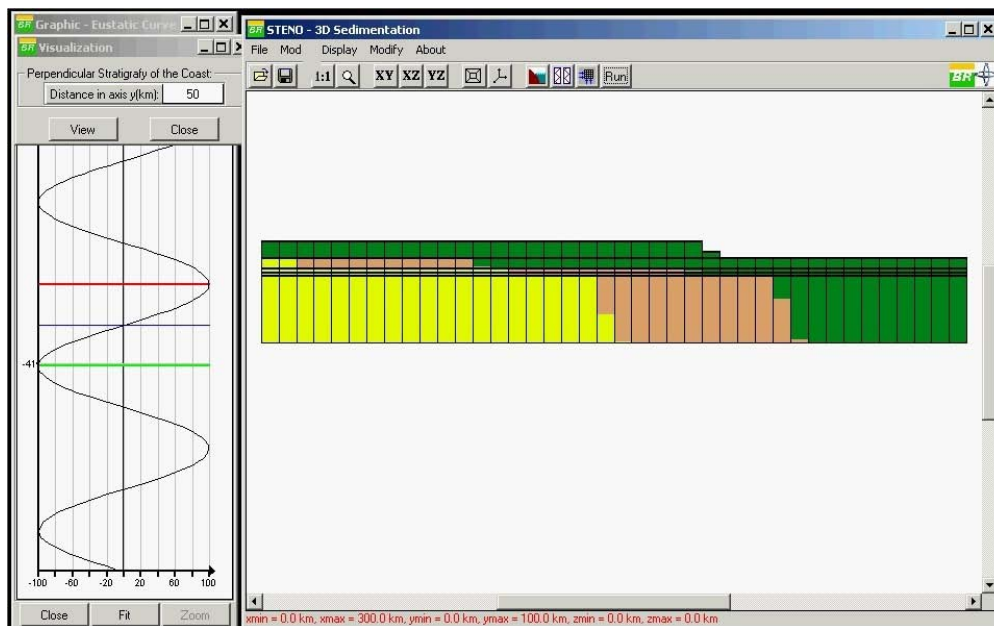


Figura 5.8: Passo cinco, agradacional.

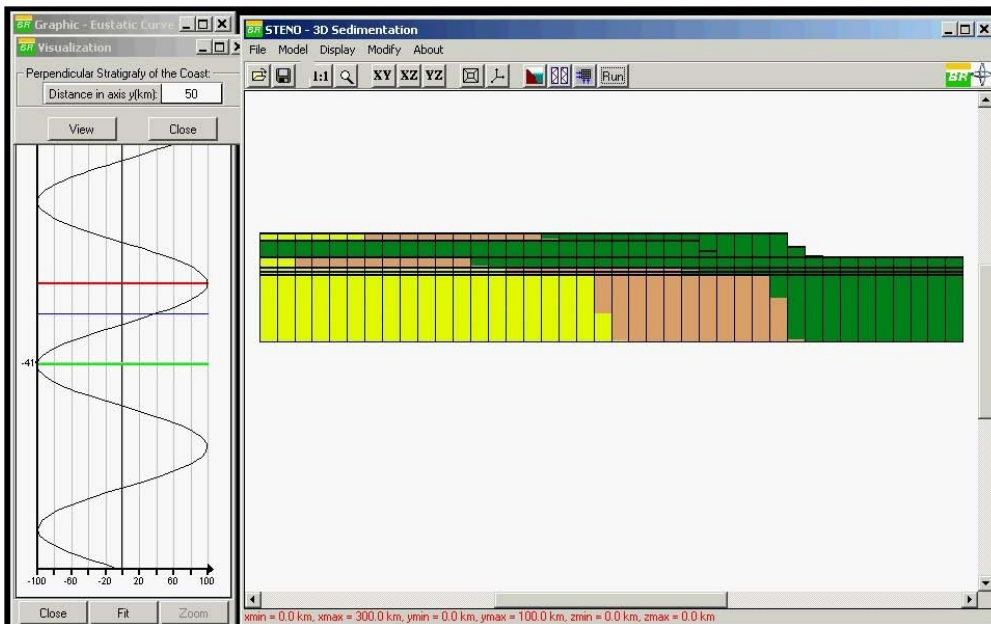


Figura 5.9: Passo seis, início de seqüências progradacional.

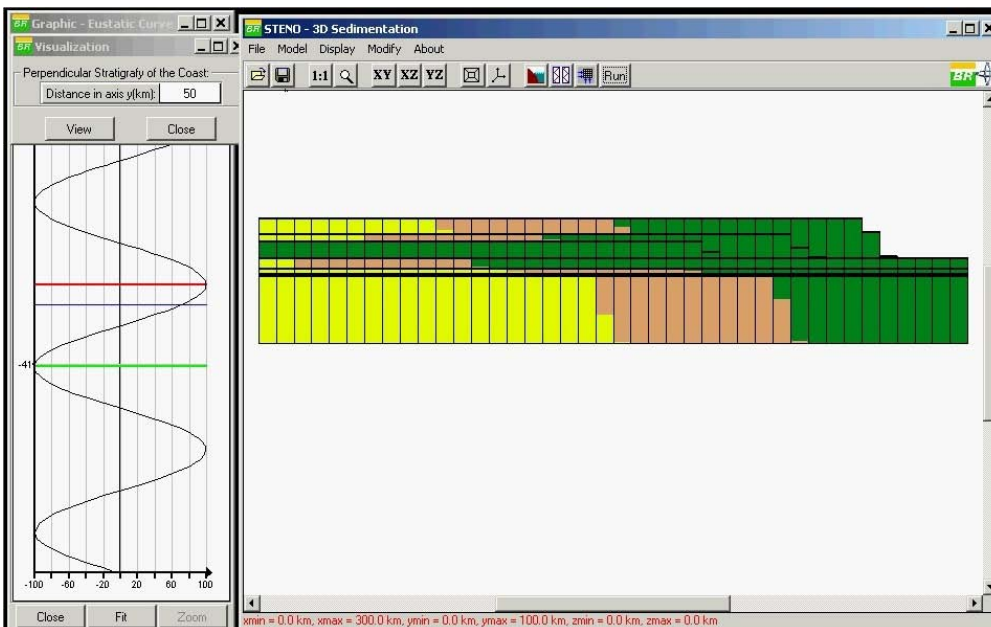


Figura 5.10: Passo sete, seqüência progradacional.

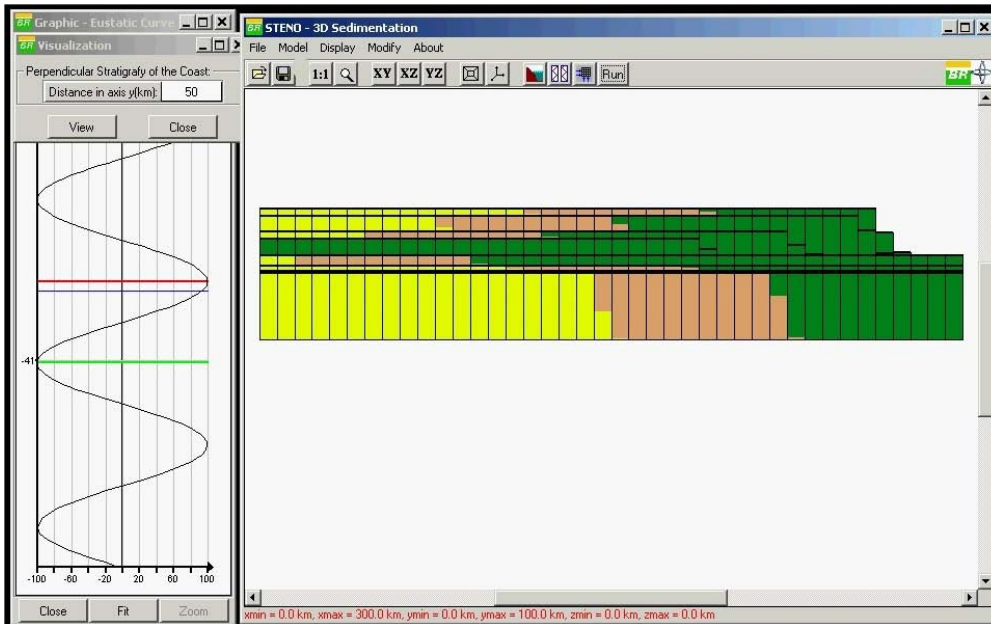


Figura 5.11: Passo oito, seqüência progradacional.

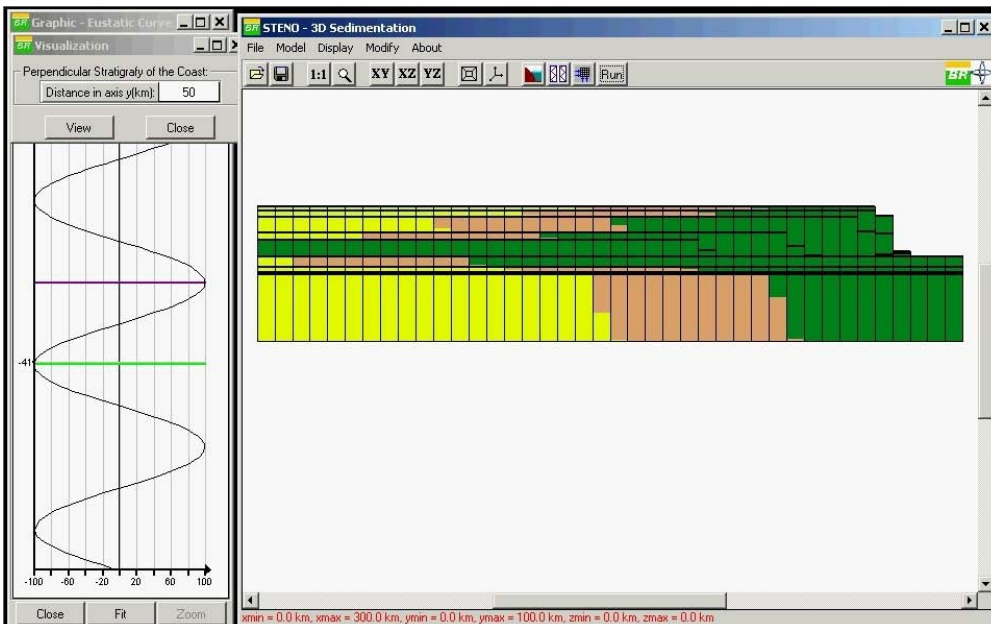


Figura 5.12: Aspecto final da seção depois da simulação.

5.2

Exemplo 2

Esta segunda simulação é um exemplo realístico onde é mostrado o processo de sedimentação implementado em uma região de 100 km ao longo da linha de costa e 60 km bacia adentro. A batimetria desta área corresponde a um trecho da bacia de Campos, localizada no norte Estado do Rio de Janeiro.

Os parâmetros iniciais utilizados na simulação estão mostrados na figura 5.13. O tempo inicial foi de -265 Ma, o tempo final foi de -230 Ma. O passo escolhido foi de 5 Ma, totalizando uma simulação de 7 passos.

Set Time:		Sea level:	
Start Time (MA):	-265	Reference Sea Level (km):	2.7
Stop Time (MA):	-230	Level of influence of the waves (km):	2.68
Step Time (MA):	5		
Total Step (MA):	7		

Figura 5.13: Parâmetros iniciais utilizados na simulação.

Os pontos onde se conhece como se varia a subsidência ao longo da simulação estão definidos na tabela da figura 5.14. Os pontos escolhidos podem ser visualizados na figura 5.15.

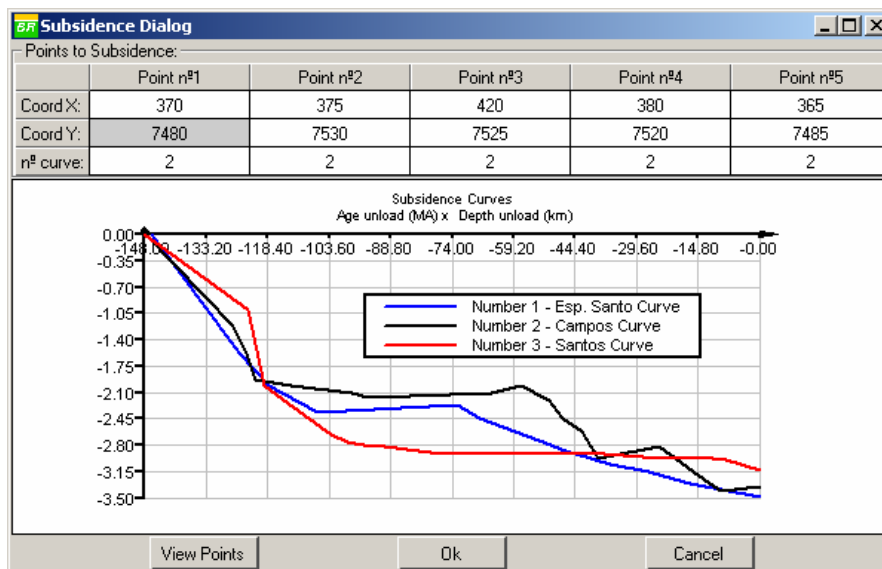


Figura 5.14: Definição da curva de subsidência.

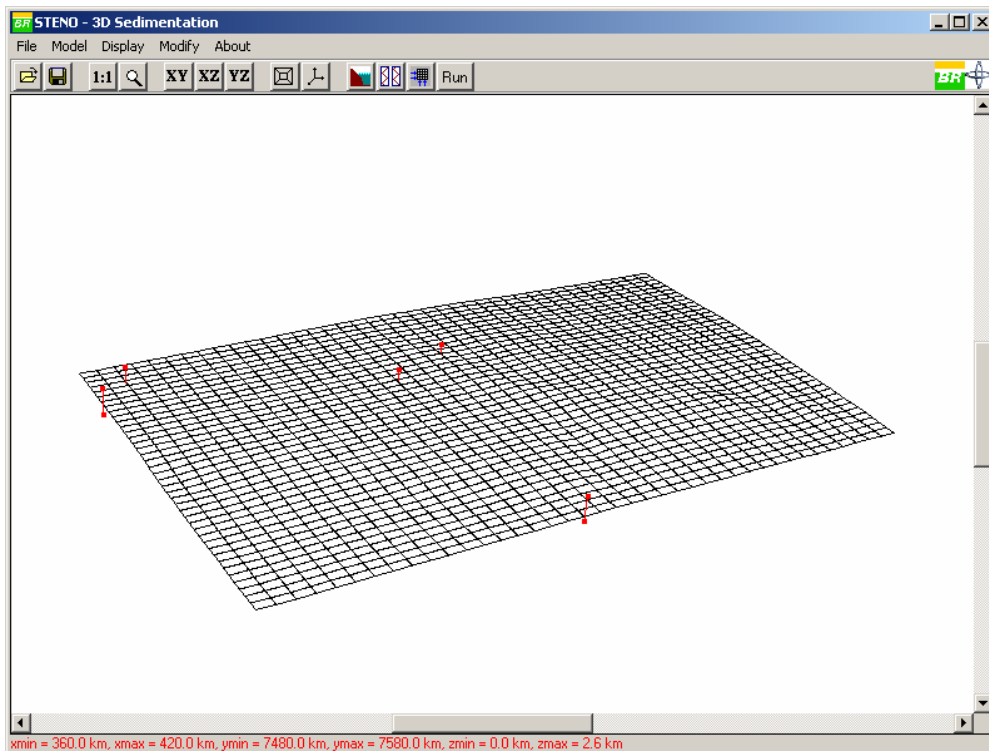


Figura 5.15: Visualização dos pontos onde se conhece a variação da subsidência.

