

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL TRIDIMENSIONAL DA FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DE PLATAFORMAS CARBONÁTICAS

Pedro Cambier^{a,b}, Luiz F. Martha^{a,b}

^a *Tecnologia em Computação Gráfica (Tecgraf), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro – RJ, Brasil*

^b *Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro – RJ, Brasil*

Palavras-chave: Plataformas Carbonáticas, Modelagem Geológica, Engenharia de Petróleo, MATLAB, Computação Gráfica.

Resumo. Em geologia sedimentar estuda-se as formações e evoluções das camadas rochosas que encobrem a crosta terrestre. Diferentes processos físicos, químicos e biológicos são responsáveis pela formação e distribuição de sedimentos. Em um ambiente subaquoso são predominantes as rochas sedimentares de origem clástica e carbonática. As rochas carbonáticas são oriundas de processos bioquímicos envolvendo a deposição e decomposição de organismos ricos em cálcio como algas, conchas e corais. Essas rochas vem sendo amplamente estudadas na indústria de óleo e gás pois podem ser bons reservatórios de hidrocarbonetos. Tendo em vista a importância destas rochas, este trabalho concentra-se na formação e evolução de corpos sedimentares conhecidos como plataformas carbonáticas, existentes principalmente em ambientes de águas quentes e claras. Neste contexto, desenvolveu-se um aplicativo para simulação computacional tridimensional de plataformas carbonáticas, CarbSM. O aplicativo possui uma interface gráfica amigável para o usuário no que diz respeito à entrada de dados e visualização dos resultados. O algoritmo de análise considera a produção de sedimentos carbonáticos oriundas de três tipos de ambientes: interior da plataforma, borda da plataforma e pelágico. Com esses ambientes são associadas taxas máximas de crescimento in situ de sedimentos carbonáticos, além de diversas funções de restrição, tais como profundidade, condições marinhas e deposição de sedimentos suspensos, possibilitando o cálculo das taxas resultantes. Em paralelo ao crescimento in situ os sedimentos produzidos sofrem uma erosão subaquosa onde é aplicado um algoritmo de transporte e redeposição do sedimento erodido em suspensão. Dessa forma, o aplicativo é capaz de simular a evolução de plataformas carbonáticas em diversos cenários geológicos propostos pela literatura. Para análise dos resultados obtidos, CarbSM oferece inúmeras opções de visualização tridimensional como planos de corte e iso-superfícies.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Rochas Carbonáticas

As rochas carbonáticas são compostas de minerais carbonáticos como a calcita (CaCO_3), a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) a siderita (FeCO_3) e a magnesita (MgCO_3), entre outras. A maior parte das rochas carbonáticas tem origem biológica, principalmente em ambientes marinhos, e são criadas devido à deposição e decomposição de organismos ricos em cálcio como algas, conchas, e corais. Entre as rochas sedimentares, por volta de 10 a 15% são carbonáticas.

Devido à propriedade autotrófica das algas, a maioria dos carbonatos se encontram em águas rasas e claras devido à necessidade de radiação solar. Em profundidades maiores a energia solar é quase totalmente absorvida, limitando a produção de rochas carbonáticas, embora existe deposição de sedimentos carbonáticos em ambientes pelágicos em escalas muito inferiores. A precipitação da calcita ocorre em águas mais quentes pois em temperaturas mais amenas, esta se dissolve. Por estas razões, a maior parte dos carbonatos são produzidos em águas rasas, claras e com temperaturas tropicais. Geralmente não são muito resistentes às condições hipersalinas e com muitos nutrientes, por isso a evolução carbonática é maior em regiões com boa troca da água marinha, ou seja em ambientes de mar aberto. Em ambientes mais restritos, como lagunas, a alta salinidade e possível saturação em nutrientes pode restringir a produção dos carbonatos mais comuns, porém para cada tipo de carbonato existem condições marinhas ideais em relação à temperatura, disponibilidade de luz, profundidade, salinidade e nutrientes.

As taxas de produção carbonática são sempre consideradas como crescimento vertical por intervalo de tempo (m/ka), assim sendo, além dos fatores previamente descritos, um outro fator limitante do crescimento carbonático é o espaço de acomodação disponível. Este espaço é definido como a diferença entre a camada do fundo do mar e o nível do mar. Este espaço pode variar com o tempo devido ao próprio crescimento carbonático, às flutuações do nível do mar e a subsidência do fundo do mar. Caso o espaço de acomodação cresça mais rápido do que a sedimentação carbonática, ela pode se afogar, caso contrário, não há deposição devido à falta de espaço e esta deverá migrar para outras localidades (Bosscher, 1992). Assim sendo, a evolução de plataformas carbonáticas tem como controle importante as mudanças nos espaços de acomodação e são inclusive ótimas recordações destas (Schlager, 1981).

Deve-se salientar outro fator importante na evolução de plataformas carbonáticas, além da produção *in situ*, decorrente da deposição de organismos marinhos, a erosão subaquosa e redeposição dos sedimentos erodidos pode mudar significativamente a geometria das plataformas. Esta erosão se deve principalmente à ação das ondas, das correntezas e instabilidades de taludes. A direção dominante do vento em um

ambiente de produção carbonática é o principal controle dos fatores erosivos e redepositivos.

1.2 Fábricas carbonáticas

Inúmeros processos influem na geração de sedimentos carbonáticos in situ, fatores biológicos e químicos responsáveis pelo desenvolvimento de rochas carbonáticas oferecem diferentes situações ideais para a evolução destas. Em relação à sensibilidade às condições marinhas descritas anteriormente, existem ambientes compatíveis para cada tipo de processo de produção carbonática. Por isso pode-se agrupar estes processos em tipos de condições marinhas ideais para produção de rochas carbonáticas, chamadas de fábricas carbonáticas. Este trabalho se concentra em três fábricas carbonáticas (Warrlich, 2001):

- **Águas rasas e abertas:** produção em águas rasas que não tolera condições de hipersalinidade e índices de nutrientes muito altos; apresentam boa renovação de água marinha.
- **Águas rasas e restritas:** produção em águas rasas que apresentam pouca renovação de água marinha e tolera hipersalinidade.
- **Águas profundas:** produção pelágica de carbonatos em profundidades altas.

Esta separação em fábricas carbonáticas será importante para a distribuição geométrica da plataforma, já que cada fábrica trabalha com taxas e condições diferentes, apresentando diferentes tipos de grãos e fáceis para cada fábrica.

1.3 Modelagem Numérica

Modelos numéricos utilizam algoritmos matemáticos para simular e tentar reproduzir a geometria e a coerência quantitativa de um modelo geológico (Carvalho, 2003) baseado na teoria e nas observações de casos reais. Na modelagem estratigráfica pode se partir de dados e condições iniciais conhecidas e chegar em uma situação sedimentar final (modelagem direta), ou partir de uma geometria conhecida e determinar os parâmetros e processos que originaram essa geometria (modelagem inversa) (Carvalho, 2002). A seguinte figura ilustra os conceitos utilizados na modelagem numérica estratigráfica com exemplos de algumas técnicas conhecidas (Faccion, 2002).

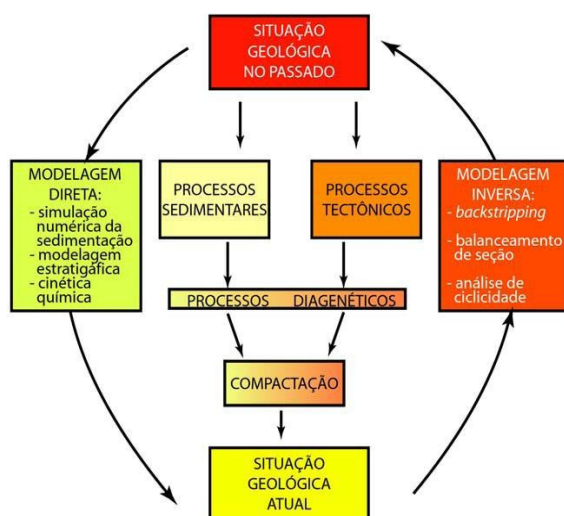


Figura 1: Ilustração dos diferentes tipos de modelagem numérica utilizados na geologia sedimentar.

Uma grande vantagem da modelagem numérica na geologia sedimentar reside nas escalas de tempo geológicas, impossíveis de serem modeladas experimentalmente. Estes modelos podem testar diferentes hipóteses à partir da interação e variações dos parâmetros controladores, podendo assim simular e quantificar os processos físicos e biológicos para reproduzir geometrias e morfologias de corpos sedimentares (Watney et al., 1999). Modelando áreas geológicas já conhecidas detalhadamente através de dados sísmicos do campo, é possível calibrar os parâmetros do modelo numérico para assim pode simular outras áreas carente de dados. Modelos destas áreas são muitas vezes obtidos extrapolando-se os dados conhecidos, porém com um modelo numérico estratigráfico baseado em conceitos físicos e biológicos e utilizando algoritmos matemáticos consegue-se muito mais precisão nos resultados. A modelagem estratigráfica conecta os processos sedimentares ao produto geológico de maneira mais direta comparada à geoestatística e oferece mais entendimento da evolução estratigráfica (Warrlich et al., 2008).

