

Notas de aula da disciplina de Estratigrafia (GSA0307)

Professor: Renato Paes de Almeida

Monitora: Geovana Leite Geraldo

6 ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS

6.1 Introdução

Para introduzir a Estratigrafia de Sequências, serão apresentados alguns conceitos:

Nível de base: superfície teórica acima da qual predomina a erosão e abaixo a sedimentação, no modelo, o nível de base é o nível do mar. No caso de sistemas fluviais, o nível de base pode estar acima do nível do mar.

Espaço de acomodação: espaço disponível para ser preenchido por sedimento abaixo do nível de base

Eustasia: variação absoluta do nível do mar em relação ao centro da Terra, um dos fatores de controle mais importante para isso é a presença ou derretimento de gelo **nos continentes**, pois esse processo pode tirar ou repor água no mar. Já as geleiras que estão localizadas no mar não alteram o nível da água, porque há compensação isostática com parte do gelo para fora da água. Quando o gelo derrete, o volume é o mesmo. É diferente de batimetria, que está relacionada com a distância do topo do sedimento até a superfície da água.

O espaço de acomodação é controlado pela subsidência, pela eustasia e pelo aporte sedimentar. A subsidência e a subida eustática aumentam o espaço de acomodação. O aporte sedimentar diminui o espaço de acomodação.

$$\text{Variação do espaço} = \text{subsidência} \pm \text{eustasia} - \text{aporte sedimentar}$$

O ambiente de deposição sedimentar indica profundidade (batimetria) na qual o sedimento foi depositado e não o nível do mar. Desse modo, a queda do nível do mar é indicada por uma superfície de erosão e não uma sequência com sedimentos mais continentais.

Uma sequência de 1000 m de espessura não quer dizer que o nível do mar não mudou, mas sim que o aporte foi suficiente para compensar a subida do nível do mar. Também não quer dizer que o nível do mar subiu 1000 m, porque também ocorreu subsidência. Assim, o registro sedimentar nos mostra relações entre as taxas e não os picos.

Progradação: avanço gradual dos sistemas deposicionais proximais sobre os distais

Retrogradação: deposição gradual de sistemas deposicionais distais sobre os proximais

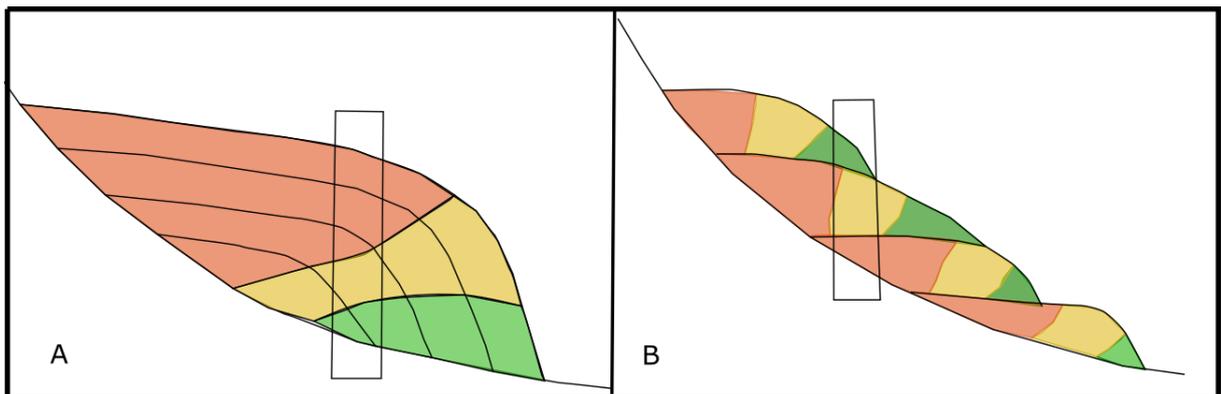


Figura 1: A- Esquema de progradação. B- Esquema de retrogradação. O laranja representa depósitos fluviais, o amarelo depósitos costeiros e o verde depósitos marinhos.