O aporte foi considerado constante, para cada fração litológica, ao longo da linha de costa. Para cada passo da simulação foram considerados os seguintes volumes: volume de areia (124.8 km^3), volume de silte (378.3 km^3) e o volume de argila (374.4 km^3). Como da linha de costa serão calculadas 39 *linhas de correntes*, cada uma receberá o seguinte volume de sedimentos: 3.2 km^3 para areia, 9.7 km^3 para o silte e 9.6 km^3 para a argila, como mostra a figura 5.16.

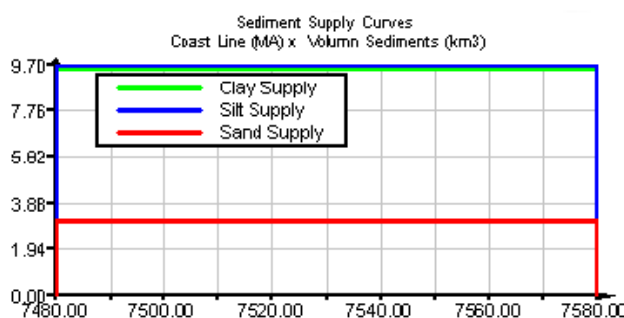


Figura 5.16: Função de aporte utilizada nesta simulação.

Definido os parâmetros de entrada da simulação, como o embasamento se modificará devido à subsidência e dos valores do aporte de sedimentos por litologia, restando definir as velocidades de aporte e de corrente. Neste exemplo

foi definida a velocidade de aporte como sendo o dobro da velocidade de corrente. A figura 5.17 mostra as velocidades de contorno.

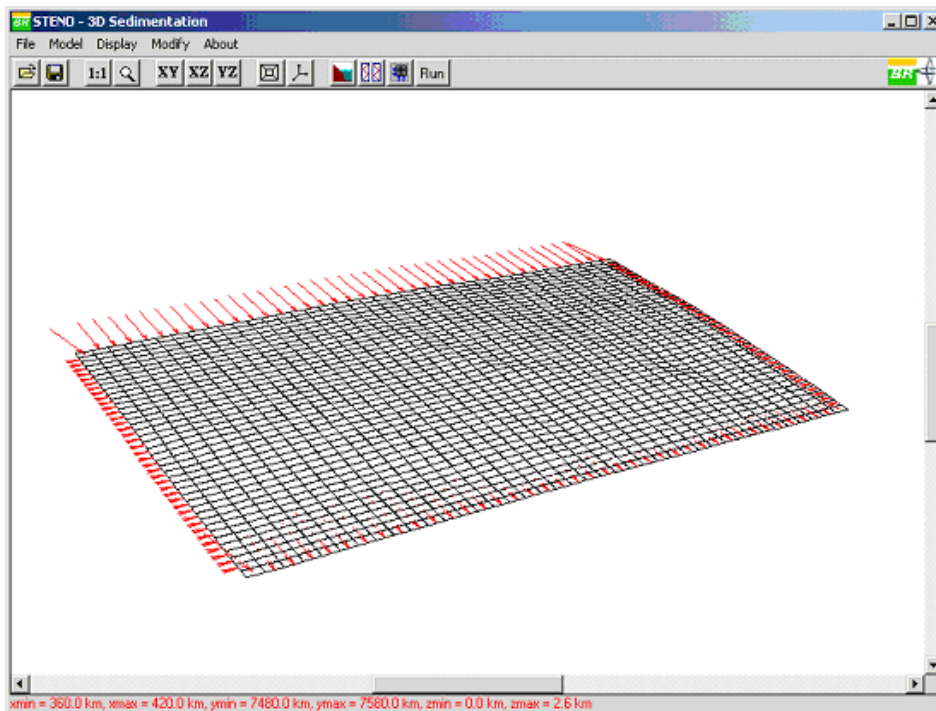


Figura 5.17: Velocidades de contorno utilizadas para determinar o campo de velocidades e as *linhas de correntes*.

As figuras 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 mostram os passos gerados pela análise da simulação de sedimentação. A figura 5.25 mostra a configuração final depois do processo de sedimentação.

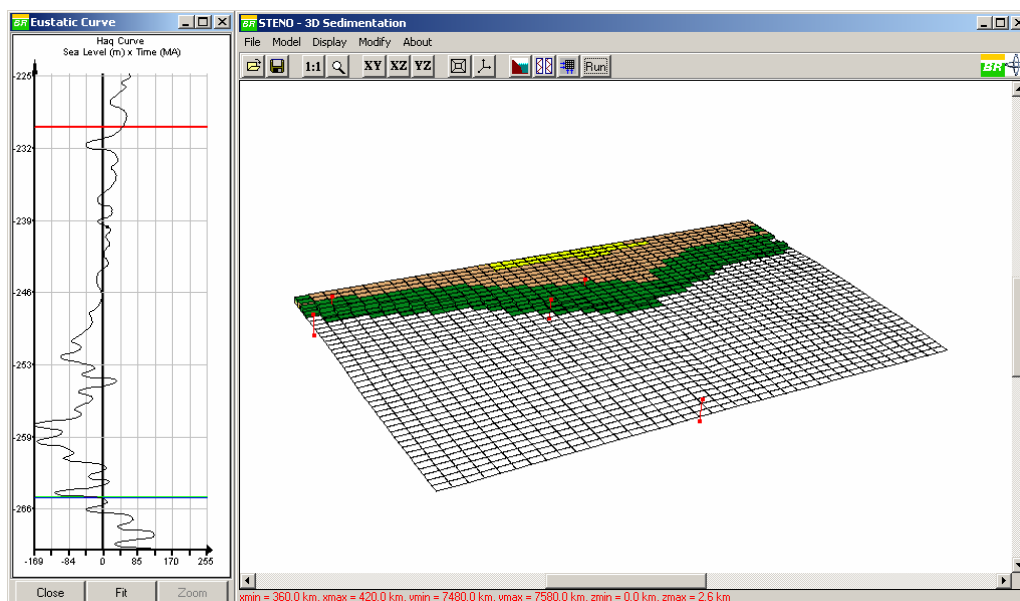


Figura 5.18: Passo um da simulação.

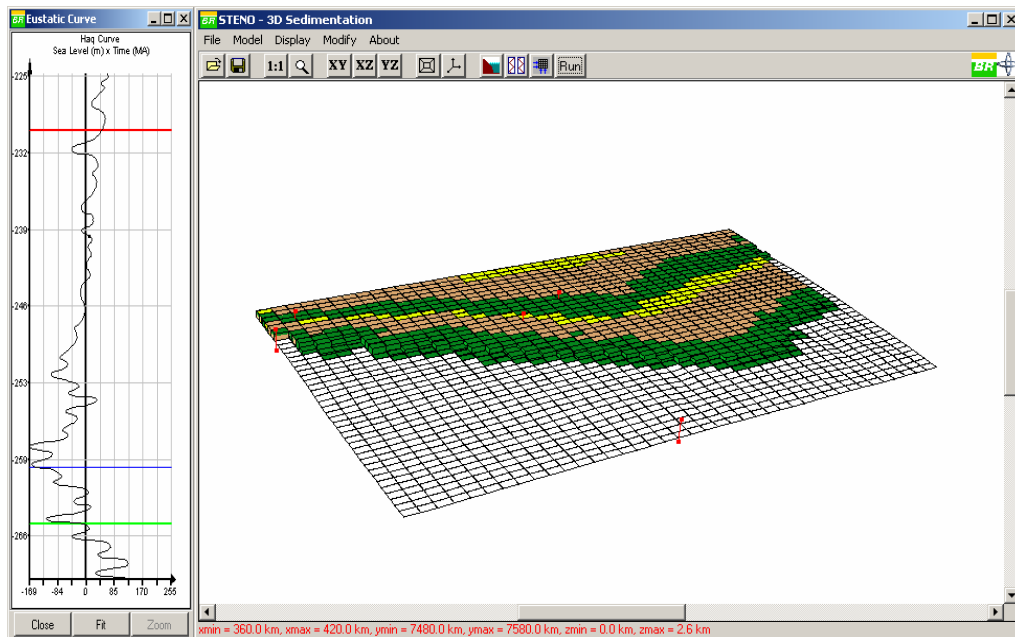


Figura 5.19: Passo dois da simulação

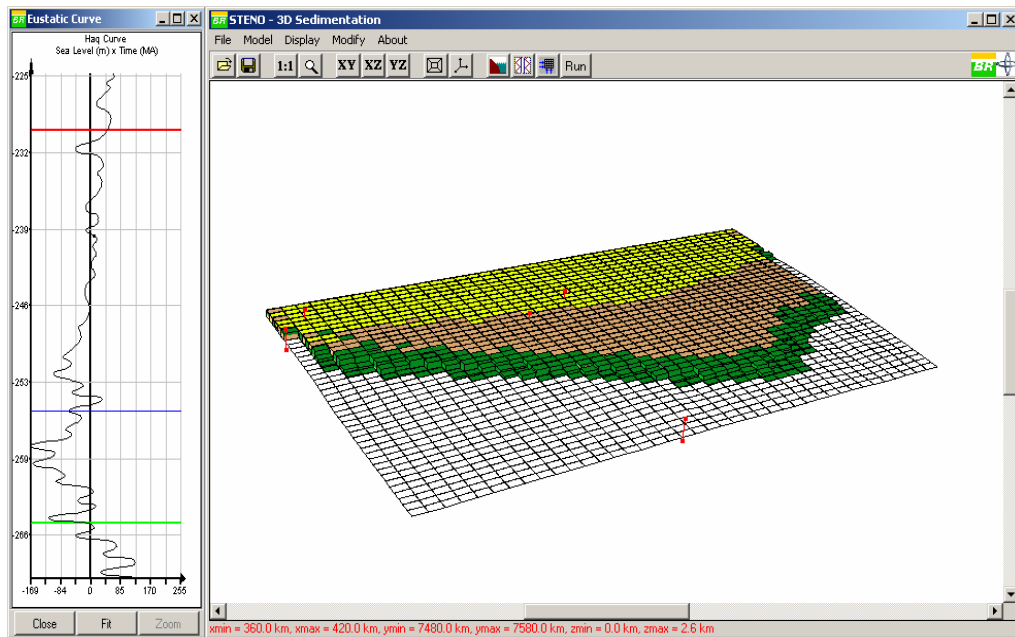


Figura 5.20: Passo três da simulação.

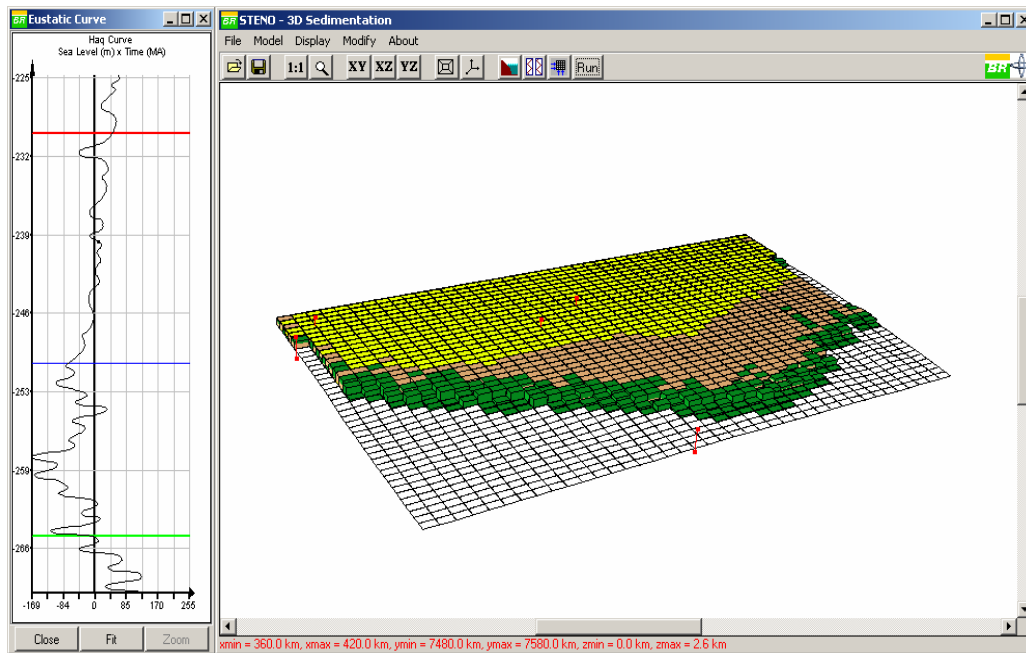


Figura 5.21: Passo quatro da simulação.