1.4 Modelagem direta de sistemas carbonáticos

No caso mais específico de sedimentação carbonática, é difícil determinar quais processos geram hiatos, como acontece a expansão lateral das plataformas carbonáticas e como são criadas geometrias estratigráficas bastante complexas. O entendimento destas complexidades e o estudo de diferentes situações e suas conseqüências são de grande importância para ajudar a conceituar e modelar estratigrafias carbonáticas (Burgess e Wright, 2003). Sabemos que taxas de sedimentação carbonáticas modernas são bastante elevadas (Bosscher e Schlager, 1992), comparando-as com taxas retiradas à partir dos estudos de depósitos antigos são significativamente inferiores, geralmente uma ou mais ordens de magnitude (Sadler, 1981, 1994, Schlager, 2000). Isto se deve principalmente pelo fato destas

taxas serem geradas à longo prazo, incluindo mudanças geológicas que podem afetar a evolução da sedimentação carbonática como afogamento por subsidência tectônica e/ou elevação do nível do mar, ou erosão elevada. Assim sendo, a modelagem numérica pode ajudar no entendimento destes fatores, testando diferentes hipóteses e estudando seus resultados. Para isto este trabalho se propõe em implementar uma modelagem direta capaz de simular a evolução de plataformas carbonáticas levando em conta as três fábricas apresentadas anteriormente.

2 PROCESSOS SIMULADOS

2.1 Superfície inicial

O primeiro passo da simulação consiste em definir a superfície inicial em que os algoritmos de deposição serão aplicados. Para isto é necessário um conjunto de dados anteriormente adquiridos chamados *pontos de controle*. Pontos de controle são conjuntos de pontos no formato (x, y, z) à partir dos quais se define a área que pretende ser modelada. Não necessariamente estes conjuntos serão os limites da superfície inicial, somente pontos que serão utilizados para determinar uma representação matemática da distribuição espacial do conjunto de pontos que definirão a superfície inicial resultante. Esta representação matemática é obtida aplicando-se um método de interpolação nos conjuntos de pontos pré-determinados.

A superfície inicial obtida é um *grid* discreto bidimensional com espaçamento regular nas direções x e y . Em cada nó do *grid* será calculado o valor de z adequado à partir da interpolação dos pontos de controle. Este trabalho utiliza o Método do Inverso da Potência das Distâncias (IPD) (Landim, 2000), um método de interpolação local, determinístico e exato, bastante utilizado em Sistemas de Informação Geográfica. O método consiste em fazer uma média ponderada dos valores de z dos pontos de controle para os nós do *grid*, sendo que os pontos mais distante tem peso menor, este peso é determinado utilizando o inverso da potência da distância, no plano XY , do ponto de controle para o nó do *grid*. Os valores de z para pontos do *grid* que coincidem com algum ponto de controle não será interpolado e o valor exato de z do ponto de controle coincidente será utilizado no *grid*.

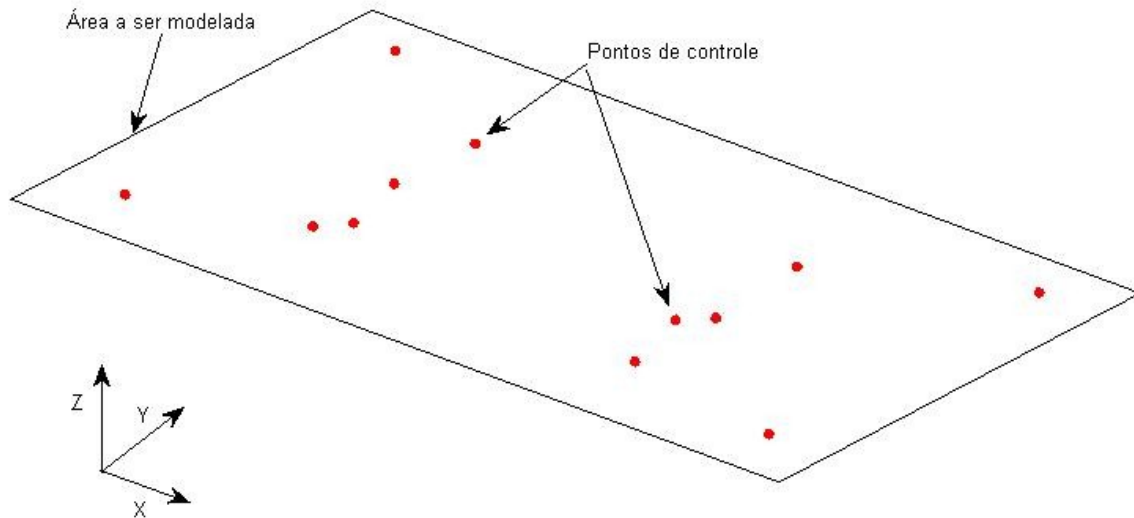


Figura 2: Pontos de controle predeterminados e área a ser modelada

Para cada nó do *grid* a ser interpolado, o valor de z é calculado com as seguintes equações:

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

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

Sendo:

$z(x, y)$ - o valor de z interpolado no nó do *grid* (x, y) ;

z_i - o valor de z conhecido de um ponto de controle i ;

n - o número de pontos de controle disponíveis;

h_{ij} - distância entre o nó do *grid* j e o ponto de controle i , calculado pela Eq. 1;

β - expoente da potência da distância.

Pode acontecer de alguns pontos de controle terem a mesma posição em xy que alguns nós do *grid*, para isto pode-se usar a seguinte condição para garantir o mesmo valor de z para estes casos:

$$z(x, y) = z_i \quad (3)$$

O valor do expoente da potência da distância é bastante importante e influencia no resultado final da interpolação, quanto mais alto o valor do expoente, mais peso se dá aos pontos de controle mais próximos e menos peso aos pontos mais distantes. Um expoente mais baixo gera uma superfície mais suave e um expoente mais alto uma superfície maiores variações de z . Para demonstrar esta diferença, a área referente à Figura 2 foi subdividido para obter um *grid* com 40 nós nas direção x e y , o Método do Inverso da Potência das Distâncias foi aplicado inicialmente com $\beta = 1$ (Figura 3) e depois com $\beta = 4$ (Figura 4). No segundo caso os extremos tem maior magnitude e os pontos de controle mais afastados tem menor influência nos resultados obtendo uma feição mais ondulada.