Transgressão: o mar avança em relação ao continente

Regressão: o mar regride em relação ao continente

Regressão forçada: quando o nível do mar desce muito rápido, ocorre erosão e mudança no nível de base

Clinofoma: geometria deposicional, em forma de cunha, com a maior parte da deposição nas porções proximais

Relação entre taxas

$\Delta\text{Espaço} > 0$

- Produção sedimentar $> \Delta\text{Espaço}$: o aporte é mais rápido que a geração de espaço, o nível batimétrico diminui, os sistemas deposicionais avançam, ocorrendo a progradação
- Produção sedimentar $< \Delta\text{Espaço}$: o aporte é mais lento que a geração de espaço, a distância do nível da água para o topo do sedimento (batimetria) é cada vez maior, ou seja, cada vez mais fundo, ocorre retrogradação

$\Delta\text{Espaço} < 0$

- Ocorre erosão e queda do nível de base

6.2 O Modelo da Exxon

Para simplificar o modelo, pode-se considerar o fundo da bacia como referencial fixo de modo que a subsidência seja representada por aumento na eustasia. A subsidência de uma bacia não é capaz de abaixar o nível do mar de modo significativo, pois as variações no nível do mar ocorrem em uma frequência e amplitude maiores do que as variações na subsidência.

Nível de base: superfície teórica abaixo da qual predomina a sedimentação e acima da qual predomina a erosão

O Modelo da Exxon para Estratigrafia de Sequências utiliza as seguintes simplificações:

- Nível de base relativo é o nível do mar
- Variação senoide do nível eustático
- Subsidência constante
- Aporte sedimentar constante
- Considera-se o fundo da bacia fixo, de modo que o efeito da subsidência é representado pelo aumento do nível relativo do mar

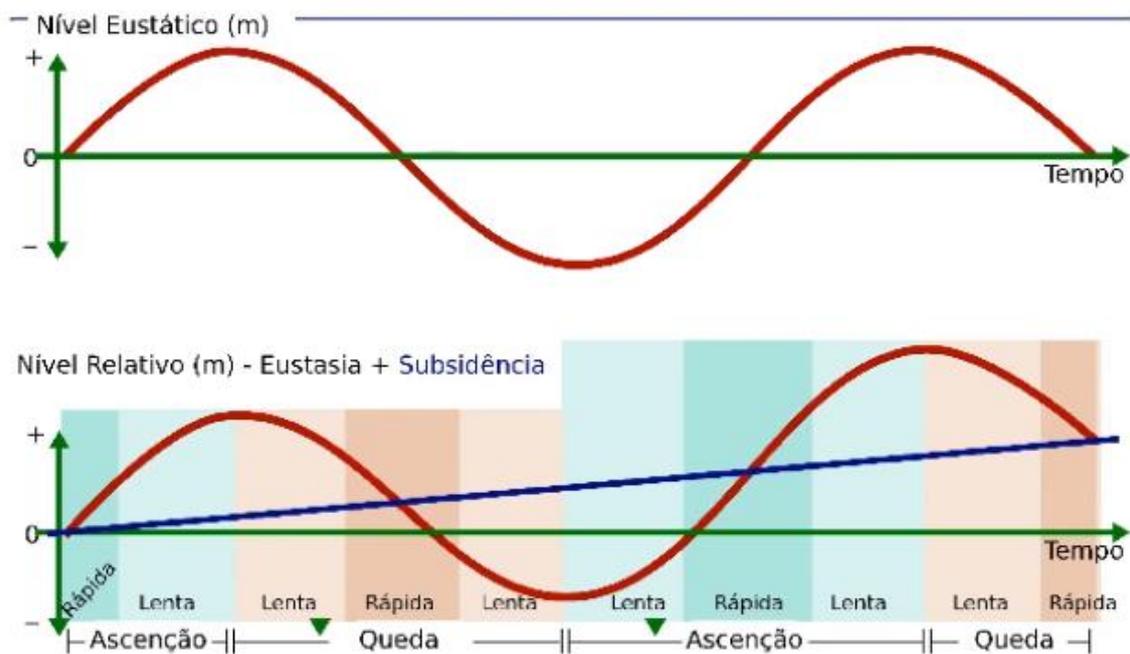


Figura 2: Variação do nível eustático e subsidência segundo o modelo da Exxon. Notar que ao somar os efeitos de subsidência e eustasia, a curva do nível relativo do mar torna-se uma senoide inclinada. Se considerarmos apenas o nível eustático, pode-se dizer que o nível relativo do mar cai e sobe em intervalos iguais de tempo. Porém, a adição da subsidência causa um efeito sempre positivo de geração de espaço, de modo que nesse modelo, os períodos de queda do nível do mar são menores e mais lentos do que os períodos de subida do nível do mar.