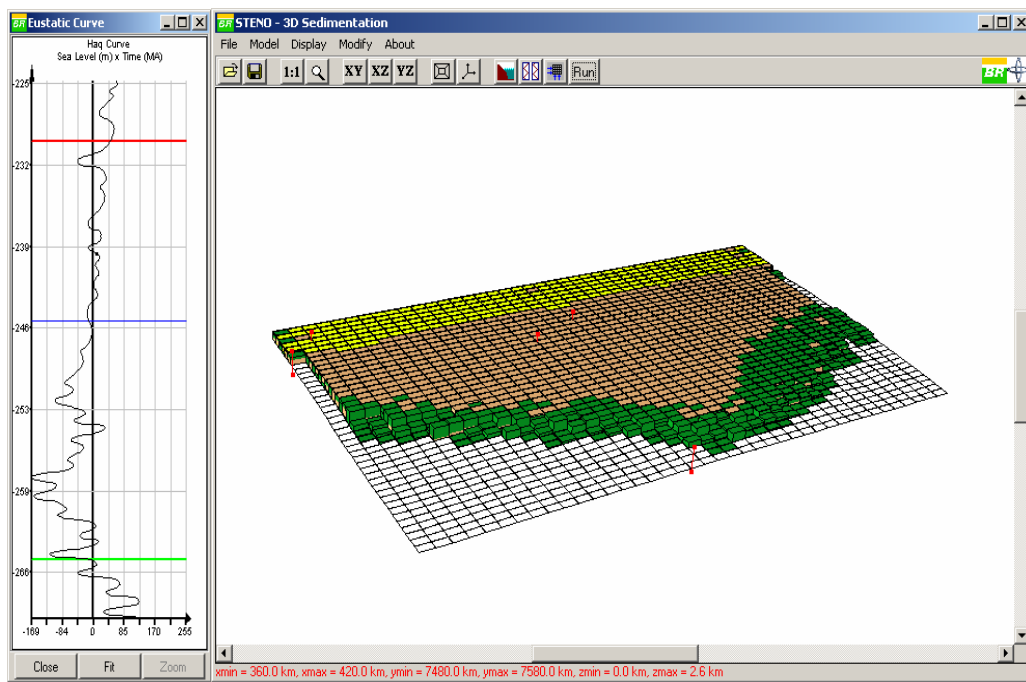


Figura 5.22: Passo cinco da simulação.

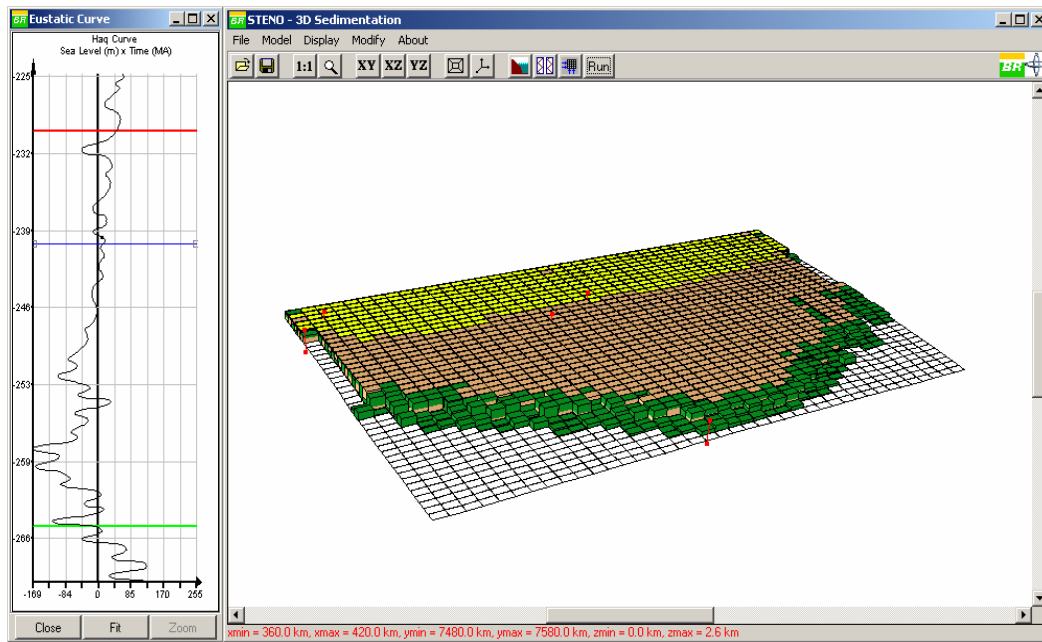


Figura 5.23: Passo seis da simulação.

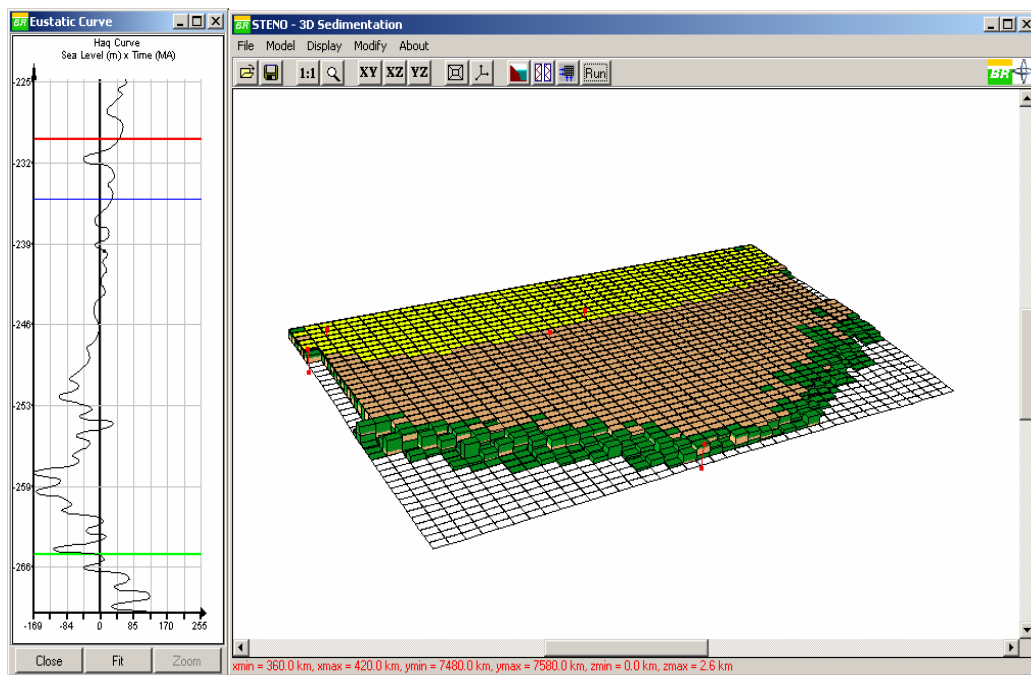


Figura 5.24: Passo sete da simulação.

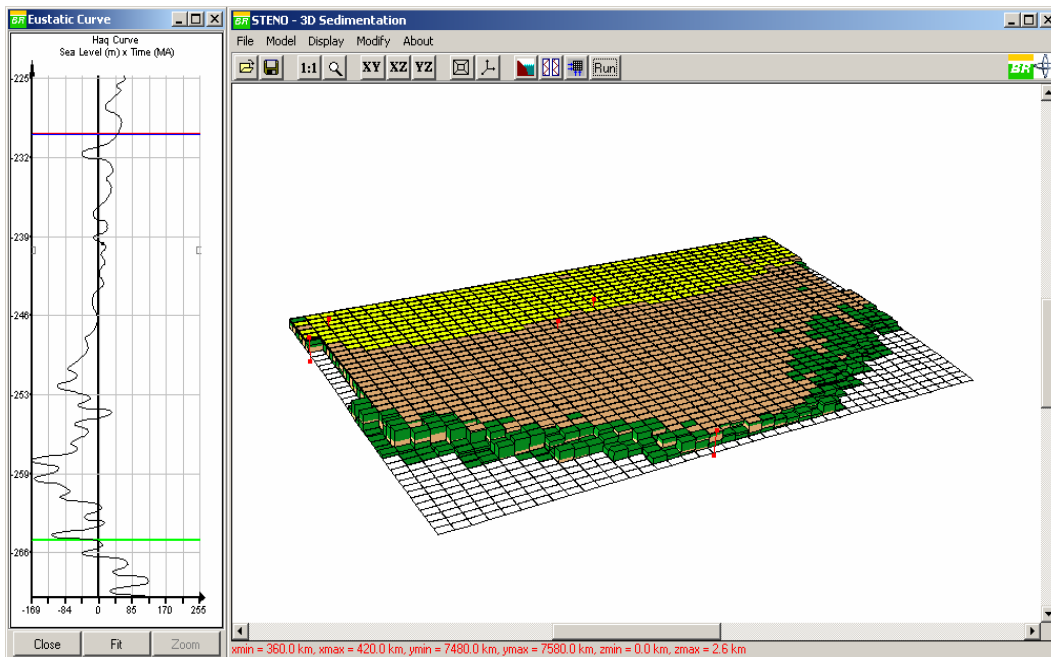


Figura 5.25: Visualização final da bacia após a simulação.

5.3

Exemplo 3

Este terceiro exemplo mostra o processo de sedimentação em uma região de 100 km ao longo da linha de costa e 60 km bacia adentro. A batimetria desta área corresponde a um trecho da bacia de Campos, localizada no norte Estado do Rio de Janeiro.

Os parâmetros iniciais utilizados na simulação estão mostrados na figura 5.26. O tempo inicial foi de -265 Ma, o tempo final foi de -230 Ma. O passo escolhido foi de 7 Ma, totalizando uma simulação de 5 passos.

Set Time:		Sea level:	
Start Time (MA):	-265	Reference Sea Level (km):	2.6
Stop Time (MA):	-230	Level of influence of the waves (km):	2.58
Step Time (MA):	7		
Total Step (MA):	5		

Figura 5.26: Parâmetros iniciais utilizados na simulação.

O aporte de sedimentos utilizado está mostrado na figura 5.27. Ao longo da linha de costa existe uma região onde os volumes de sedimentos para cada litologia são 5 vezes maiores do que os volumes das outras regiões da linha de costa. Com isso pretende-se simular um rio chegando na costa marítima. As figuras 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35, 5.36, 5.37, 5.38, 5.39, 5.40, 5.41 e 5.42 mostram para cada passo, os sedimentos depositados, as linhas de correntes calculadas e os horizontes geológicos.

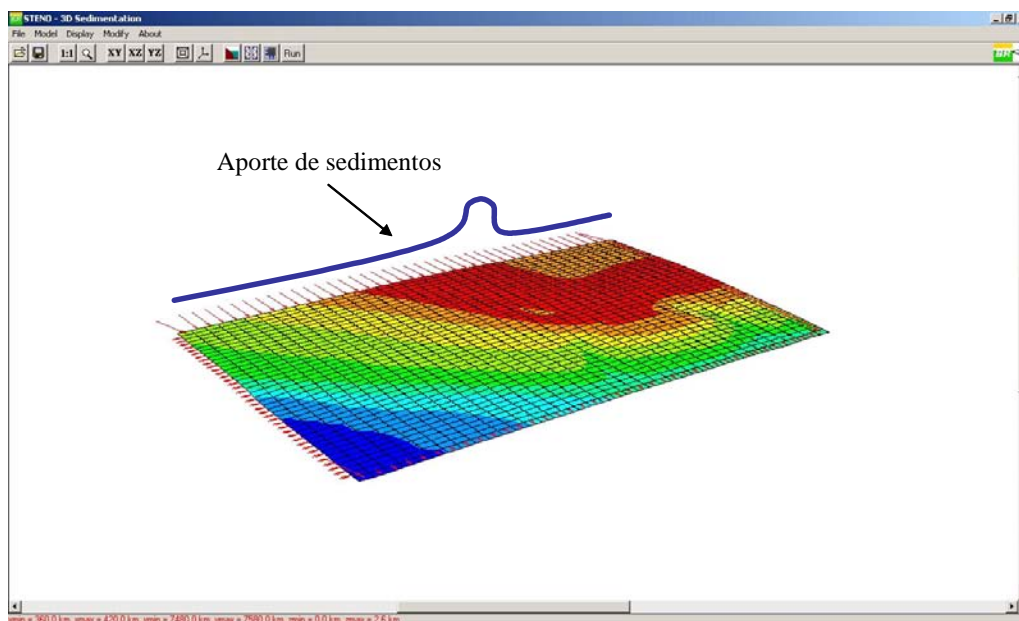


Figura 5.27: Aporte de sedimentos utilizado no exemplo 3.

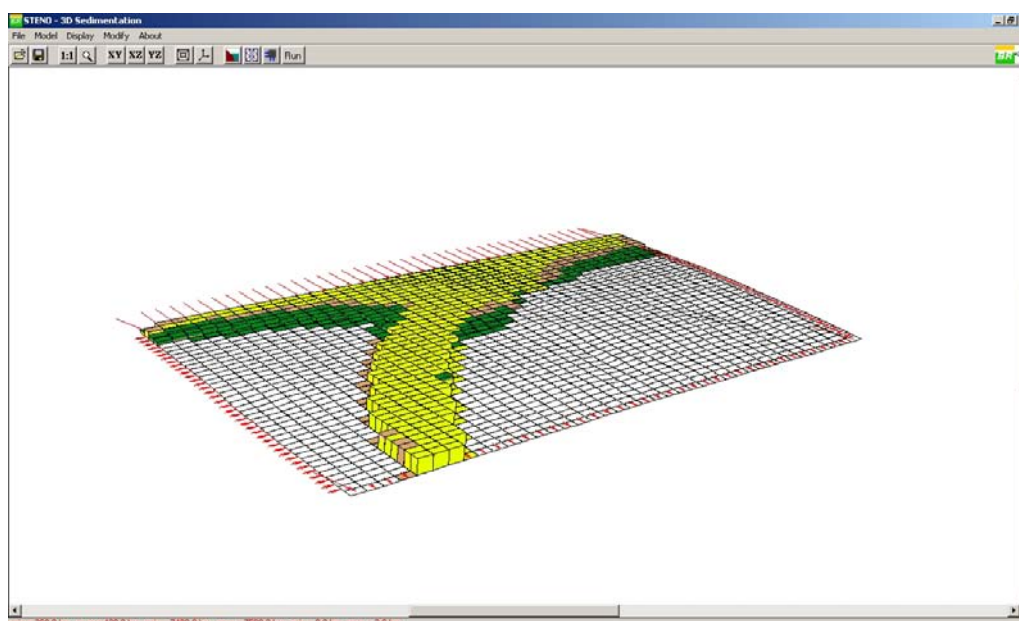


Figura 5.28: Primeiro passo da simulação.