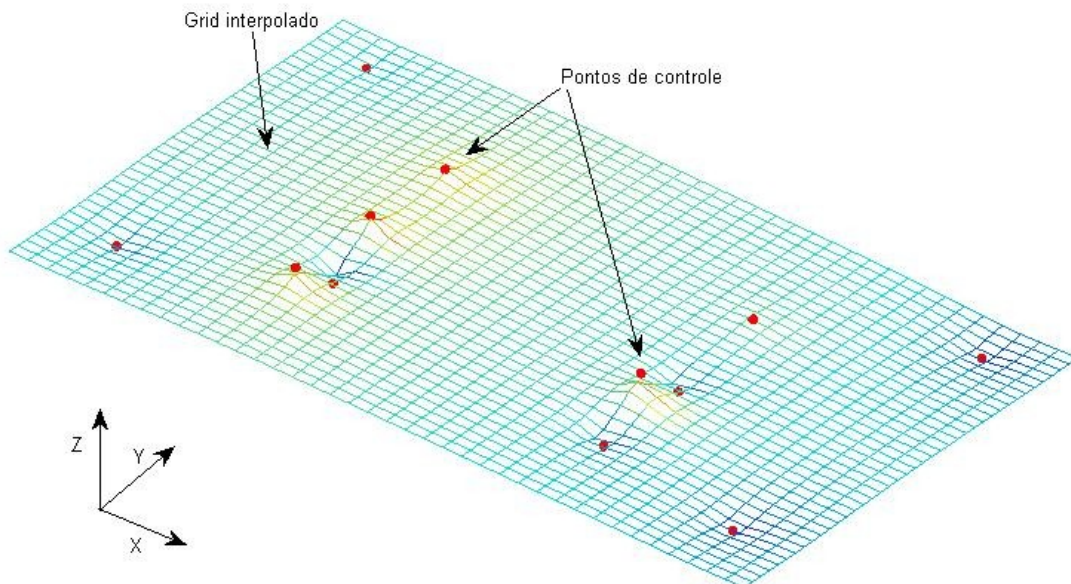


Figura 3: Grid interpolado com $\beta = 1$

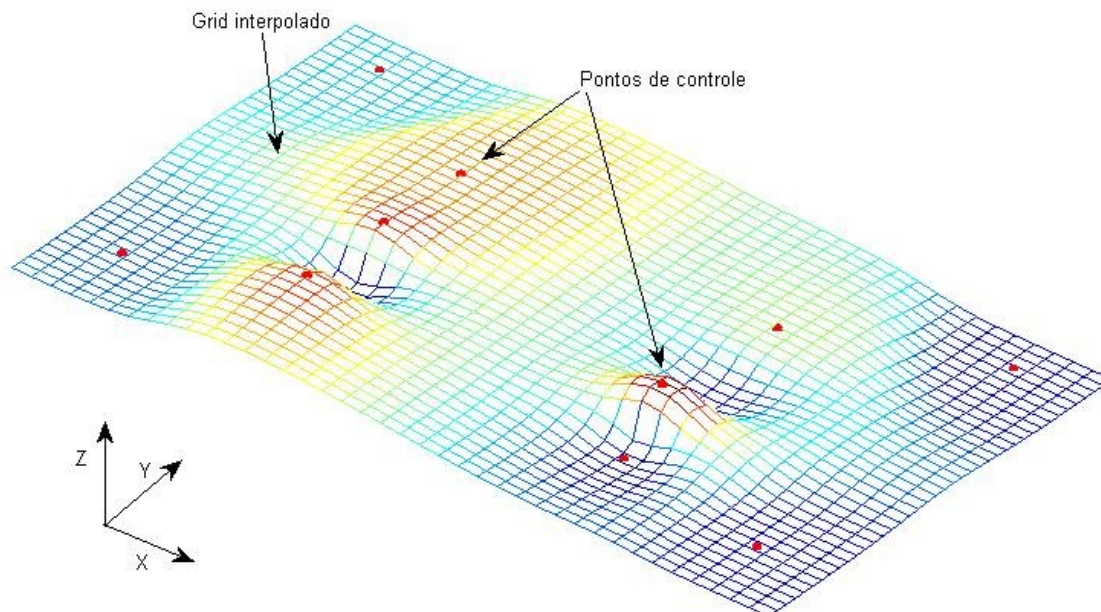


Figura 4 : Mesmo Grid interpolado com $\beta = 4$

2.2 Eustasia e Subsidência

A eustasia é a variação absoluta do nível do mar pelo tempo geológico causado por efeitos tectônicos, climáticos e gravitacionais, principalmente. A subsidência é a movimentação vertical negativa do substrato das bacias causada por efeitos tectônicos e térmicos. Juntando estes dois fenômenos geológicos, pode-se descrever curvas de variação do nível relativo do mar. Esta superposição indica o espaço de acomodação disponível entre o topo do nível do mar e o embasamento do fundo do mar. Efeitos tectônicos e subsidência não foram levados em conta neste modelo numérico. Para áreas não muito acima de 10 km por 10 km onde não se identifica subsidência extensiva, o uso de curvas de nível de mar relativo é bastante satisfatório (Warrlich, 2001). Na figura a seguir, pode-se ter uma melhor visualização destes conceitos (Posamentier *et al*, 1988):

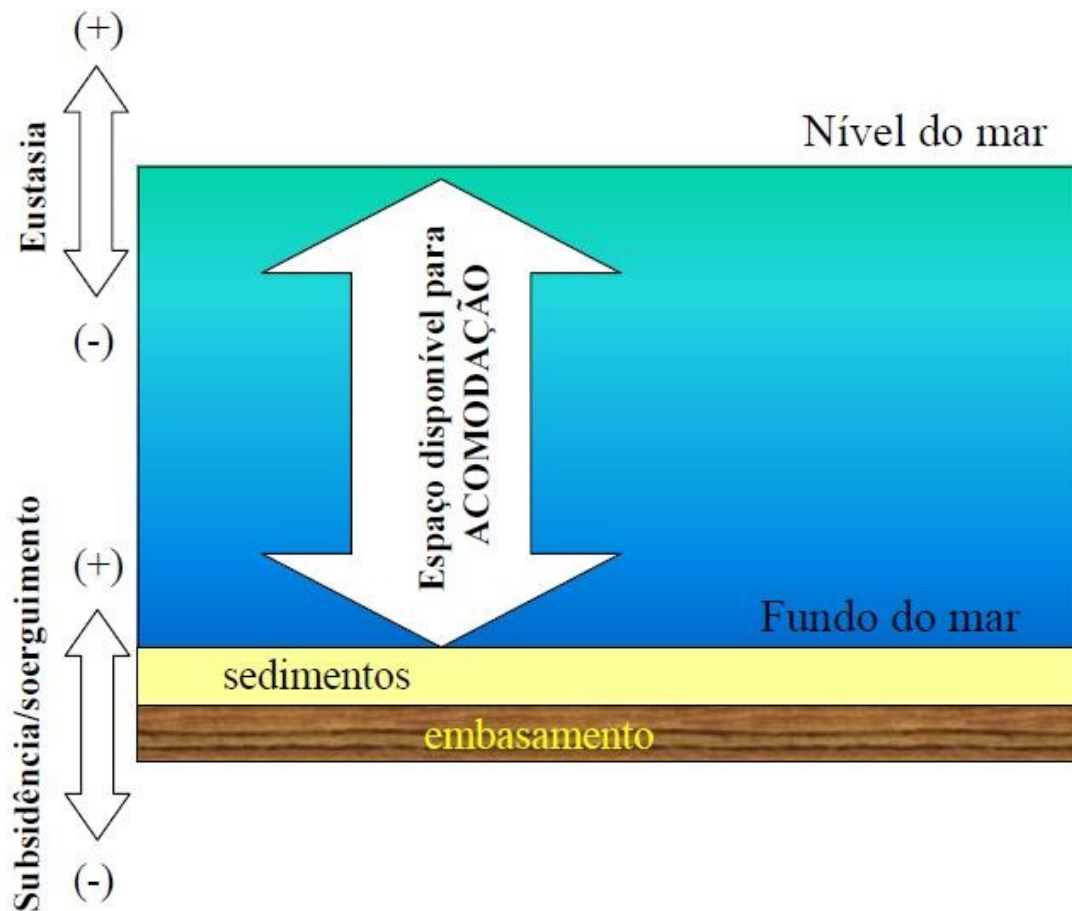


Figura 5: Conceitos de eustasia, subsidência e nível relativo do mar

Na geologia sedimentar, dois principais tipos de curvas eustáticas são utilizadas: curvas de baixa frequência (Haq *et al*, 1987; Harland, 1982) e curvas de alta frequência. As curvas de alta frequência são curvas harmônicas superpostas baseadas na equação do movimento ondulatório:

$$NM = A \sin(\omega t + \theta). \quad (4)$$

Sendo:

NM – nível do mar;

A – amplitude máxima das flutuações do nível do mar;

ω – $2\pi/T$, onde T é o período em que esta amplitude máxima se repete;

t – o tempo geológico;

θ – ângulo de fase da equação de movimento ondulatório.

Na modelagem de deposição carbonática, é comum a superposição de curvas com os seguintes períodos: 1 000 000 – 10 000 000 de anos (terceira ordem), 100 000 – 400 000 anos (quarta ordem) e +- 40 000 anos (quinta ordem) (Reading & Levell, 1996). Para simular o efeito da subsidência, é acrescentada uma parcela de variação linear à Eq. 4, fazendo com que a função senoidal da curva eustática seja superposta

à variação linear da subsidência, montando assim a curva da variação do nível relativo do mar. Um exemplo a seguir mostra esta curva do nível relativo do mar, para um período de terceira ordem superposto a um período de quarta ordem e uma subsidência linear.

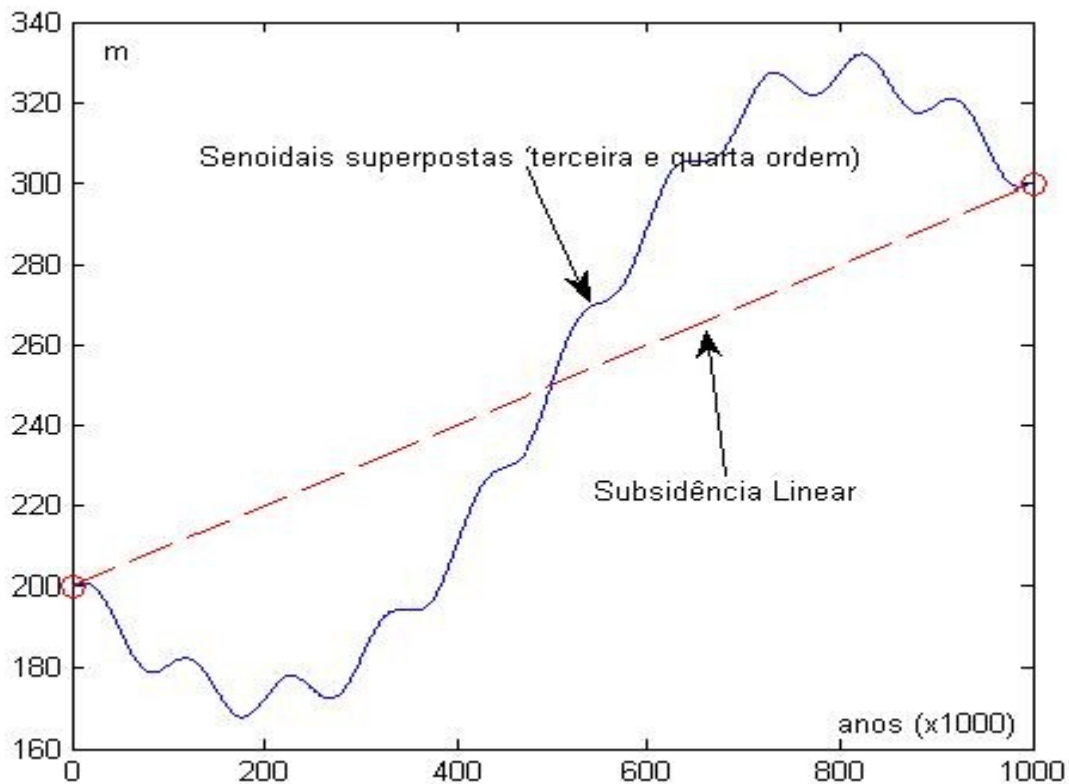


Figura 6: Curva de nível relativo do mar utilizada no modelo

E a nova equação do nível do mar fica:

$$NM = A1.\text{sen}(\omega1.t + \theta) + A2.\text{sen}(\omega2.t) + \alpha t. \quad (5)$$

Sendo α a variação linear da subsidência, $A1$ e $A2$ a amplitude relativa ao período de menor e maior ordem, respectivamente, $\omega1$ e $\omega2$ relativos ao período de menor e maior ordem, respectivamente.