A progradação e retrogradação dos sistemas deposicionais ocorrem em função das taxas de geração de espaço e não do valor do nível relativo de base. Ou seja, não importa se o valor do nível relativo do mar é alto ou baixo, o que importa é a taxa a que ele está variando, de modo que podemos usar para o nosso modelo o gráfico da derivada do nível relativo, que nos dá a taxa de geração de espaço.

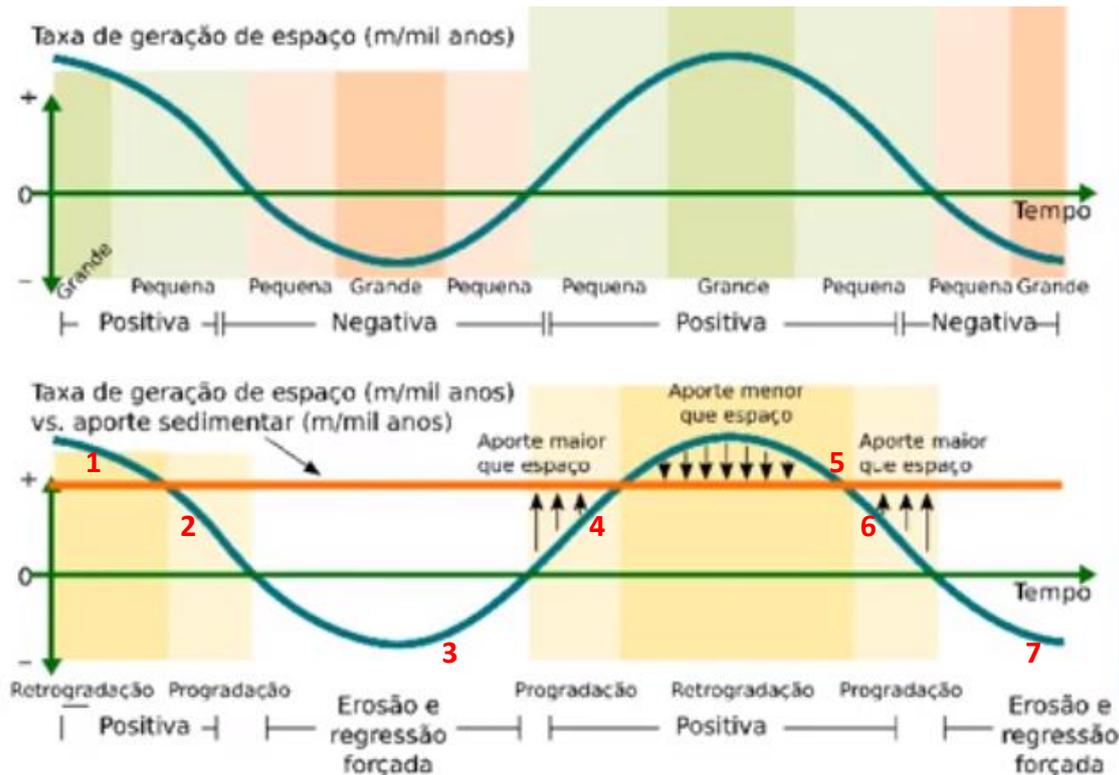


Figura 3: Curva de taxa de geração de espaço derivada da curva do nível relativo do mar (eustasia+subsidência). A curva é assimétrica devido ao efeito da subsidência. Notar que a taxa de geração de espaço é zero quando os valores do nível relativo do mar atingem o máximo e o mínimo. Os números em vermelho estão relacionados às clinofórmulas da figura 4.

Quando a taxa de geração de espaço é negativa, a bacia perdeu espaço de acomodação, de modo que o sedimento já depositado é exposto e ocorre erosão e queda forçada do nível de base. Quando a taxa de geração de espaço é positiva, pode ocorrer progradação ou retrogradação.

Considerando um aporte sedimentar constante (linha laranja no segundo gráfico), sendo a taxa de geração de espaço positiva, quando aporte $> \Delta$ Espaço, ocorre progradação e quando aporte $< \Delta$ Espaço, ocorre retrogradação.