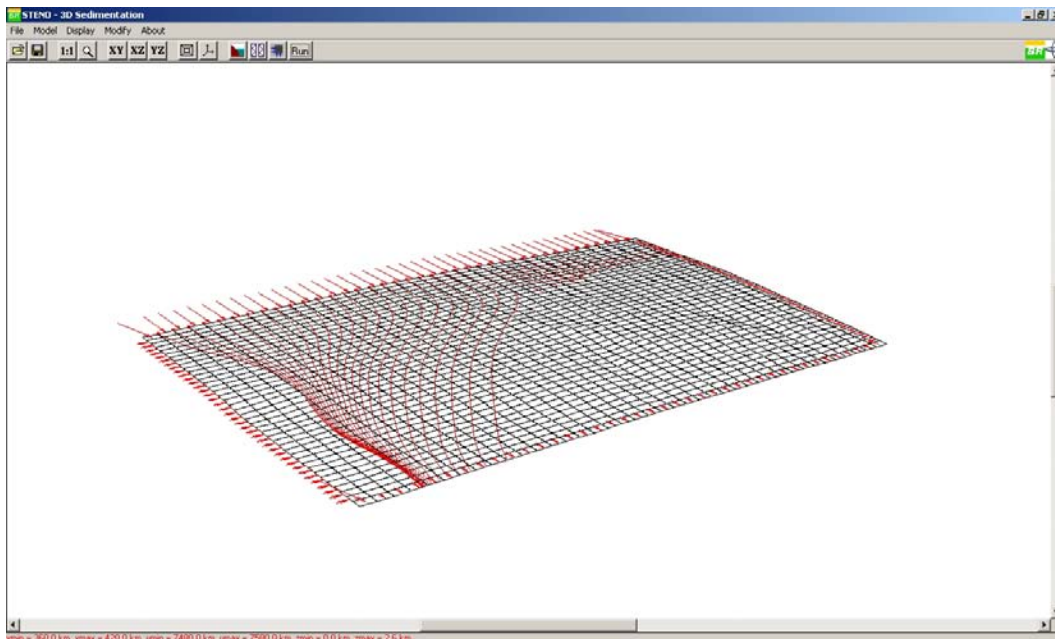


Figura 5.29: Linhas de correntes da análise do primeiro passo da simulação.

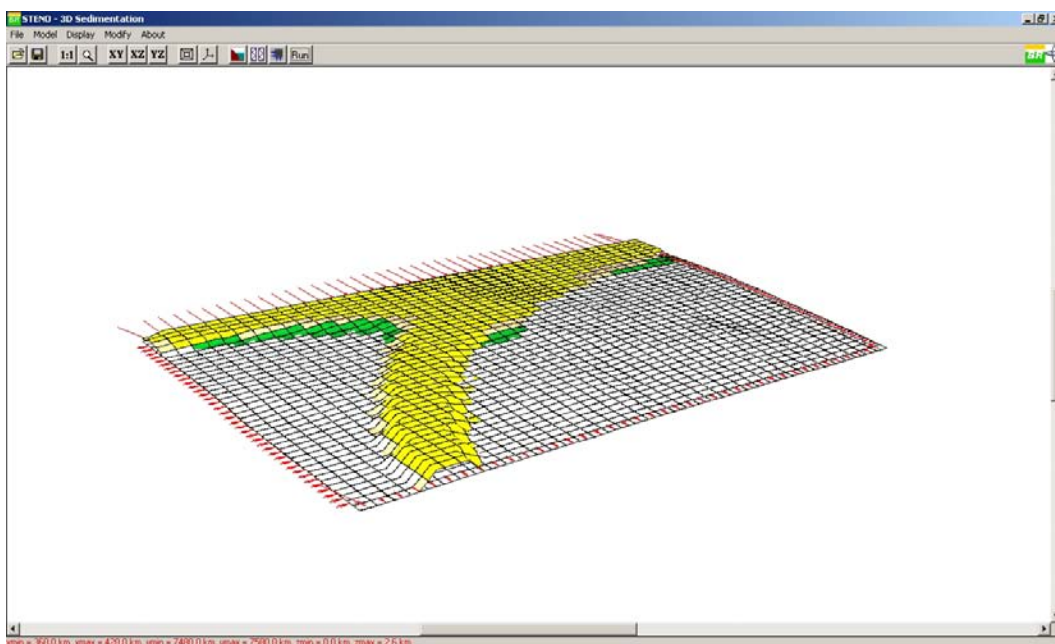


Figura 5.30: Horizonte geológico do primeiro passo da simulação.

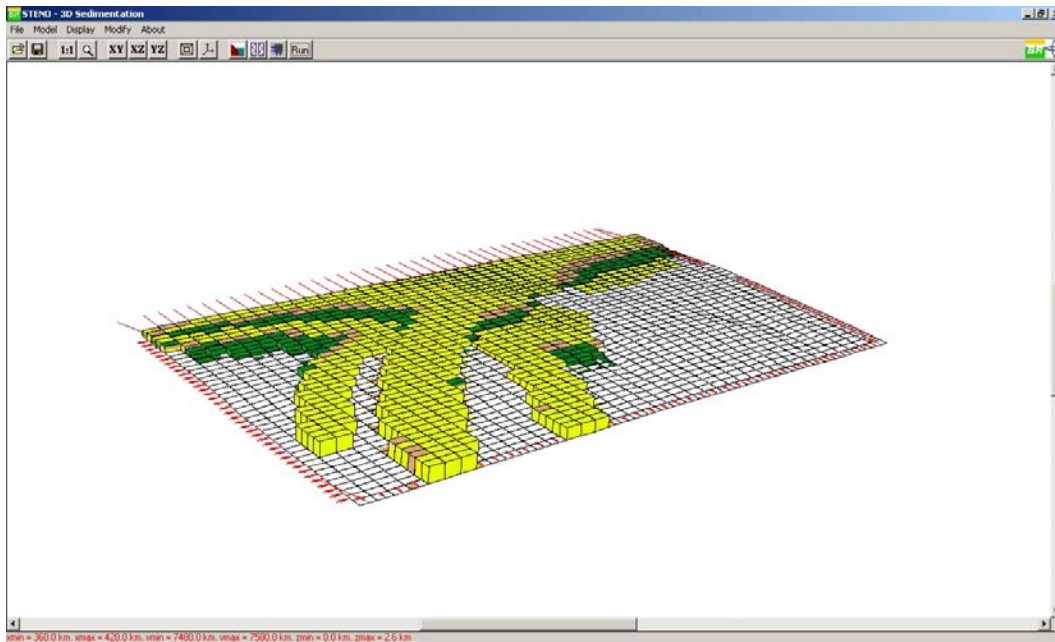


Figura 5.31: Segundo passo da simulação.

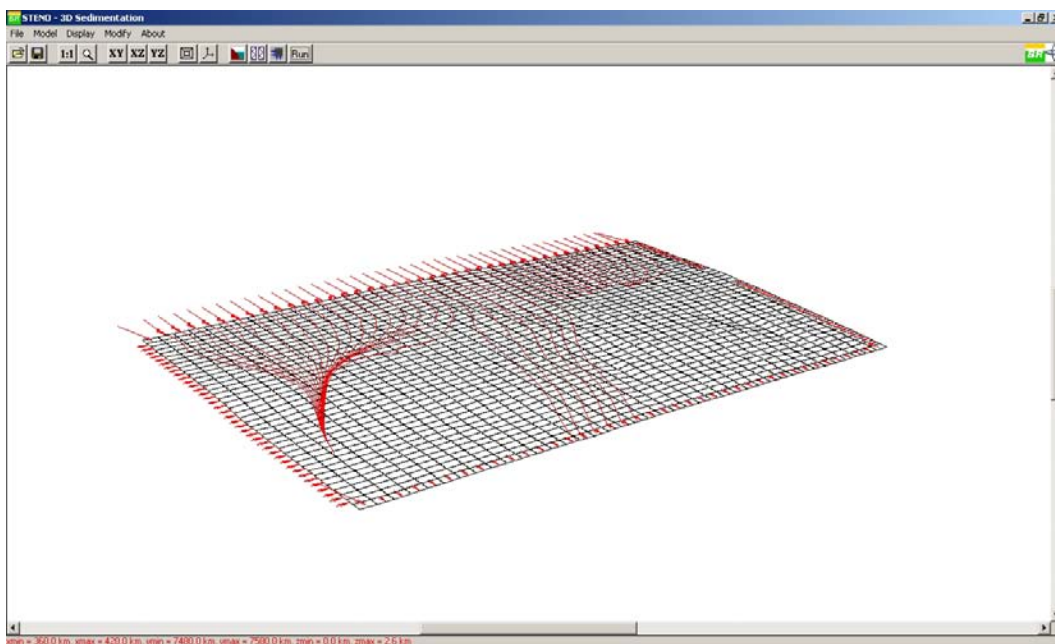


Figura 5.32: Linhas de correntes do segundo passo da simulação.

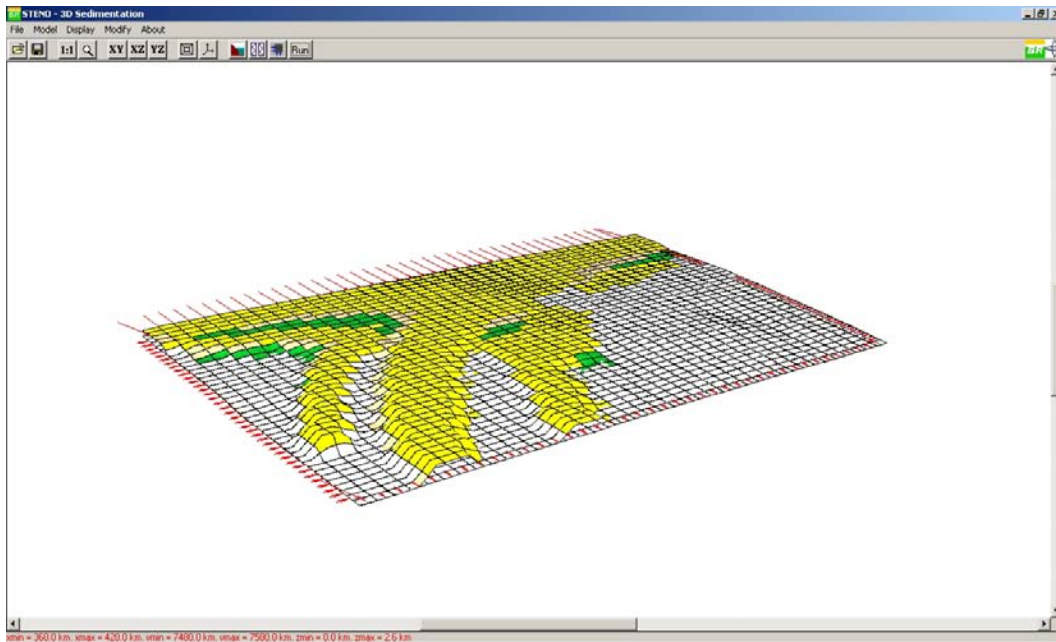


Figura 5.33: Horizonte geológico do segundo passo da simulação.

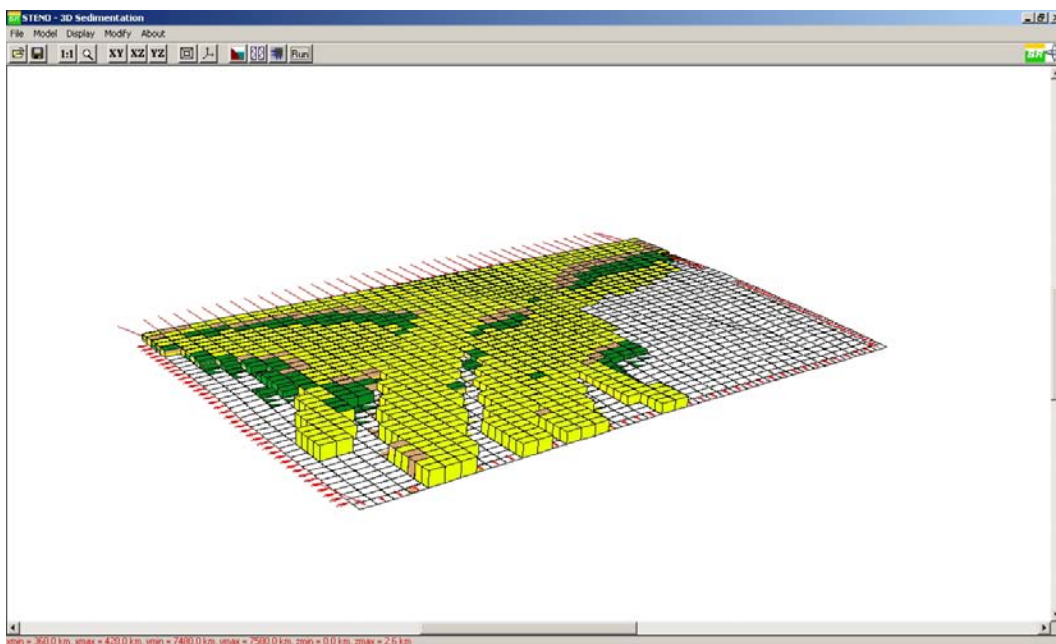


Figura 5.34: Terceiro passo da simulação.

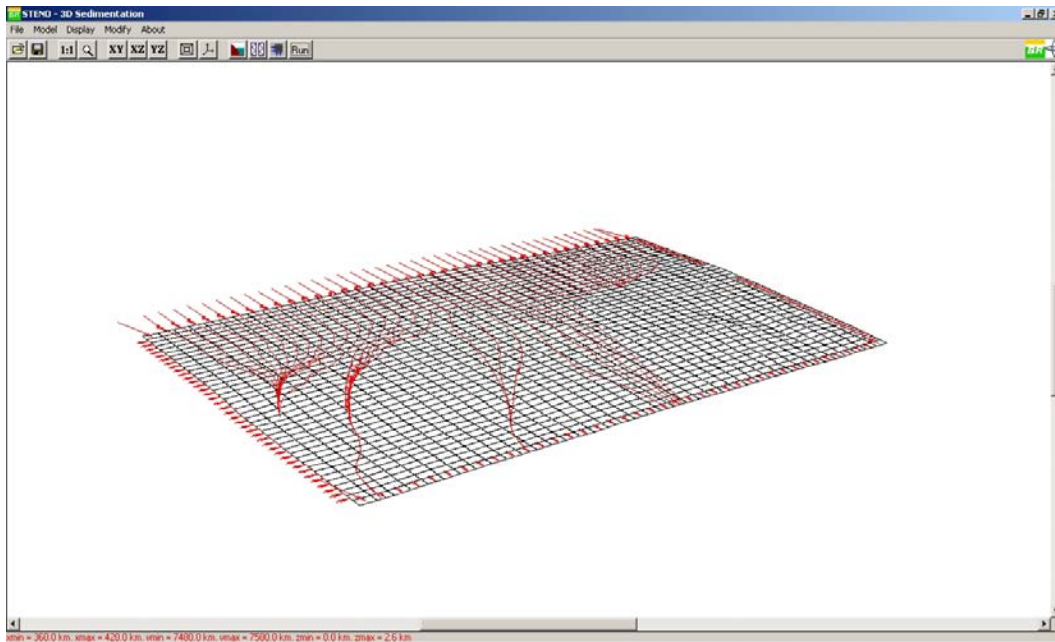


Figura 5.35: Linhas de correntes do terceiro passo da simulação.