2.3 Produção Carbonática

Como descrito anteriormente, três tipos de fábricas carbonáticas são utilizadas neste trabalho: águas rasas abertas, águas rasas restritas e águas profundas. Cada uma dessas fábricas será relacionada com uma taxa máxima de produção *in situ*. Nos recifes antigos as taxas de crescimento costumam ser mais baixas do que as taxas encontradas em exemplos modernos, isto ocorre principalmente pelo fato dos recifes antigos terem sofrido mais com a influência das flutuações do nível do mar, algo que não pode ser verificado em recifes modernos pela escala geológica de tempo. À

partir da recomposição dos dados antigos com os modernos, as taxas máximas de produção carbonática *in situ*, em metros por mil anos (m/ka), para as três fábricas, podem ser derivadas e são o ponto de partida do modelo. Estas taxas representam o crescimento vertical positivo em metros, para cada mil anos, de uma determinada fábrica carbonática em suas condições perfeitas de produção. As condições de produção podem variar devido à presença de luz, e paralelamente, à batimetria do fundo do mar e às condições marinhas. Para representar as condições de produção, são utilizadas diversas funções de restrição (Chappell, 1980) que em função das condições apresentadas, reduzem as taxas máximas de produção para cada fábrica carbonática. Estas funções variam de 0 a 1 e à partir delas podemos calcular a taxa resultante de produção para um determinado carbonato:

$$P_R(x, y, z) = P_M * S(x, y, z) \quad (6)$$

Sendo:

P_R - Taxa resultante de produção para determinado carbonato

P_M - Taxa máxima de produção para determinado carbonato

$S(x,y,z)$ - Função de restrição

Assim sendo, em seu valor máximo de 1, a função de restrição indica condições perfeitas de produção e conseqüentemente taxas máximas de crescimento carbonático *in situ*. Quando nula, a função de restrição indica condição adversas à produção e crescimento carbonático nulo. Diferentes funções de restrição são utilizadas para quantificar cada uma das condições ideais de produção e juntadas de forma adequada para representar a condição de crescimento de cada fábrica carbonática. A Eq. 6 pode então ser desenvolvida para cada tipo de carbonato:

$$P_R(x, y, z, c) = P_M(c) * \prod_{i=1}^n S_i(x, y, z) \quad (7)$$

Sendo:

c - Tipo de carbonato

n - Quantidade de funções de restrição necessárias para quantificar as condições de produção do carbonato c .

A seguir serão relacionadas as funções de restrição utilizadas neste trabalho.

2.4 Restrição por profundidade

Esta restrição se aplica nos carbonatos de águas rasas devido à dependência à fotossíntese dos organismos produtores destas regiões. A disponibilidade de luz é um fator importante para o crescimento destes organismos (Bosscher & Schlager, 1992), este fato é controlado pela profundidade, já que a luz é absorvida ao longo da coluna d'água, e pela turbidez da água nesta região. Inúmeras medições

comprovaram que a intensidade de radiação solar disponível em uma certa profundidade decresce exponencialmente seguindo a lei de Beer-Lambert (Chalker, 1981; Bosscher 1992). Para águas mais turvas a intensidade da radiação solar decresce mais rapidamente.

$$I_z = I_0 e^{\frac{-z}{\sigma_d}} \quad (8)$$

Sendo:

I_z - Intensidade da radiação solar na profundidade z

I_0 - Intensidade da radiação solar na superfície do nível do mar

z - Profundidade em m

σ_d - Profundidade de atenuação da função exponencial em m. Para água claras, esta profundidade é da ordem dos 30 metros, em águas turvas varia de 1 a 5 metros. A atenuação da radiação solar pela profundidade é bem quantificada pela literatura, porém é preciso saber o impacto que esta atenuação tem sobre os organismos responsáveis pelo crescimento das rochas carbonáticas. Esta relação é bastante complicada de se obter e foi através de estudos em recifes modernos que foi constatado que o crescimento próximo do nível do mar é bastante constante e cai drasticamente em profundidades acima de uma profundidade limite para níveis de luminosidade ideal de um determinado organismo. Daí foi retirada a seguinte relação de proporcionalidade (Bosscher & Schlager, 1992; Bosscher, 1992):

$$P(z, c) \equiv \tanh(L * e^{\frac{-z}{\sigma_d}}) \quad (9)$$

Sendo:

P - Taxa de produção de um determinado carbonato na profundidade z

L - Fator adimensional de transição entre a região de profundidades onde as condições de luminosidade são próximas do ideal e as profundidades onde a produção decai exponencialmente

Analisando o lado direito desta relação de proporcionalidade é constatado que ele tem um domínio entre 0 e 1, sendo um bom candidato para a função de restrição por profundidade. Falta considerar o efeito de restrição devido à ação das ondas, este pode ser representado de maneira bem simples como um crescimento linear à partir do nível do mar até o nível de base das ondas. Para um nível de base das ondas, z_b , podemos definir a função de restrição por profundidade, S_{od} , como sendo:

$$S_{od} = z / z_b \quad (10)$$

Para valores de z entre 0 e z_b ; e:

$$S_{od} = \tanh(L * e^{\frac{-(z-z_b)}{\sigma_d}}) \quad (11)$$

Para valores de z acima de z_b .

A figura a seguir mostra o formato da função de restrição por profundidade S_{od} .

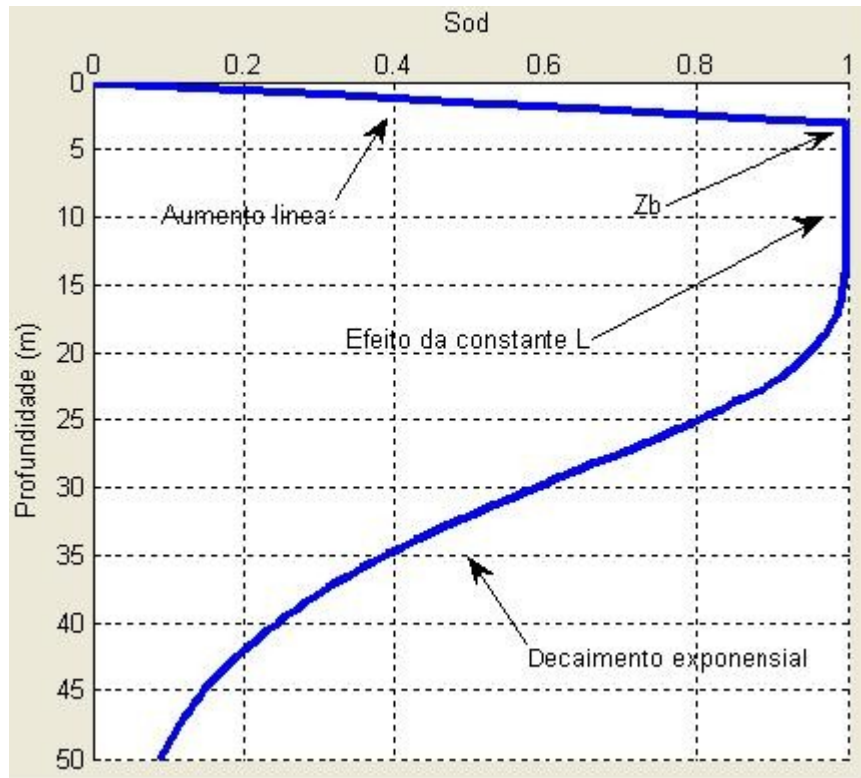


Figura 7: Função de restrição por profundidade

2.5 Restrição por condições marinhas

Os organismos produtores de rochas carbonáticas em águas rasas, além da luminosidade, necessitam de condições marinhas ideais em relação à salinidade, nutrientes, temperatura. Estas condições podem mudar bastante devido ao posicionamento geométrico em uma plataforma carbonática. Em um local mais próximo ao mar aberto, há uma recirculação maior da água marinha e mantendo assim os níveis de salinidade parecidos com os do mar aberto e obtendo uma boa renovação de nutrientes. Em águas restritas são muitas vezes encontradas situações de hipersalinidade e de baixa renovação de nutrientes. São estas condições que separam as duas fábricas carbonáticas de águas rasas: águas rasas restritas e águas rasas abertas. Como é muito difícil de quantificar níveis de salinidade e nutrientes para o passado geológico, este problema deve ser transformado em um problema geométrico. Locais na margem de uma plataforma, ou seja, de baixa profundidade porém próximos de locais de maior profundidade são consideradas de águas abertas e locais no interior de uma plataforma, ou seja, de baixa profundidade e envolvidos de locais de baixa profundidade são considerados de águas restritas. A função de restrição por condições marinhas será relacionada à distância da região estudada à locais de borda de plataforma. Porém estas distâncias são complicadas de calcular,

principalmente para geometrias irregulares. Uma maneira relativamente simples, e possível de automatizar computacionalmente, para ter uma noção destas distâncias é utilizando um perfil de profundidades suavizadas para indicar estas distâncias (Warrlich, 2001). A profundidade suavizada de um ponto na superfície do fundo do mar sofre influências das profundidades dos pontos em seu entorno, assim pode-se determinar a posição relativa deste ponto através de sua profundidade suavizada.