- Uma *Sequência Depositional* compreende-se entre dois eventos de queda, período no qual a geração de espaço é positiva. Assim, a superfície antes da queda é chamada de *Limite de Sequência Depositional (LSD)*.
- Ordem dos eventos a partir do começo da sequência deposicional: progradação – retrogradação – progradação – cai – progradação – retrogradação – progradação – cai

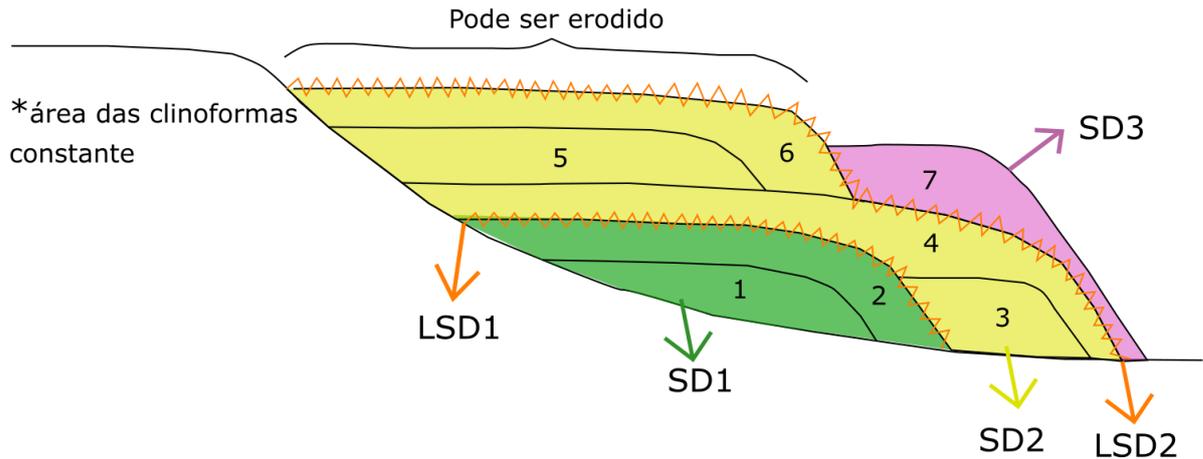


Figura 4: Clinoformas originadas de acordo com o modelo da figura 36. Notar que o Limite de Sequências Depositionais é a superfície antes da queda do nível de base. A nova sequência deposicional tem início após a queda.

6.2.1 *Onlap e Downlap*

A estratigrafia de sequências surgiu a partir da análise de seções sísmicas com exagero vertical. Esse modelo veio para explicar os padrões de deposição em clinoformas.

A análise é realizada primeiramente com o reconhecimento do início e fim dos refletores. Deve-se saber de que lado veio o sedimento. O nível de base de determinada época é marcado pelo ponto onde se inicia a deposição de um refletor. Ou seja, acima dele, predominava a erosão e acima dele, predomina a deposição.

Onlap: ponto do refletor da clinoforma que termina acima de outro refletor, tendo o segundo um ângulo maior que o primeiro refletor. Terminação mais proximal da clinoforma, onde tem início a deposição.

Downlap: terminação de um refletor contra outro que mergulha menos que o primeiro, representa a sedimentação mais distal da clinoforma.