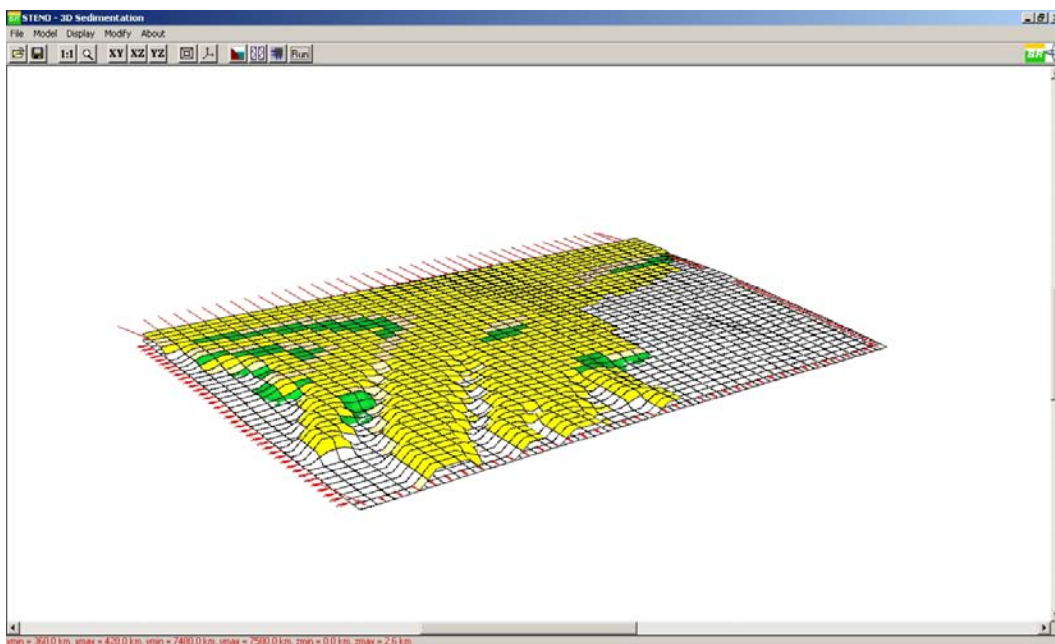


Figura 5.36: Horizonte geológico do terceiro passo da simulação.

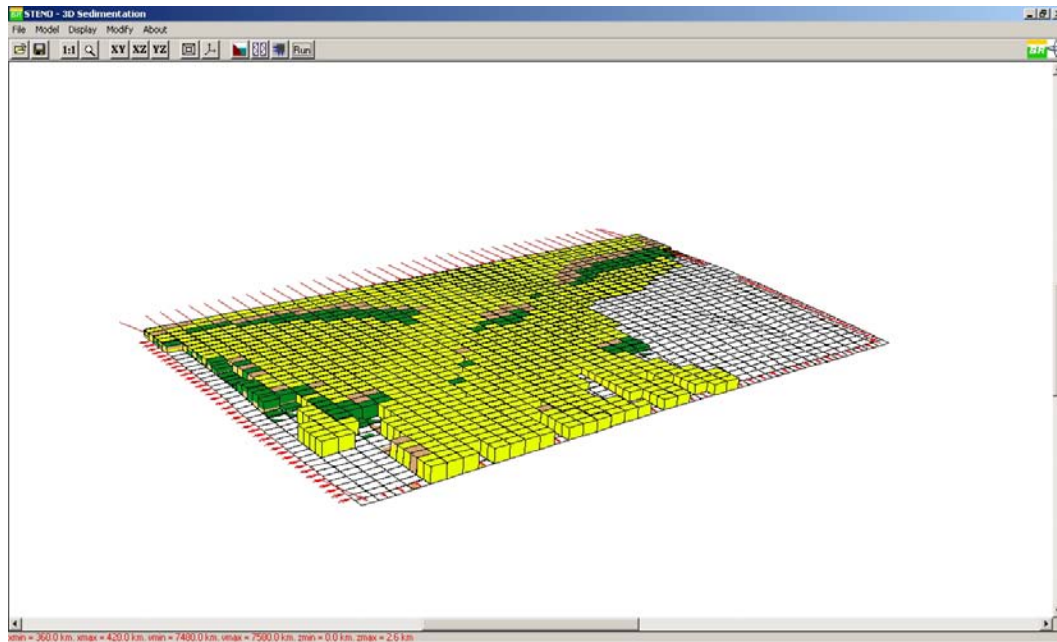


Figura 5.37: Quarto passo da simulação.

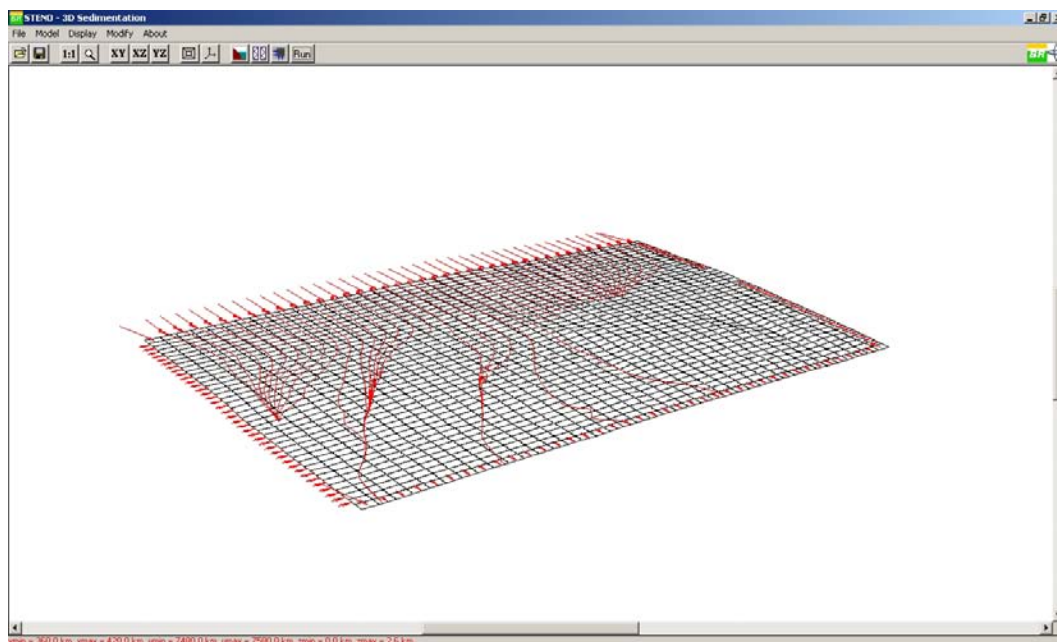


Figura 5.38: Linhas de correntes do quarto passo da simulação.

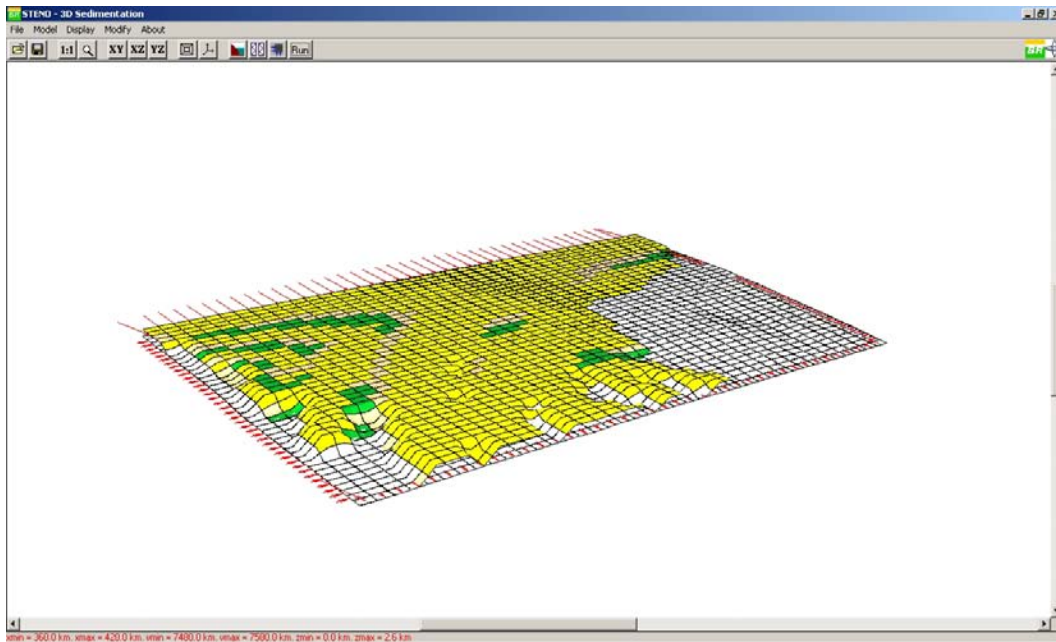


Figura 5.39: Horizonte geológico do quarto passo da simulação.

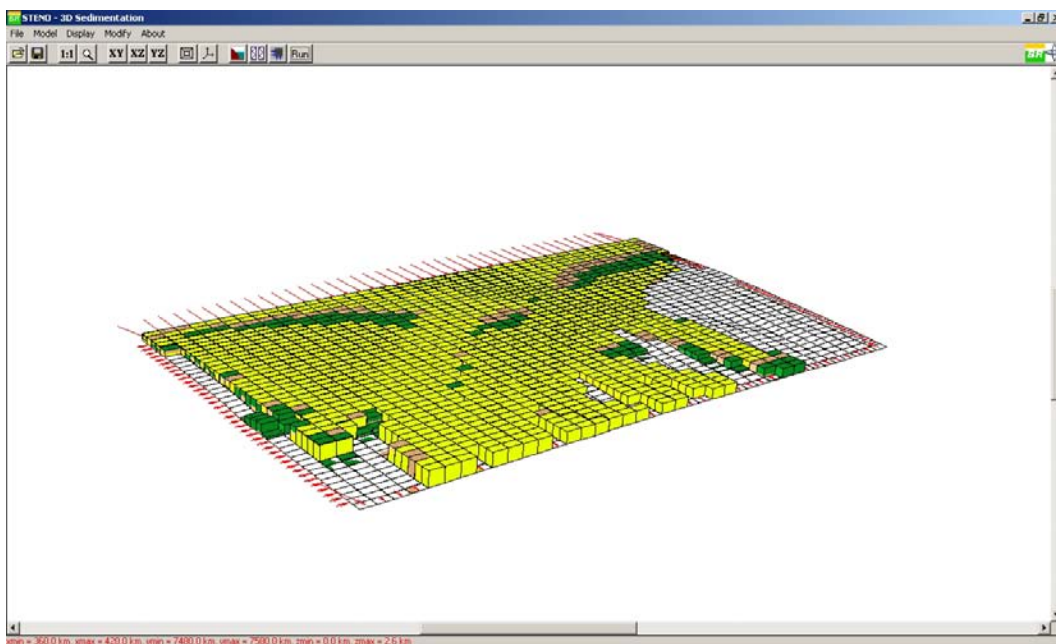


Figura 5.40: Quinto passo da simulação.

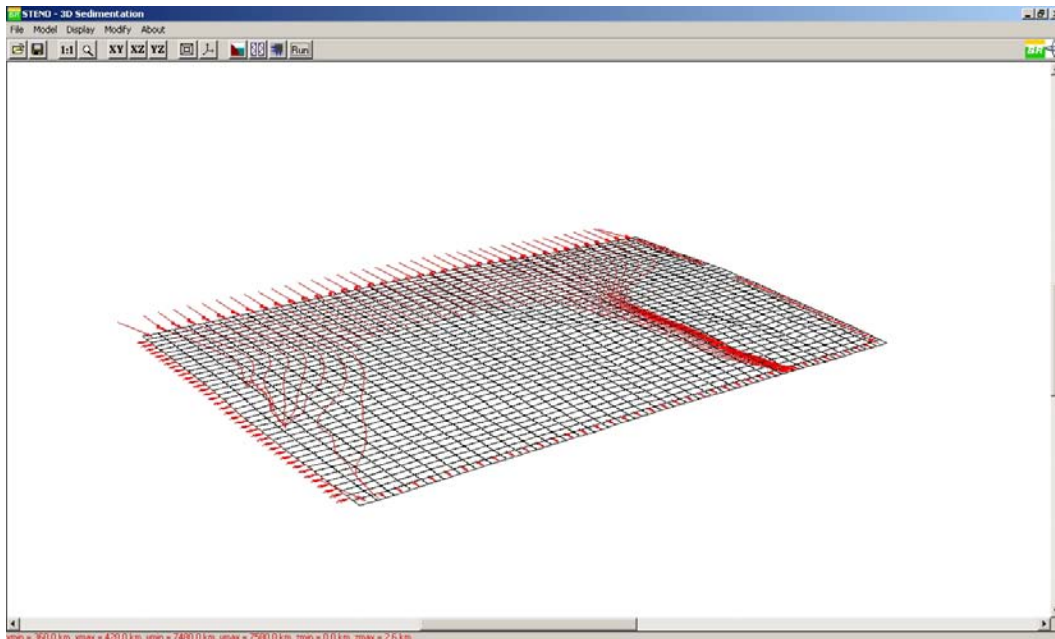


Figura 5.41: Linhas de correntes do quinto passo da simulação.