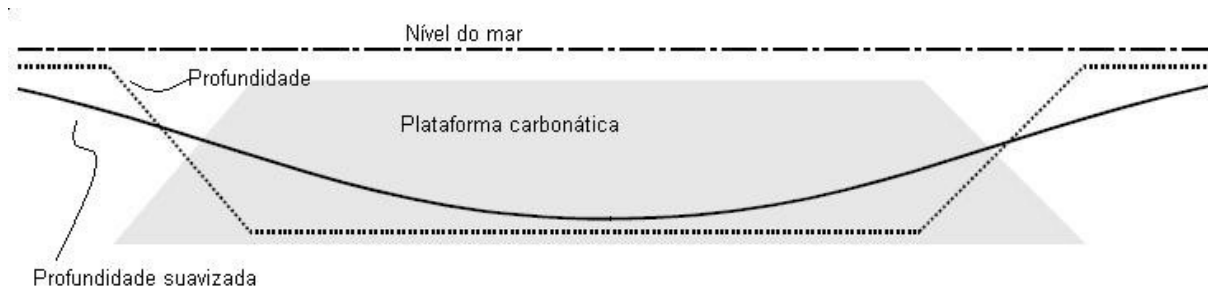


Figura 8: Perfil de profundidade suavizado e normal através de um corte transversal de uma plataforma carbonática

Uma análise na Figura 8 mostra que para profundidades iguais, um ponto na borda da plataforma tem uma profundidade suavizada maior que um ponto no interior da plataforma. Baseado neste fator será feita uma suavização da superfície do fundo do mar utilizando um filtro Gaussiano à partir da seguinte convolução (Warrlich, 2001):

$$z_s(x, y) = z(x, y) \otimes G(x, y) \quad (12)$$

Sendo:

$z_s(x, y)$ - Profundidade suavizada em (x, y)

$z(x, y)$ - Profundidade em (x, y)

$G(x, y)$ - Filtro Gaussiano utilizado como *kernel* da convolução

$$G(x, y) = \frac{1}{\pi\sigma_G} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_G^2}} \quad (13)$$

Sendo:

σ_G - Desvio padrão da distribuição de Gauss, quanto maior, maior será a área de influência da suavização.

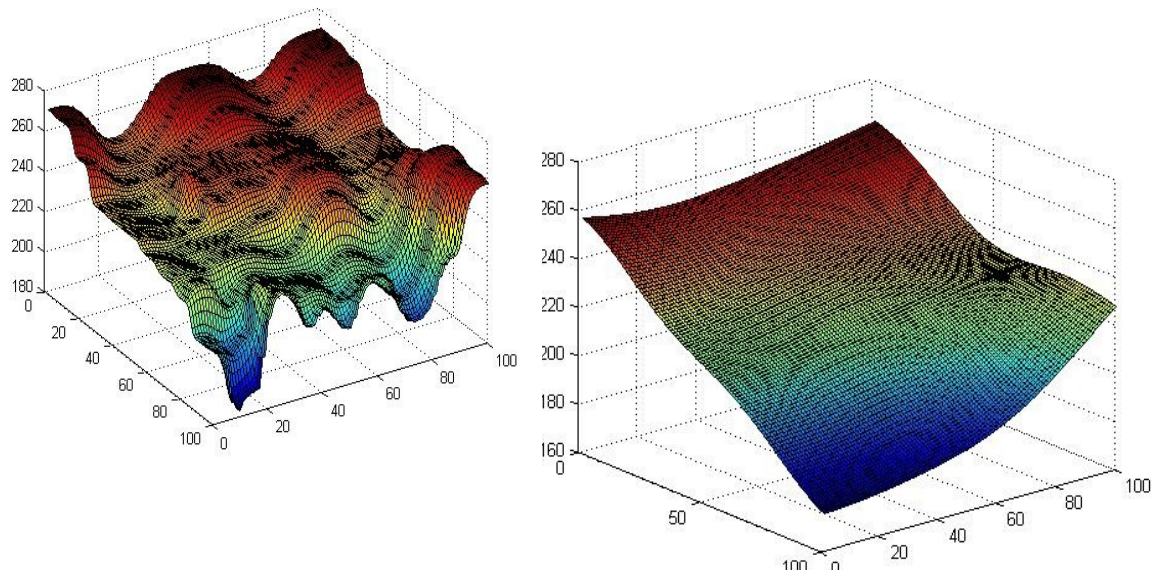


Figura 9: Exemplo de uma superfície suavizada com um filtro Gaussiano

Após obter as profundidades suavizadas, basta quantificar a função de restrição em função destas profundidades suavizadas. Para isto se pode usar uma função exponencial parecida com a função de restrição por profundidade (Warrlich, 2001):

$$S_{OM}(x, y) = 1 - e^{\frac{-z_s(x, y)}{\sigma_M}} \quad (14)$$

Sendo:

$S_{OM}(x, y)$ - Restrição devido ao desvio de condições marinhas ideais para carbonatos de águas abertas

σ_M - Fator de atenuação exponencial

Desta forma a restrição terá valor nulo para valores nulos da profundidade suavizada e crescerá exponencialmente junto à mesma. No caso de carbonatos de águas rasas e restritas, suas condições ideais de crescimento acontecem justamente em locais de interior de plataforma e se pode usar o mesmo perfil de profundidades suavizadas para determinar sua função de restrição (Warrlich, 2001):

$$S_{RM} = 1 - S_{OM} \quad (15)$$

Sendo:

S_{RM} - Restrição devido ao desvio de condições marinhas ideais para carbonatos de águas restritas

2.6 Restrição por deposição de sedimentos soltos

Taxas de deposição de sedimentos soltos transportados, sejam de origem clástica

proveniente de aporte fluvial, ou de origem carbonática previamente depositada *in situ* e depois erodidas, podem inibir o crescimento *in situ* de rochas carbonáticas. Estes sedimentos soltos depositados podem cobrir e extinguir os organismos responsáveis pela produção carbonática e deixam o fundo do mar com uma densidade menor, diminuindo a capacidade dos organismos de se prenderem no fundo e montarem suas colônias (Granjeon, 1997). A restrição devido às taxas de deposição é definida a partir de uma taxa limite, abaixo de qual a deposição não incomoda a atividade dos organismos. Acima desta taxa limite a produção carbonática decai exponencialmente (Lawrance *et al*, 1987; Aigner *et al*, 1989):

$$S_{SC}(x, y) = e^{-\frac{(s(x,y)-s_L)}{\sigma_s}} ; s(x, y) \geq s_L \quad (16)$$

$$S_{SC}(x, y) = 1; s(x, y) \leq s_L \quad (17)$$

Sendo:

$s(x,y)$ - Taxa de deposição de sedimentos soltos em (x,y)

s_L - Taxa de deposição limite para início da restrição

σ_s - Atenuação exponencial

S_{SC} - Restrição devido à deposição de sedimentos soltos

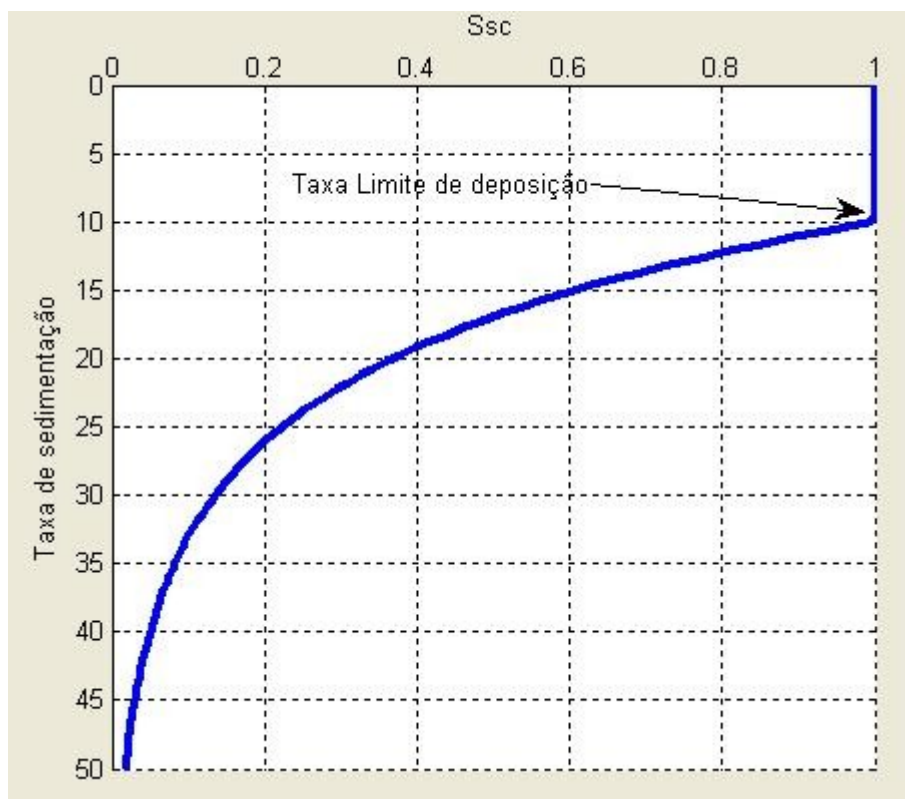


Figura 10: Função de restrição devido à deposição de sedimentos soltos

2.7 Restrição por profundidade para carbonatos de águas profundas

Os organismos presentes em águas profundas também podem produzir rochas carbonáticas, porém com taxas bastante inferiores às rochas de águas rasas. Suas taxas de produção são máximas em regiões de alto mar com grandes profundidades e diminuem drasticamente ao se aproximar dos taludes costeiros. . Em águas mais rasas, os organismos de águas profundas não conseguem competir com os organismos de águas rasas que tem taxas de produção muito mais elevadas. Assim sendo, a restrição à produção nas regiões profundas é em função somente da profundidade e mais uma vez pode ser utilizada uma exponencial para definir esta função de restrição (Bowman & Vail, 1999):

$$S_{PP} = 1 - e^{\frac{-z(x,y)}{\sigma_p}} \quad (18)$$

Sendo:

S_{PP} - Função de restrição por profundidade para carbonatos de águas profundas

σ_p - Fator de atenuação exponencial

2.8 Produção carbonática resultante

À partir das funções de restrição, a Eq. 7 pode ser desenvolvida para cada fábrica carbonática.