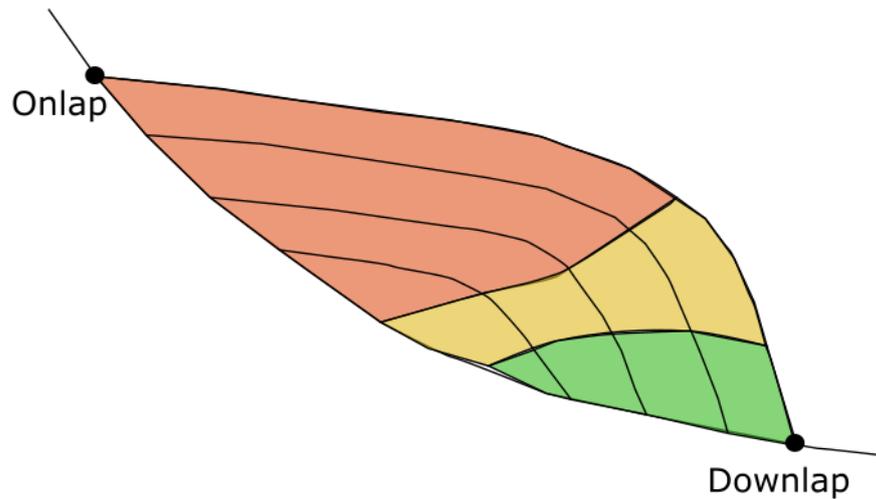


Figura 5: Posição do onlap e downlap em relação aos refletores da clinoforma

Podemos considerar cada topo de clinoforma como um evento deposicional e ao distinguir o *onlap* e *downlap* de cada uma, identificamos onde se inicia e termina a sedimentação efetiva em cada intervalo de tempo.

Assim, é possível elaborar uma carta cronoestratigráfica, tendo como eixo x a projeção do *onlap* e do *downlap*, enquanto o eixo y representa o tempo, com cada clinoforma representada de forma equidistante, correspondendo a intervalos iguais de sedimentação.

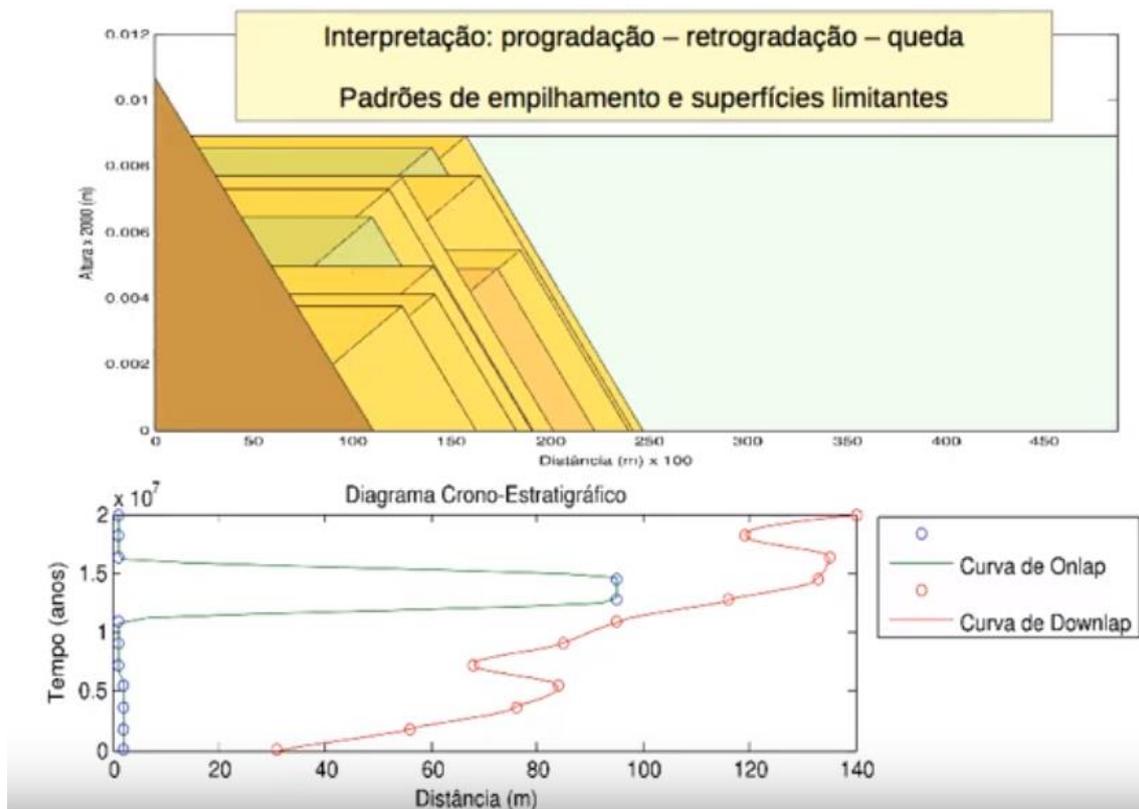


Figura 6: A figura de cima representa uma bacia com deposição em clinofórmicas, enquanto o diagrama de baixo apresenta as curvas de onlap e downlap da Carta Cronoestratigráfica. Notar que o avanço do downlap indica progradação, enquanto o recuo indica retrogradação. Já em relação ao onlap, a sua mudança abrupta de posição indica uma regressão forçada, ou seja, uma queda no nível de base e provável erosão do sedimento exposto.