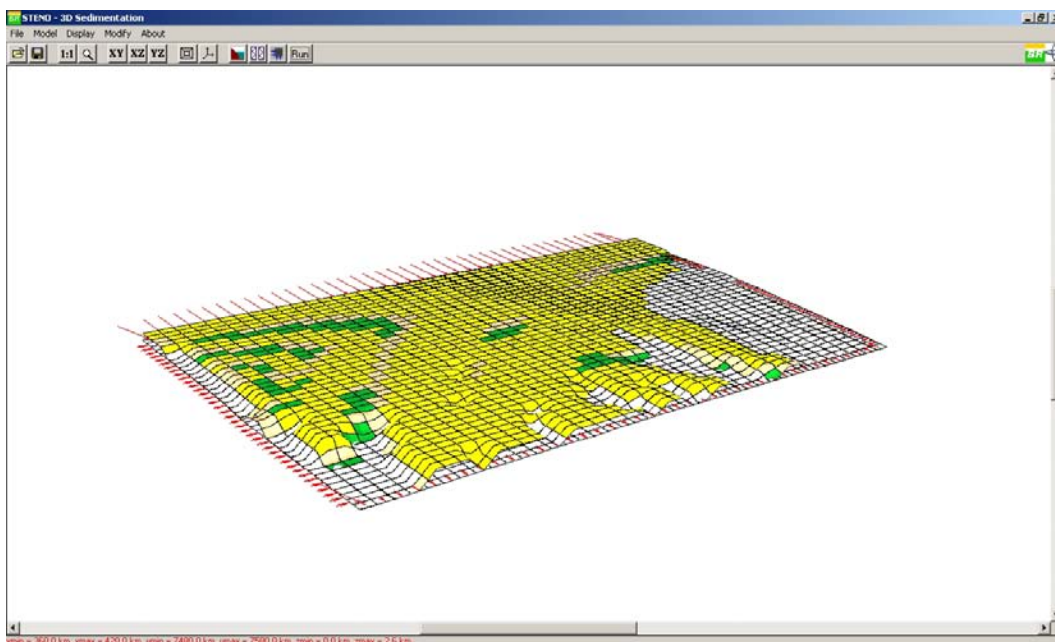


Figura 5.42: Horizonte geológico do quinto passo da simulação.

5.4

Exemplo 4

Este quarto exemplo mostra o processo de sedimentação em uma região de 100 km ao longo da linha de costa e 250 km bacia adentro. A batimetria desta área foi modificada de forma a simular os ambientes plataformais, de talude e bacia

mostrando principalmente alguns *canyons* no final da plataforma início do talude um rio chegando na costa marítima, corrente no sopé do talude e alguns domos de sal na bacia (figura 5.43).

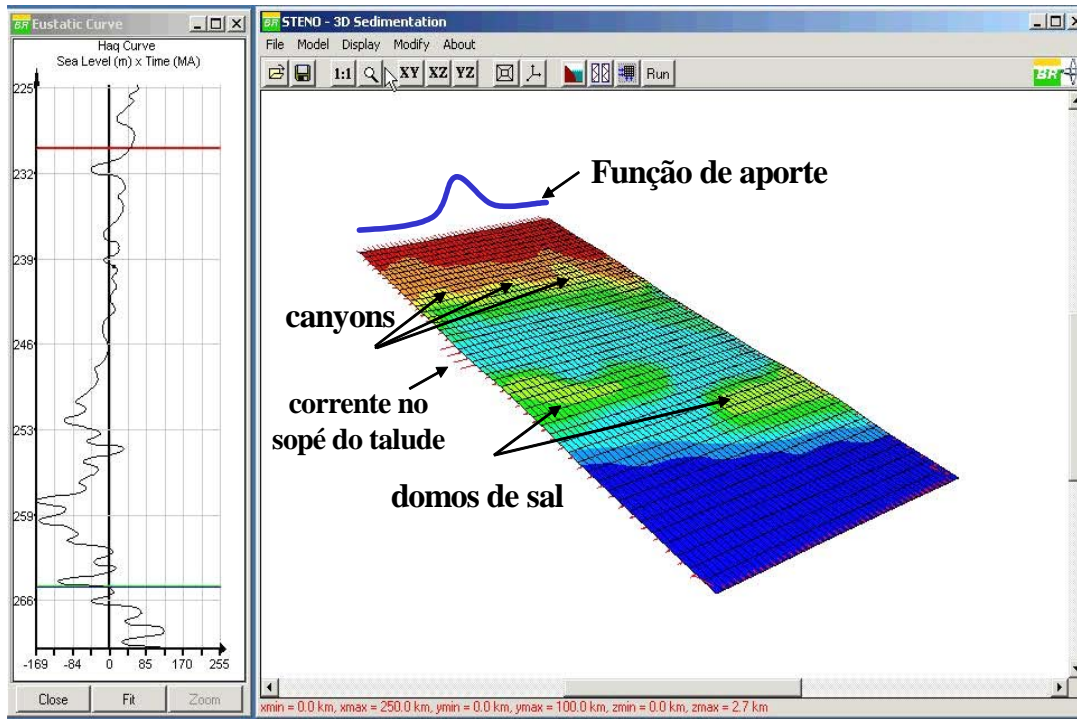


Figura 5.43: Batimetria e características do exemplo 4.

O tempo inicial da simulação foi de -265 Ma, o tempo final foi de -230 Ma. O passo escolhido foi de 4 Ma, totalizando uma simulação de 8 passos. As figuras 5.44 e 5.45 mostram respectivamente o primeiro passo da simulação e suas linhas de correntes. As figuras 5.46, 5.47, 5.48, 5.49, 5.50, 5.51 e 5.52 mostram os próximos passos da simulação com os sedimentos depositados.

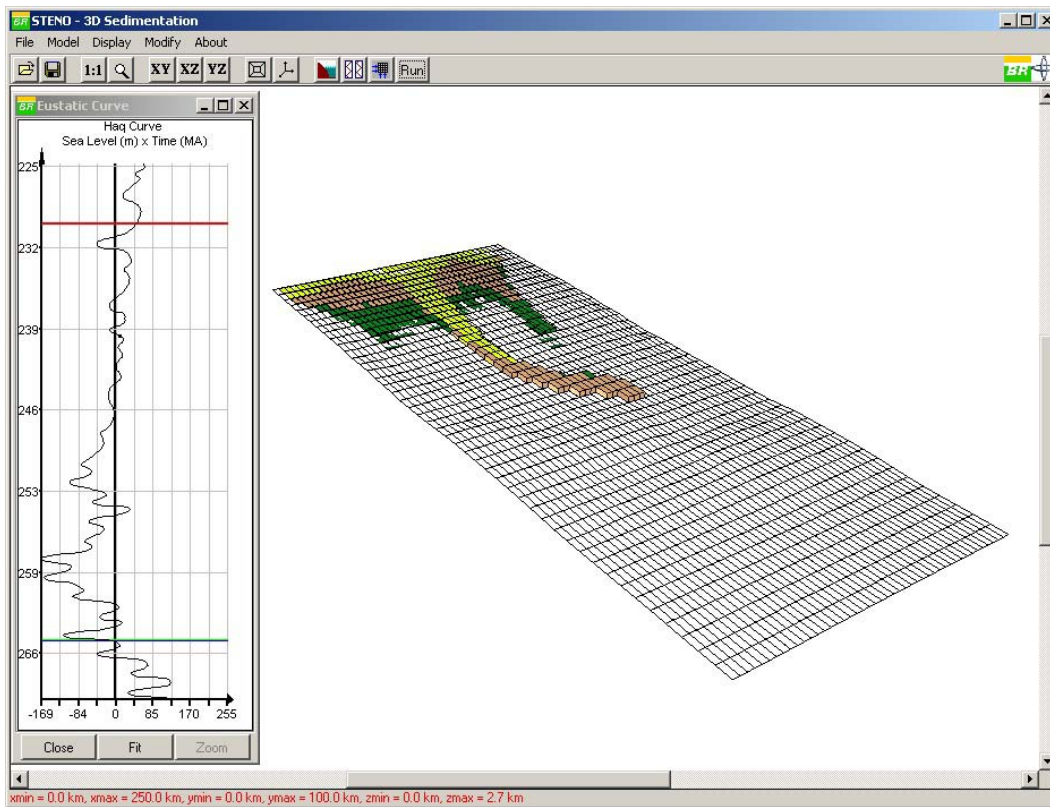


Figura 5.44: Primeiro passo da simulação.

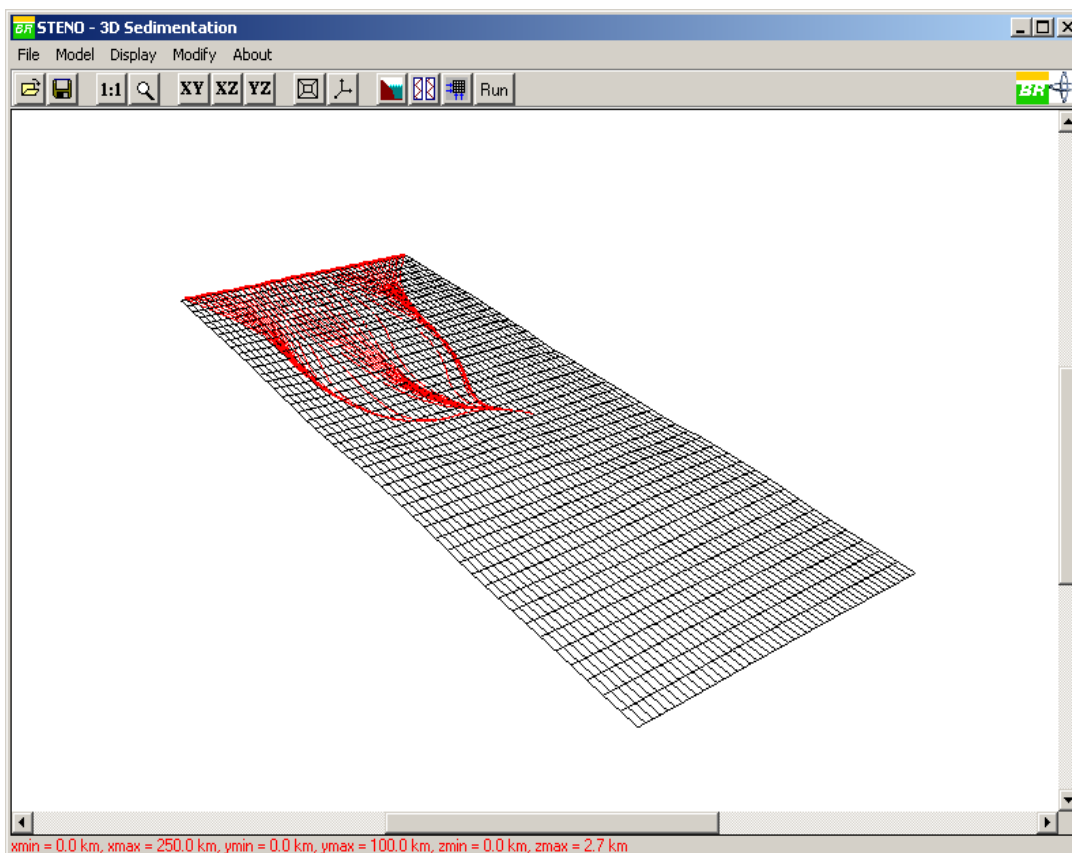


Figura 5.45: Linhas de correntes do primeiro passo da simulação.

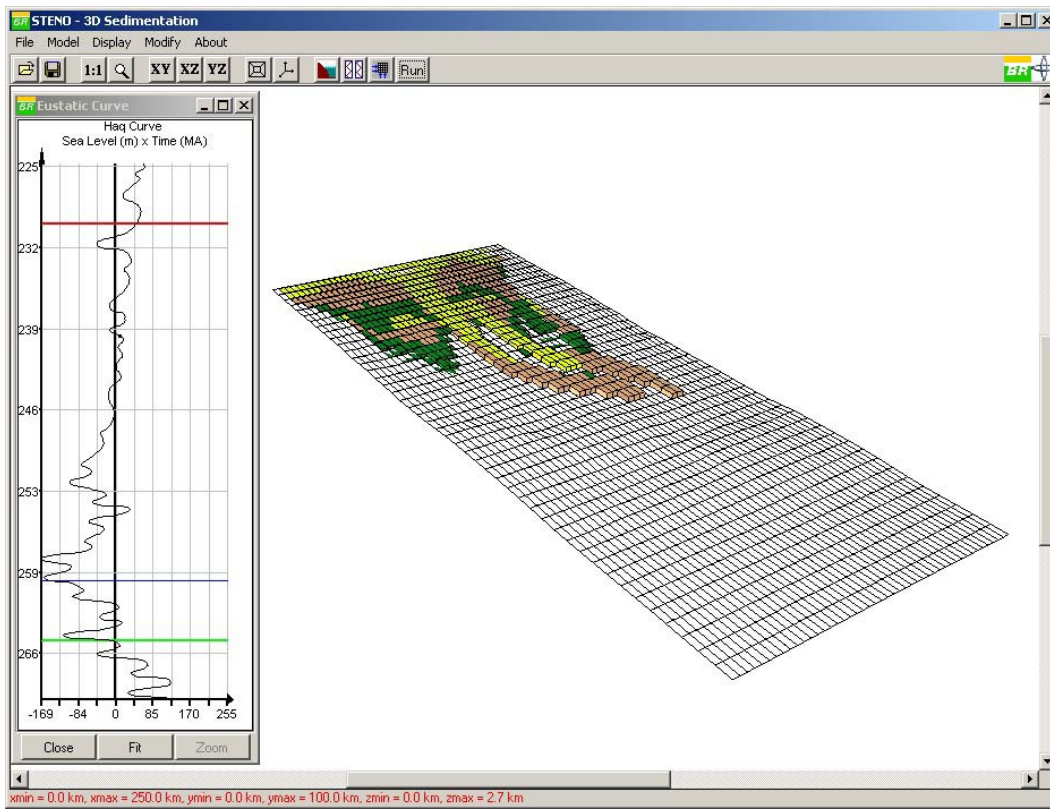


Figura 5.46: Segundo passo da simulação.