- Águas rasas e abertas:

$$P_{RA}(x, y, z) = P_{MA} * S_{OD}(x, y, z) * S_{OM}(x, y, z) * S_{SC}(x, y) \quad (19)$$

- Águas rasas e restritas:

$$P_{RR}(x, y, z) = P_{MR} * S_{OD}(x, y, z) * S_{RM}(x, y, z) * S_{SC}(x, y) \quad (20)$$

- Águas profundas:

$$P_{RP}(x, y, z) = P_{MP} * S_{PP}(x, y, z) * S_{SC}(x, y) \quad (21)$$

Sendo:

$P_{RA}(x, y, z)$, $P_{RR}(x, y, z)$ e $P_{RP}(x, y, z)$ as taxas resultantes de crescimento carbonático, no ponto (x, y, z) em águas rasas abertas, águas rasas restritas e águas profundas, respectivamente.

P_{MA} , P_{MR} e P_{MP} as taxas máximas de crescimento carbonático para condições ideais, em águas rasas abertas, águas rasas restritas e águas profundas, respectivamente.

2.9 Sedimentação carbonática

Após calculadas as taxas resultantes de crescimento carbonático para cada fábrica, deve se definir como a plataforma carbonática evolui através do tempo. O acréscimo da camada de sedimento para cada ponto da superfície será a soma das taxas de

crescimento por um determinado intervalo de tempo:

$$ds(x, y, z) = (P_{RA}(x, y, z) + P_{RR}(x, y, z) + P_{RP}(x, y, z)) * dt \quad (22)$$

Sendo:

$ds(x,y,z)$ - Acréscimo da camada de sedimento carbonático

dt - Intervalo de tempo

Definindo a quantidade de sedimento produzido para um intervalo de tempo, ainda é necessário definir uma classificação satisfatória destes sedimentos para facilitar a análise dos resultados. Os ambientes de baixa energia hidrodinâmica costumam apresentar sedimentos de granulometria mais fina enquanto ambientes de alta energia hidrodinâmica apresentam sedimentos mais graúdos. Neste trabalho, as regiões de águas rasas e restritas e de águas profundas serão consideradas de baixa energia hidrodinâmica e as regiões de águas rasas e abertas, de alta energia. Baseado nisto foi feita uma adaptação à classificação proposta por Dunham (1962):

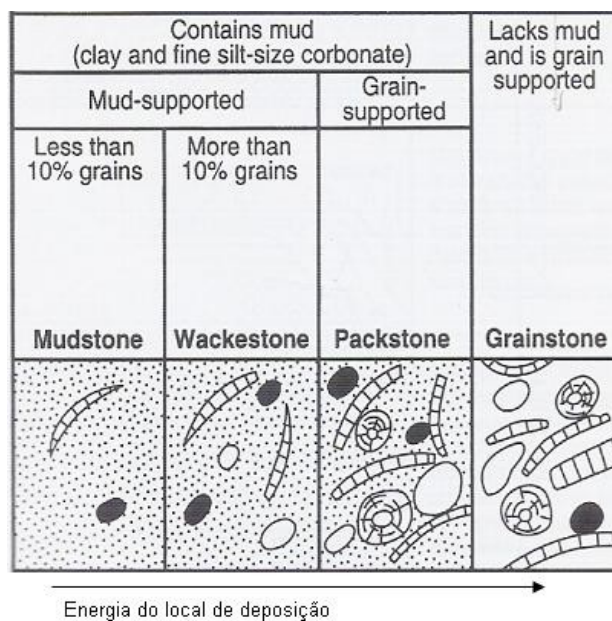


Figura 11: Classificação de rochas carbonáticas segundo Dunham (1962)

Adaptando esta classificação às fábricas carbonáticas simuladas neste trabalho, a seguinte classificação é proposta:

| Classificação | Parcela borda plataforma | Sedimento fino predominante |
|---------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Mudstone Pelágico | 0 - 10 % | Águas profundas |
| Wackestone Pelágico | 10 - 50 % | Águas profundas |
| Packstone Pelágico | 50 - 90 % | Águas profundas |
| Mudstone Lagunal | 0 - 10 % | Águas rasas restritas |
| Wackestone Lagunal | 10 - 50 % | Águas rasas restritas |

| | | |
|--------------------|-----------|-----------------------|
| Packestone Lagunal | 50 - 90 % | Águas rasas restritas |
| Grainstone | > 90 % | Qualquer um |

Tabela 1: Classificação dos sedimentos carbonáticos neste trabalho

3 MODELO COMPUTACIONAL

Parte extensa deste trabalho foi a elaboração de um modelo computacional completo para simulação de sedimentação carbonática. Um programa, totalmente desenvolvido no ambiente MATLAB, junta uma interface ao usuário intuitiva a técnicas de computação gráfica interativa. O CarbSM (*CARBonate Sedimentation Model*) efetua o pré e pós processamento junto aos algoritmos de deposição carbonática.

3.1 Tela principal

A tela principal de CarbSM tem como parte central o *canvas* onde é desenhada a superfície resultante, tem todos os controles de visualização dos resultados e um menu para entrada de dados iniciais.

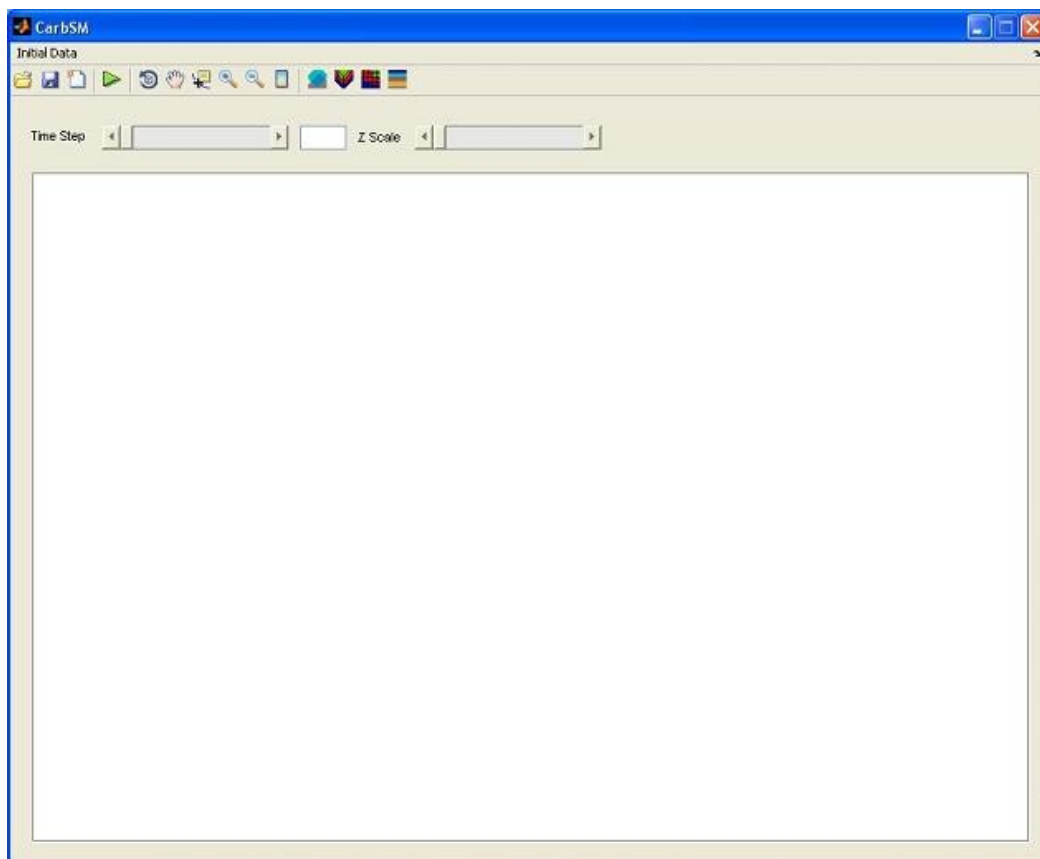


Figura 12: Tela principal do programa CarbSM com os controles de visualização, o *canvas* principal e o menu de entrada de dados

3.2 Entrada de dados

A entrada de dados é dividida pelos seguintes itens:



Figura 13: Menu para entrada dos dados necessários para rodar a simulação do CarbSM

- Taxas máximas de produção carbonática:

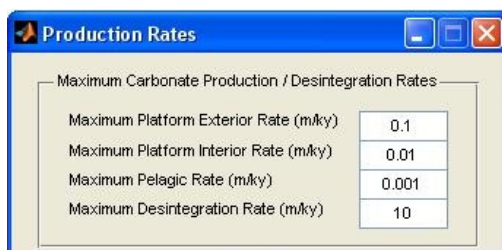


Figura 14: Entrada de dados para taxas máximas de produção carbonática para as diferentes fábricas

- Tempo de simulação

Aqui é definido o tempo total da simulação, o intervalo de tempo da simulação e o intervalo para as curvas de tempo na visualização do modelo resultante:

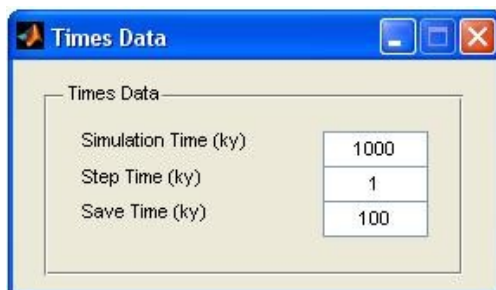


Figura 15: Entrada dos tempos da simulação

- Definição da curva do nível relativa do mar

Aqui é definida e ajustada a curva de nível relativo do mar, segundo a Eq.5. Outras curvas que não podem ser definidas através da equação podem ser carregadas por arquivo de texto. Além de entrar com os parâmetros do Eq.5 para calcular a curva, o usuário tem a opção de fazer um ajuste fino do nível inicial do mar e da subsidência linear com ajuda do mouse na curva:

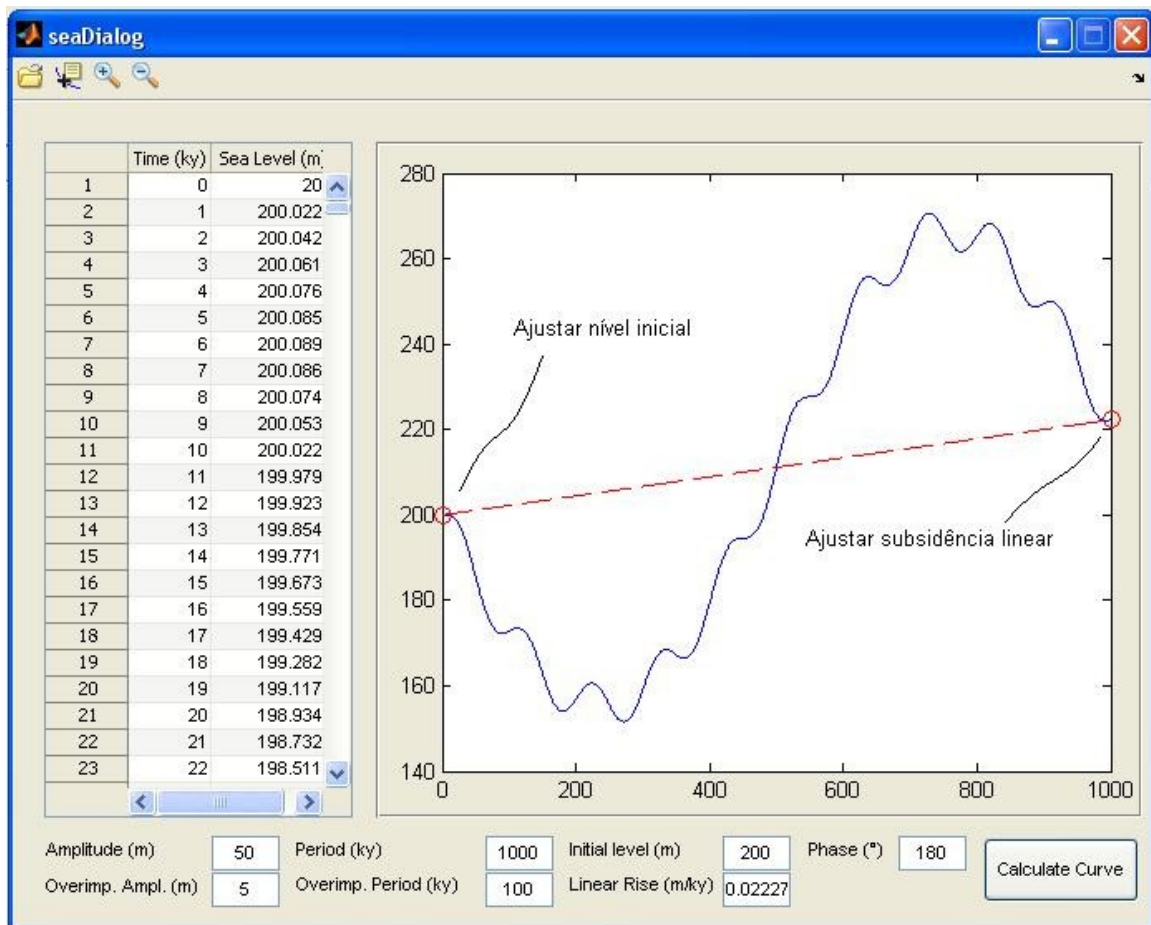


Figura 16: Definição da curva do nível relativo do mar

- Funções de restrição

Para definição das funções de restrição utilizadas no modelo, basta o usuário entrar com todos os parâmetros apresentados na seção anterior, além de ter uma visualização das curvas geradas. Dependendo das condições da bacia a ser simulada, o usuário pode optar pelas funções de restrição a serem ativadas para a simulação:

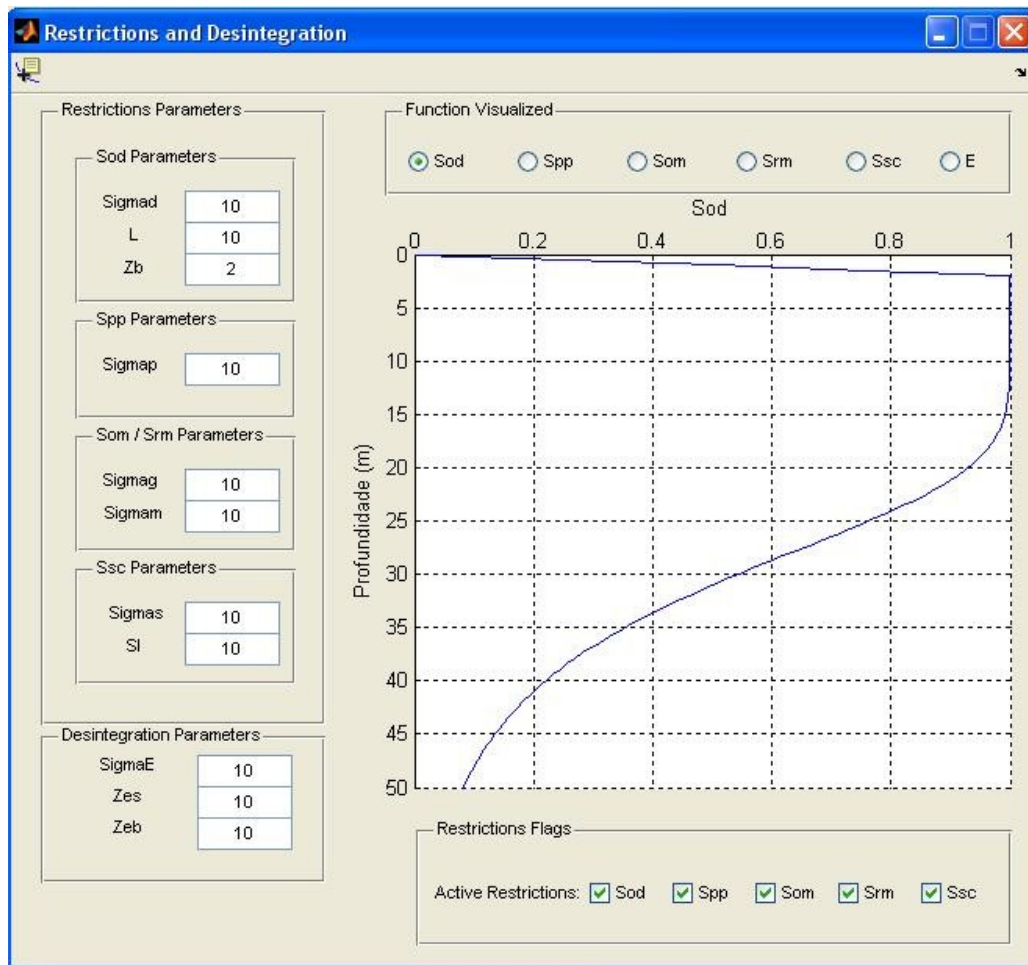


Figura 17: Definição dos parâmetros das funções de restrição e do uso das mesmas

- Superfície inicial

Para iniciar a simulação, é necessário definir uma superfície inicial que é interpolada através dos pontos de controle lidos de um arquivo texto. Após a leitura dos pontos de controle é selecionada a área que se deseja usar na simulação. Então o usuário define todos os parâmetros do *grid* a ser interpolado, como número de nós nas direções x e y, a distância uniforme entre os nós e o expoente para o algoritmo de interpolação. Além disto o diálogo também apresenta vários controles para melhorar a visualização do *grid* criado.

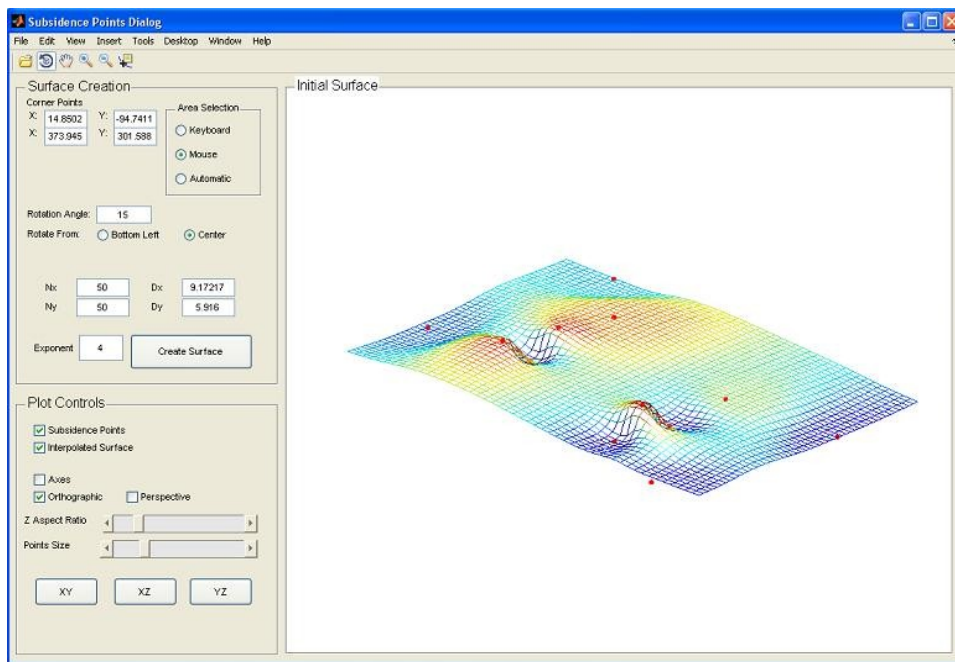


Figura 18: Diálogo para definición del *grid* que será utilizado en la simulación