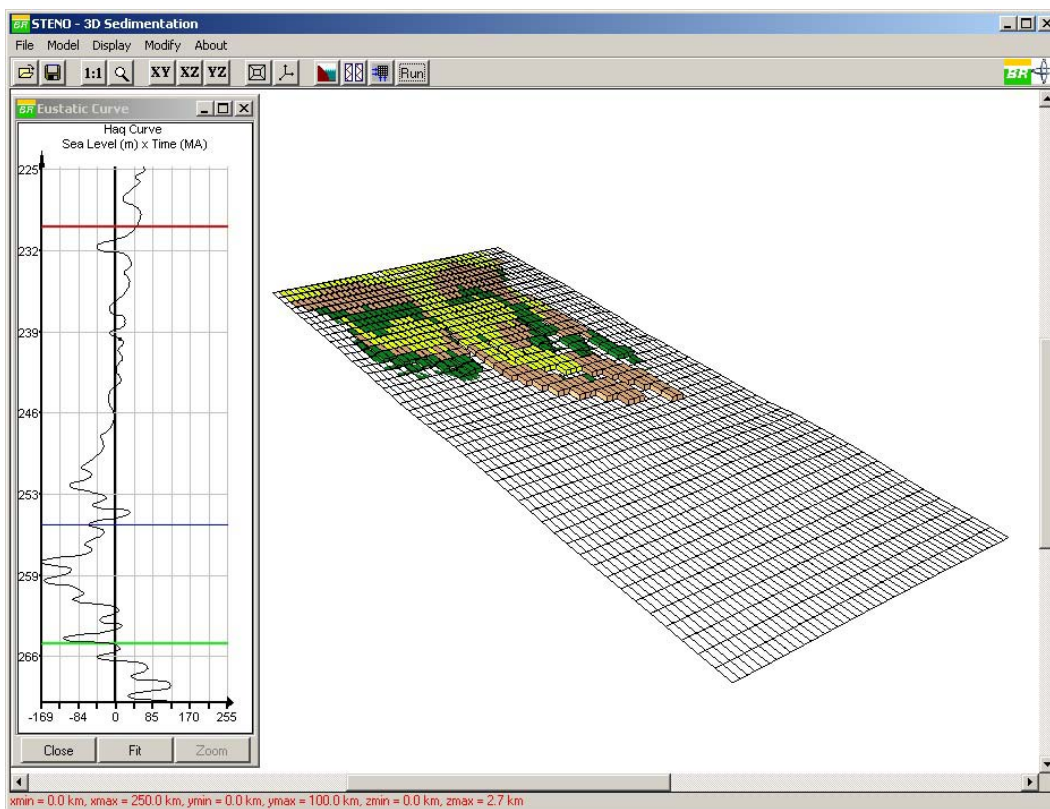


Figura 5.47: Terceiro passo da simulação.

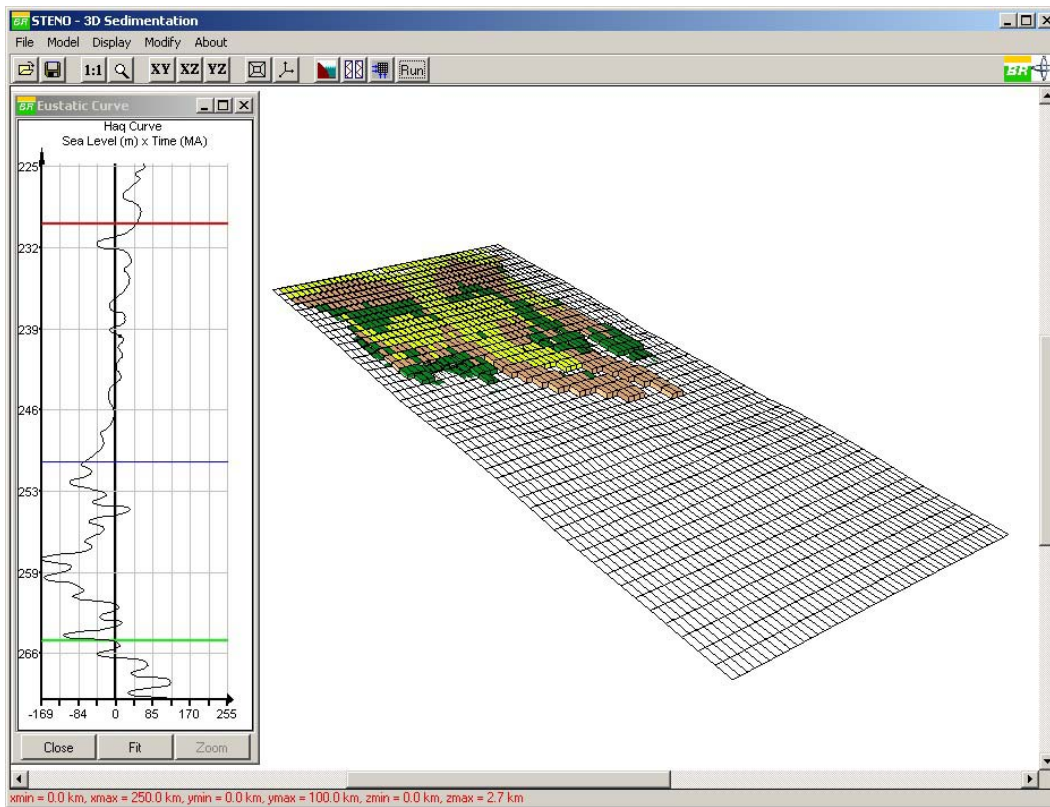


Figura 5.48: Quarto passo da simulação.

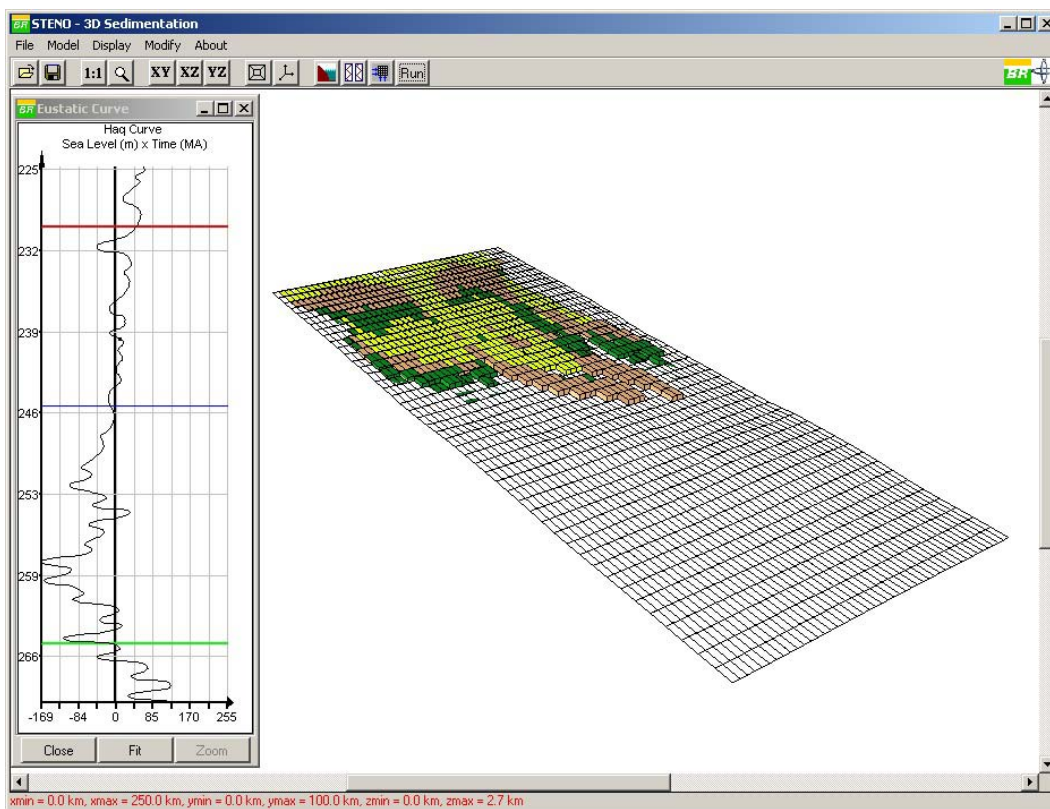


Figura 5.49: Quinto passo da simulação.

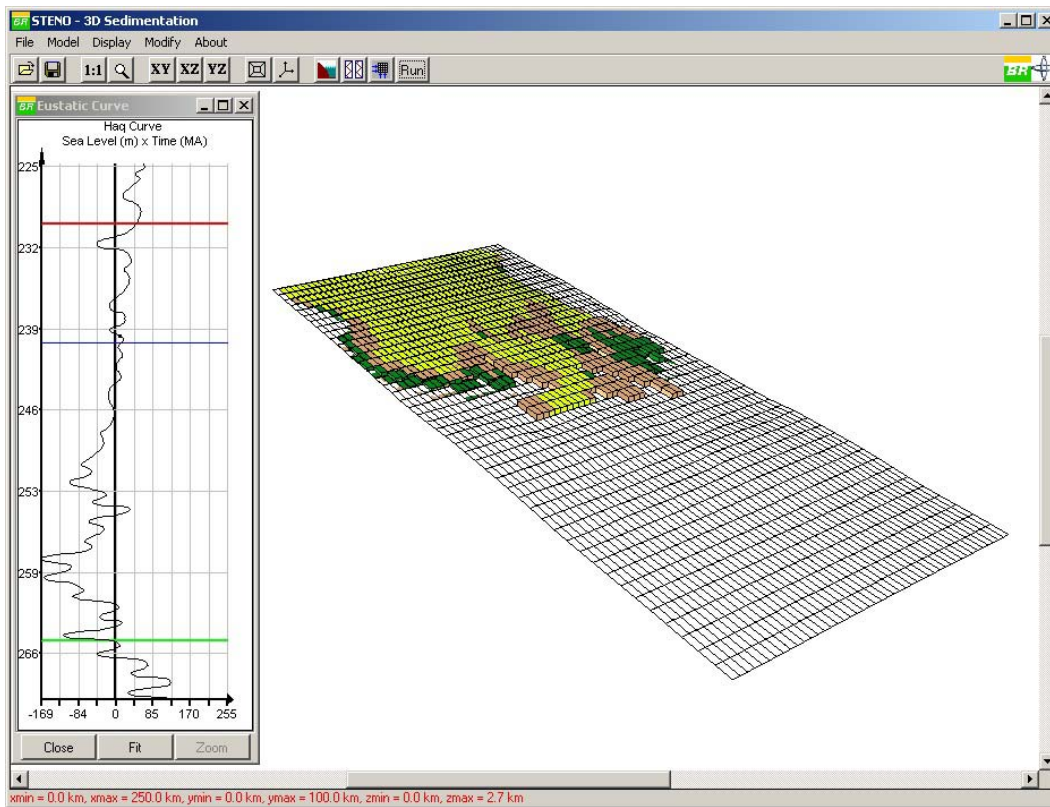


Figura 5.50: Sexto passo da simulação.

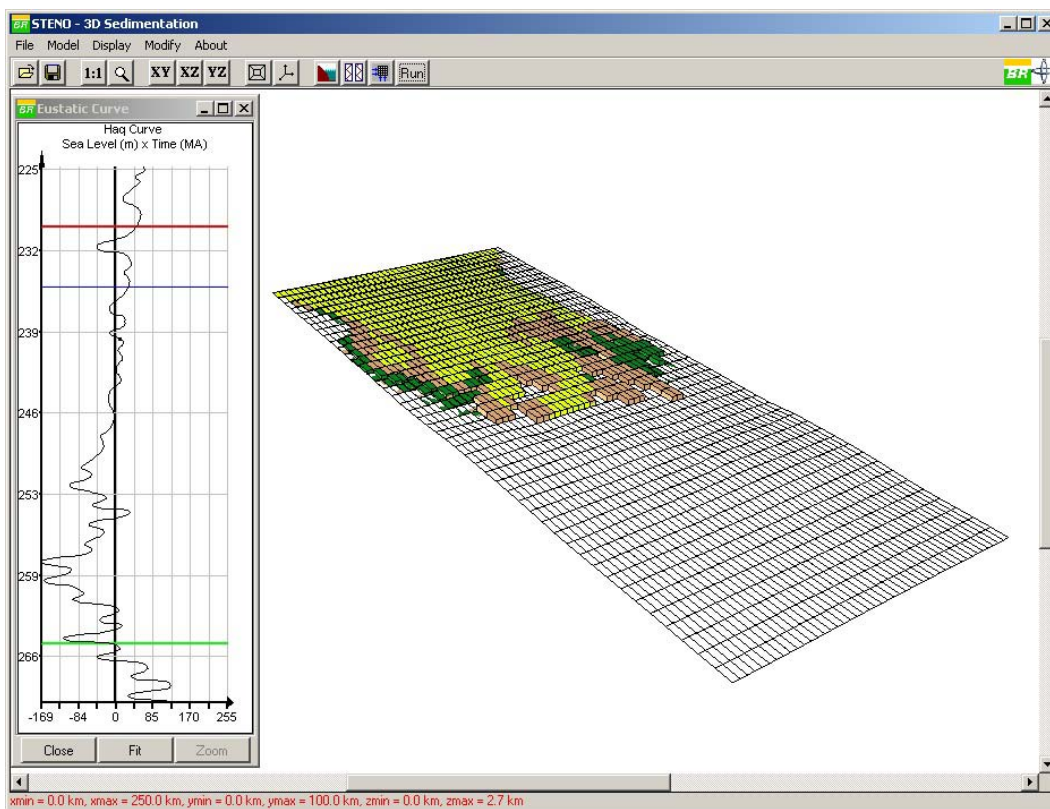


Figura 5.51: Sétimo passo da simulação.

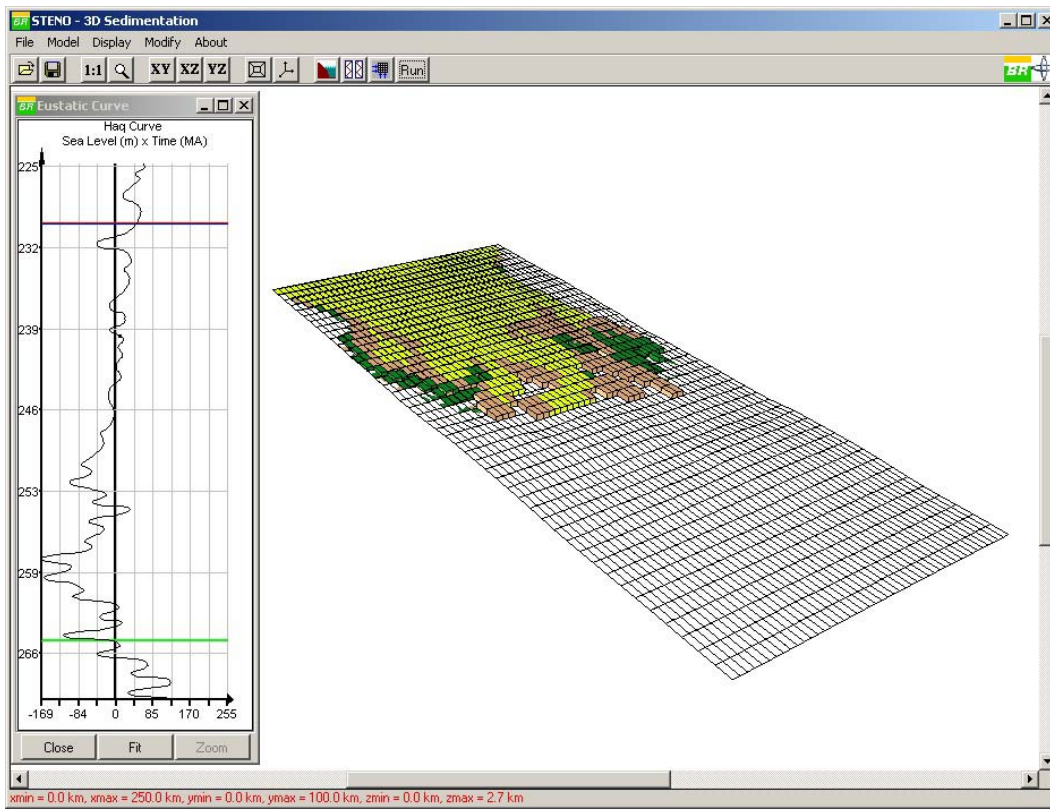


Figura 5.52: Oitavo passo da simulação.

6 Conclusões e Sugestões

Este trabalho descreve o desenvolvimento do STENO, que é um sistema computacional gráfico tridimensional para simulação de processos de sedimentação em ambientes de plataforma, talude e bacia. O sistema possui interfaces interativas, amigáveis e flexíveis para o usuário no que diz respeito à entrada e visualização dos resultados. O aplicativo foi desenvolvido utilizando o sistema de interface *IUP* e o sistema gráfico *OpenGL*. Para efetuar os processos de sedimentação foi proposto e implementado o algoritmo mostrado na figura 6.1.

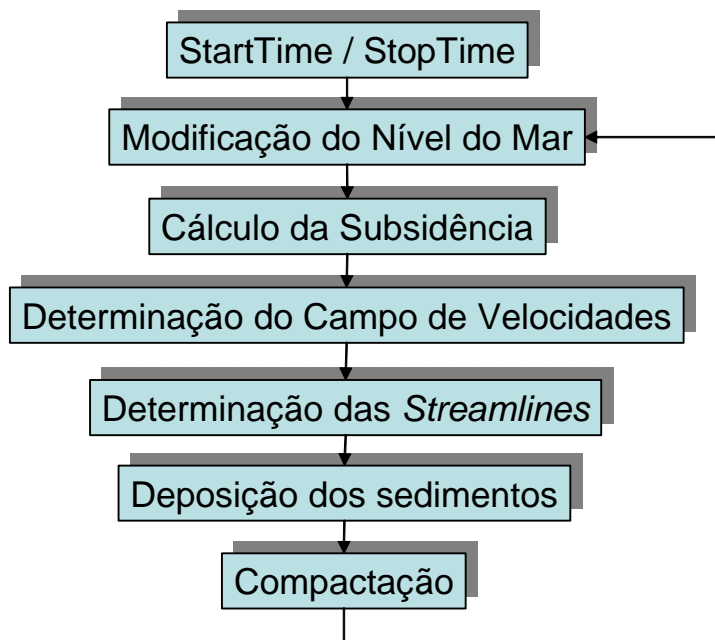


Figura 6.1: Algoritmo proposto e implementado neste trabalho.

As modificações do nível do mar são efetuadas utilizando à curva de Haq (disponível no sistema). A consideração da subsidiência para gerar a nova configuração do embasamento foi feita utilizando um Modelo Digital de Terreno (MDT) denominado Inverso do Quadrado da Distância. Esse modelo MDT leva em consideração a influência da distância das amostras na determinação dos pontos do *grid*. Esse MDT também é utilizado para gerar as superfícies do *grid* de cada passo da simulação.

O transporte de sedimentos, do algoritmo proposto, é feito de forma hidrodinâmica isto é, na direção x e y , sendo esta uma das principais contribuições

deste trabalho. Para isso foi implementado um algoritmo para calcular as velocidades dentro da região a ser simulada a partir da batimetria do *grid* e das velocidades do contorno (velocidades de aporte e velocidades de corrente). Com as velocidades determinadas, foi implementado um algoritmo para determinar as linhas de corrente (*linhas de correntes*). Os sedimentos são transportados seguindo essas *linhas de correntes* e 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.

Conforme visto nos exemplos, a estratégia adotada permite simular ambientes com diversas topografias e efetuar o processo de sedimentação, com os sedimentos divididos por litologias, considerando condições como um rio chegando na costa marítima e corrente no sopé do talude.

6.1

Sugestões para Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros para a continuidade do desenvolvimento do simulador, dois enfoques são sugeridos: a simulação numérica de sistemas carbonáticos e estudos quantitativos dos processos de formação e evolução de vales incisos.

O primeiro enfoque é importante, pois os sistemas carbonáticos estão presentes nas cartas estratigráficas da maioria das bacias marginais brasileiras, notadamente os sistemas albo-cenomaniano (95 Ma a 110 Ma) e terciário (50 Ma a recente em alguns casos). A paleogeografia gerada por estes sistemas e a evolução da halocinese condicionaram as principais depressões naquelas bacias. Deste modo, o estudo quantitativo dos sistemas carbonáticos torna-se importante para a compressão da evolução do preenchimento sedimentar das referidas bacias.

O segundo enfoque é igualmente importante, pois a formação e evolução de vales incisos compreendem um conjunto que controlam o aporte sedimentar para as bacias marginais. O estudo quantitativo destes processos torna-se fundamental no desenvolvimento de um simulador numérico de sedimentação, pois influencia diretamente na firmação das discordâncias (limites de seqüências) e do volume de sedimentos que é transferido das áreas fontes para as bacias.

Portanto, considerando os dois enfoques citados acima as seguintes etapas para trabalhos futuros podem ser divididas em:

- Definição de um algoritmo para erosão subaérea de sedimentos (formação de vales incisos);
- Definição de um algoritmo para construção de sistemas carbonáticos;
- Mecanismos de subsidência para sobrecarga da cunha sedimentar (*overload*);
- Deformação de camada plástica, que permitirá simular o efeito da halocinese;
- Ligação com programa de estudo de subsidência (BASS);
- Ligação com programa de balanceamento de seções (RECON); e
- Ligação com programa de interpretação sísmica.

7

Referências Bibliográficas

- Bosence, D., Waltham, D., “*Computer modeling the internal architecture of carbonate platforms.*”, *Geology*, v. 18, p. 26-30, 1990.
- CSLA - Continental Stretching – Lewis & Andrews - *Journal of Geophysical Research*, Vol.85 No.B7, páginas 3711-3739, 10 de julho de 1980.
- Costa, M., “*Visualização Científica 3D da Simulação Numérica de Reservatórios de Petróleo*”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Informática, PUC-Rio, 1994.
- Cox B. J., Novobilsk A. J. – “*Object Oriented Programming – An Evolutionary Approach*”, Addison – Wesley, 2º Edition, Reading MA 1991.
- Dieguez, J. P. P., “*Métodos Numéricos Computacionais para a Engenharia*”, Editora âmbito Cultural, 1994.
- Faccion, J. C., “*Relatório Interno Cenpes/PETROBRAS*”, Rio de Janeiro, 2002.
- Fávera, J. C. D., “*Fundamentos da Estratigrafia Moderna*”, Editora EdUERJ, 2001.
- Felgueiras, C.A. “*Desenvolvimento de sistema de modelagem digital de terreno para microcomputadores*”. São José dos Campos, INPE, 1987.
- Fenves, G. L., “*Object-Oriented Programming for Engineering Software Development*”, *Engineering with Computers*, 6, pp 1 – 15, 1990.
- Ferraz, J. “*Reconstituição de seções geológicas utilizando subdivisões planares, transformações geométricas e computação gráfica interativa*” Dissertação de Mestrado, Departamento de Informática, PUC-Rio, 1993.
- Frind, E.O, “*Groundwater Modelling – Lacture Notes*”, 1995.
- Flemings, P. B., Grotzinger, J. P., Morris, J. E., “*STRATA- a stratigraphic modeling package*”, Release 2.14, *Journal of Sedimentary Research*, v. 68, p. 283-298, 1997.
- Flemings, P. B., Jordan, T. E., “*A synthetic stratigraphic model of foreland basin development.*”, *Journal of Geophysical Research*, v. 94, p. 3851-3866, 1989.

- Fortuna, A. O., “*Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos*”, Editora EdUsp, 2000.
- Fox, R., “*Introdução a Mecânica dos Fluidos*”, Editora McGraw-hill, 2000.
- Granjeon, D., Joseph, P., “*Concepts and applications of a 3-D multilithological diffusive model*”, Kansas Geological Survey, Open-File Report 96-27, p. 93-94, 1996.
- Granjeon, D., “*Conception et Applications D’un Modelé Diffusif 3D Multilithologique*”, Tese de Doutorado, Institut Français du Pétrole, Université Rennes, 1997.
- Harbaugh, J. W., Graeme, C. B., “*Computer Simulation in Geology*”, Computer Methods in the Geosciences, New York, 1989.
- Hughes, W.F., “*Dinâmica dos Fluidos*”, Editora McGraw-hill do brasil, ltda, Coleção Schaum, 1974.
- Hansen, D.V. e Poulain, P. M., “*Quality Control and Interpolations of Woce-Toga Drifter Data.*”, J. Atmos. Oceanic Technol. 13, p. 900-909.
- Harris, P.T. & Coleman, R., “*Estimating global shelf sediment mobility due to swell waves.*”, Marine Geology, 150:171-177, 1998.
- Helland-Hansen W, Kendall C G ST C, Lerche I, Nakayama K, “*A simulation of continental basin margin sedimentation.*”, Mathematical Geology, v. 20, p. 777-802, 1988.
- Jervey, M. T., “*Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression.*” SEPM Special Publication 42. p. 47-69, 1988.
- Karner, G.D., Driscoll, N.W., “*Three-dimensional interplay of advective and diffusive processes in the generation of sequence boundaries.*”, Journal of the Geological Society of London, Vol. 154, pp 443-449, 1997.
- Kiang, C. H., Bender, A. A., Mello, U. T., Kausmam, R. O., “*Versão 2.0 do Manual do Sistema de Simulações de Bacias*”, Cenpes/PETROBRAS, 1991.
- Lamdim, P. M., B., “*Texto Didático 2 – Introdução aos Métodos de Estimatição espacial para confecção de mapas*”, UNESP/Rio Claro, 2000.
- Lawrence, D. T., Doyle, M., Aigner, T., “*Stratigraphic simulation of sedimentary basins - concepts and calibration*”, AAPG Bulletin, v. 74, p. 273-295, 1990.
- Levy, C. H. “*IUP/LED: Uma Ferramenta Portátil de Interface com Usuário*”. Dissertação de Mestrado., Departamento de Informática, PUC-Rio, 1993.

- Martinez, M. L., Zuffo, J.A., “*Uso de linhas de corrente de corrente, Linhas de Trajetória e Linhas de Emissão na Visualização de Fluxos*”, Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens (SIBGRAPI'95). São Carlos-SP-Brasil, pg.303-304, outubro 1995.
- Martinez, P. A., Harbaugh, J. W., “*Simulating nearshore environments.*”, Oxford, Pergamon Press, 265 p, 1993.
- Miall, A., “*The geology of stratigraphic sequences.*”, Berlin, Springer-Verlag, 433 p., 1997.
- Middleton, G.V., Southard, J.B., “*Mechanics of Sediment Movement.*”, Society of Econ. Paleo. Mineralogists Short Course No. 3, Providence, Rhode Island, 401 p., 1984.
- Pitts, S. “*Fenômeno dos transportes*”, Editores LTC, 1999.
- Posamentier, H. W. & Vail, P. R., “*Eustatic Control on clastic deposition II – Sequences and systems tracts models.*”, In: Wilgus, C.K.; Hastings, B.S.; Kendall, C.G.S.C.; “*Sea-Level Changes – an Integrated Approach.*”, Tulsa, SEPM, p. 125-154, (SEPM sp. Pd. #42), 1988.
- Popp, J. H., “*Geologia Geral*”, Editora LTC, São Paulo, 1998.
- Ribeiro, H. J. P S., “*Estratigrafia de Seqüências, Fundamentos e aplicações*”, Editora Unisinos, 2001.
- Rivenaes, J C, “*Application of a dual lithology, depth-dependent diffusion equation in stratigraphic simulation.*”, Basin Research., v. 4, p. 133-146, 1992.
- Rivenaes, J. C., “*A computer simulation model for siliciclastic basin stratigraphy.*”, Ph.D. dissertation, University of Trondheim, Trondheim, Norway, 133 p., 1993.
- Roache, P. J., “*Computacional Fluid Dynamics*”, Hermosa Publishers, 1976.
- Santi, M. R., “*Procedimentos Computacionais para o Balanceamento de Seções Geológicas*”, Tese de Doutorado, Depto. Eng. Civil, PUC-Rio, 2002.
- Sebesta, R. W., “*Conceitos de Linguagens de Programação*”, editora Bookman, 2000.
- SIMMEC – “*Congresso Mineiro de Mecânica Computacional*”, 1998.
- Spring versão 3.4, “*Manual do Usuário*”, INPE, 2000.
- Smith, G. D. “*Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods*”, Oxford Applied Mathematics and Computing Science Series, 1985.

- Streeter, V. “*Mecânica dos Fluidos*”, Editores BUC, 1984.
- Swift, D.J.P., Thorne, J.A., “*Sedimentation on continental margins, I: a general model for shelf sedimentation.*”, Int Assoc Sedimentol Spec Publ 14:3-31, 1991.
- Swift, D. J., Zhang, Y., Niedoroda, A. W., Reed, C. W., Thorne, J. A., “*Modeling facies with physics of sedimentation and building stratigraphy with the results*” in Watney, W. L., Rankey, E. C., Franseen, E. K., Goldstein R. H., convenors, Numerical experiments in stratigraphy-an international workshop Kansas Geological Survey, Open-File Report 96-27, p. 139-140, 1996.
- Tetzaff, D. M., Harbaugh, J. W., “*Simulating Clastic Sedimentation*”, Computer Methods in the Geosciences, New York, 1989.
- Thorne, J .A., & Swift, D.J.P. “*Sedimentation on continental margins, II: application of the regime concept.*”, Int Assoc Sedimentol Spec Publ 14: 33-58, 1991.
- Vail, P. R., “*Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy. Part 1: seismic stratigraphy interpretation procedure*”, Tulsa, AAPG, Vol 1, p 1-9, (AAPG Studies in Geology), 1987.
- Waltham, D., “*Mathematical modeling of sedimentary basin processes*”, Marine and Petroleum Geology, v. 9, p. 265-273, 1992.
- Voillemont J. C., Royer J. J., “*Building 3D streamlines in GOCAD*”, 21° GOCAD – Meeting, 2001.