3.3 Visualización de la superficie resultante

Después de realizada la simulación, la pantalla principal de CarbSM muestra el modelo resultante y algunas opciones de visualización:

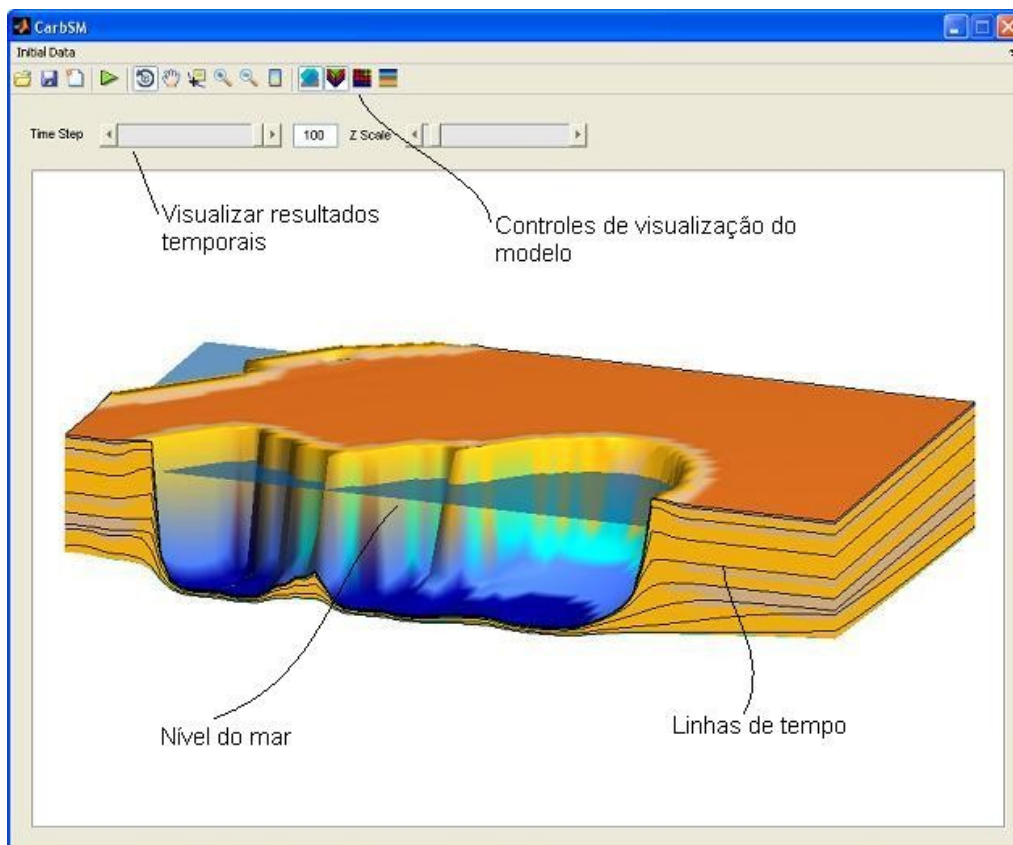


Figura 19: Visualización de los resultados

4 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi de demonstrar o desenvolvimento de um programa computacional de simulação de sedimentação carbonática. Ainda não foram testados exemplos da natureza para validação do modelo. Somente situações fictícias foram testadas até agora para avaliar o comportamento da simulação e verificar a coerência dos resultados. Na modelagem geológica, uma grande dificuldade é a definição dos parâmetros iniciais do passado geológico. Fazendo vários testes com diferentes valores destes parâmetros, é fácil de constatar o quanto eles influem nos resultados finais, necessitando de um boa calibragem para cada rodar um exemplo real.

Grande objetivo deste trabalho também foi testar as possibilidades de desenvolvimento no ambiente MATLAB e este se mostrou uma excelente ferramenta para qualquer tipo de aplicações. Além de apresentar um código fácil de entender e de programar, a imensidade de funções já pré-definidas ajuda muito no desenvolvimento de qualquer programa computacional no meio científico. Aliado a isto estão as poderosas ferramentas gráficas para visualização de resultados, oferecendo inúmeras opções para fácil adaptação de qualquer tipo de problema. Por fim se obtém um programa computacional completo e, se programado corretamente, com desempenho compatível a outras linguagens de programação como C e C++.

REFERÊNCIAS

- Ainger, T., Doyle, M., Lawrence, D.T., Epting, M. E van Vliet, A. (1989). Quantitative modeling of carbonate platforms: some examples. Em: Controls on carbonate platform and basin development, SEPM Spec. Publ., v.44, p.27-37
- Bosscher, H. e Schlager, W. (1992). Computer simulation of reef growth. *Sedimentology*, v. 39, p. 503-512
- Bosscher, S.A. e Vail P.R.(1992). CARBPLAT – a computer model to simulate the development of carbonate platforms. *Geology*, v.20, p.235-238
- Bowman, S.A. e Vail P.R. (1999). Interpreting the stratigraphy of the Baltimore canyon section, offshore New Jersey with PHIL, a stratigraphic simulator. Em: Numerical experiments in stratigraphy: Recent advances in stratigraphic and sedimentologic computer simulations (Ed. Por W. Harbaugh, W.L. Watney, E.C. Rankey, R. Slingerland, R.H., Goldstein and E.K. Franseen) SEPM Spec. Publ. # 62 p.117-138.
- Burgess, P.M. e Wright, V.P. (2003). Numerical forward modeling of carbonate platform dynamics: an evaluation of complexity and completeness in carbonate strata. *Journal of Sedimentary Research*, v. 73, p. 637-652
- Carvalho, C.V.A. (2003) Simulação de transporte e deposição de sedimentos

- siliciclásticos em ambientes de plataforma, talude e bacia. Tese de Doutorado da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 131 pp.
- Chalker, B.E., (1981). Simulating light saturation curves for photosynthetic and calcification by reef-building corals. *Marine Biology*, v. 63, p. 135-141
- Chappell, J. (1980). Coral morphology, diversity and reef growth. *Nature* v.286, p.249-252
- Dunham, R.J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: *Classification of Carbonate Rocks* (Ed. by W.E. Ham), Mem. Am. Ass. petrol. Geol., v.1, p.108- 121
- Faccion, J.C (2002), Relatório Interno Cenpes/PETROBRAS, Rio de Janeiro
- Granjeon, D. (1997), "Conception et Applications D'un Modelé Diffusif 3D Multilithologique", Tese de Doutorado, Institut Français du Pétrole, Université Rennes
- Haq, B.U., Hardenbol, J., Vail, P.R. (1987). Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, v. 235, p.1156-1167
- Lamdim, P. M., B. (2000), "Texto Didático 2 – Introdução aos Métodos de Estimatição espacial para confecção de mapas", UNESP/Rio Claro
- Lawrence, D.T., Doyle, M., Snelson, S. e Horsfield, W.T. (1987). Stratigraphic modeling of sedimentary basins. SEG 57th Anual International Meeting Expanded Abstracts Volume, p. 407-408
- Posamentier, H. W. & Vail, P. R. (1988), "Eustatic Control on clastic deposition II – Sequences and systems tracts models.", In: Wilgus, C.K.;Hastings, B.S.; Kendal, C.G.S.C.; "Sea-Level Changes – an Integrated Approach.", Tulsa, SEPM, p. 125-154, (SEPM sp. Pd. #42)
- Reading, H. G. & Levell, B.K. (1996). Controls on the sedimentary rock record. In: *Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy* (Ed. by H.G. Reading) Blackwell Science, London, p.5-36.
- SADLER, P.M., (1981), Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections: *Journal of Geology*, v. 89, p. 569–584
- SADLER, P.M., (1994), The expected duration of upward-shallowing peritidal

carbonate cycles and their terminal hiatuses: Geological Society of America, Bulletin, v. 106, p. 791–802

Schlager, W. (1981). The paradox of drowned reefs and carbonate platforms. Geol. Soc. Of América Bull., v.92, p.197-211.

Schlager, W., (2000), Sedimentation rates and growth potential of tropical cool-water, and mudmound carbonate systems, em Insalaco, E., Shelton, P.W., and Palmer, T.J., eds., Carbonate Platform Systems: Components and Interactions: Geological Society of London, Special Publication 178, p. 217–228

Warrlich, G.M.D. (2001) Computer modelling of carbonate platform evolution. Tese de Doutorado, University of London, 268 pp.

Warrlich, G.M.D., Bosence, D., Waltham, D., Wood, C., Boylan, A., Badenas, B. (2008). 3D stratigraphic forward modelling for analysis and prediction of carbonate platform stratigraphies in exploration and production. Marine and Petroleum Geology, v. 25, p. 35-58

Watney, W.L.; Rankey, E.C. e Harbaugh, W. (1999). Perspectives on stratigraphic simulation models: current approaches and future opportunities. Em: Numerical experiments in stratigraphy: Recent advances in stratigraphic and sedimentologic computer simulations. Simulations. (Ed. Por W. Harbaugh, W.L. Watney, E.C. Rankey, R. Slingerland, R.H., Goldstein and E.K. Franseen) SEPM Spec. Publ. # 62 p.3-21