Interpretação das curvas de onlap e downlap:

- *Onlap:*
 - Avanço gradual para a área fonte- indica uma sequência deposicional e ocorre na progradação e retrogradação
 - Recuo abrupto em direção ao centro da bacia (queda)- indica a queda do nível de base e erosão, marca o limite de sequência deposicional
- *Downlap:*
 - Avanço- progradação
 - Recuo- retrogradação

Ao discutir os elementos das Sequências Depositionais do modelo, usaremos esses termos como referência de mudanças no *onlap* e *downlap*.

6.2.2 Elementos e nomenclaturas das sequências deposicionais

Sequência Depositional

As sequências deposicionais são subdivididas em diversos elementos, tanto superfícies como também conjuntos de estratos que refletem um mesmo padrão de deposição (tratos).

Limite de Sequências Depositionais (LS)

Para entender melhor a divisão entre os tratos, começaremos definindo o Limite de Sequências Depositionais e retomaremos seu conceito ao abordar as superfícies limitantes.

Trata-se de uma superfície que ocorre no **fim** da queda, quando o *onlap* volta a avançar gradualmente em direção à área fonte, ou seja, quando termina o episódio de queda e volta a ter a progradação. O LS encontra-se na **base** da Sequência Depositional à qual está associado.

Tratos de Sistemas

Os tratos são conjuntos de sistemas deposicionais contemporâneos, como por exemplo: continental, costeiro, marinho plataformar e marinho profundo ou leque submarino que se depositaram em um determinado intervalo de tempo. Possuem o mesmo padrão de empilhamento, como a progradação ou retrogradação. São marcados por mudanças na direção do avanço do *onlap* e do *downlap*.

Existem dois tratos de progradação na sequência deposicional: o Trato de Mar Baixo e o Trato de Mar Alto. A Sequência Depositional começa com uma progradação ao fim da queda, quando o nível do mar (de base) está mais baixo, de modo que a SD tem início com o Trato de Mar Baixo.

Entre os dois tratos progradação, existe um trato retrogradacional: o Trato Transgressivo. Esse trato tem início com o recuo do *downlap*, ou seja, quando ocorre retrogradação.

Após isso, tem início outra progradação. Como o nível do mar estava alto devido à transgressão, esse trato progradação recebe o nome de Trato de Mar Alto. Com o fim dele, tem início o Trato de Estágio de Queda, marcando o último trato da Sequência Depositional com a queda do *onlap*.

Já a superfície que marca o **início** da queda recebe o nome de Superfície Basal de Regressão Forçada e o trato que se forma entre ela e o LSD é o Trato de Estágio de Queda. Esse trato compreende desde o início até o fim da queda do *onlap*.

Assim, os tratos ocorrem na seguinte ordem em uma SD: Trato de Mar Baixo (TMB), Trato Transgressivo (TT), Trato de Mar Alto (TMA) e Trato de Estágio de Queda (TEQ).

Superfícies Limitantes

Limite de Sequência Depositional (LS): localizada no **fim** da queda, no topo do Trato de Estágio de Queda e na base do Trato de Mar Baixo. Delimita as Sequências Depositionais.

Superfície de Regressão Máxima (SRM) (ou Superfície Transgressiva): marca o **início** da retrogradação, está no topo do Trato de Mar Baixo e na base do Trato Transgressivo. Seu nome pode ser associado ao momento de máxima regressão marinha na SD, pois além de sofrer uma queda no nível de base, ocorreu uma progradação após a queda.

Superfície de Inundação Máxima (SIM): marca o fim da retrogradação e início da segunda progradação da Sequência Depositional. Está no topo do Trato Transgressivo e na base do Trato de Mar Alto. Como marca o momento da SD em que o nível do mar mais avançou em relação à linha de costa, pode-se associar esse evento ao nome da superfície, de máxima inundação.

Superfície Basal de Regressão Forçada (SBRF): marca o início da queda, podemos pensar que recebe esse nome porque está na base de uma regressão que ocorre muito rapidamente devido à queda do nível de base. Localiza-se na base do Trato de Queda.

As superfícies limitantes possuem significado cronológico, tudo que está abaixo delas é mais antigo do que o que está acima.

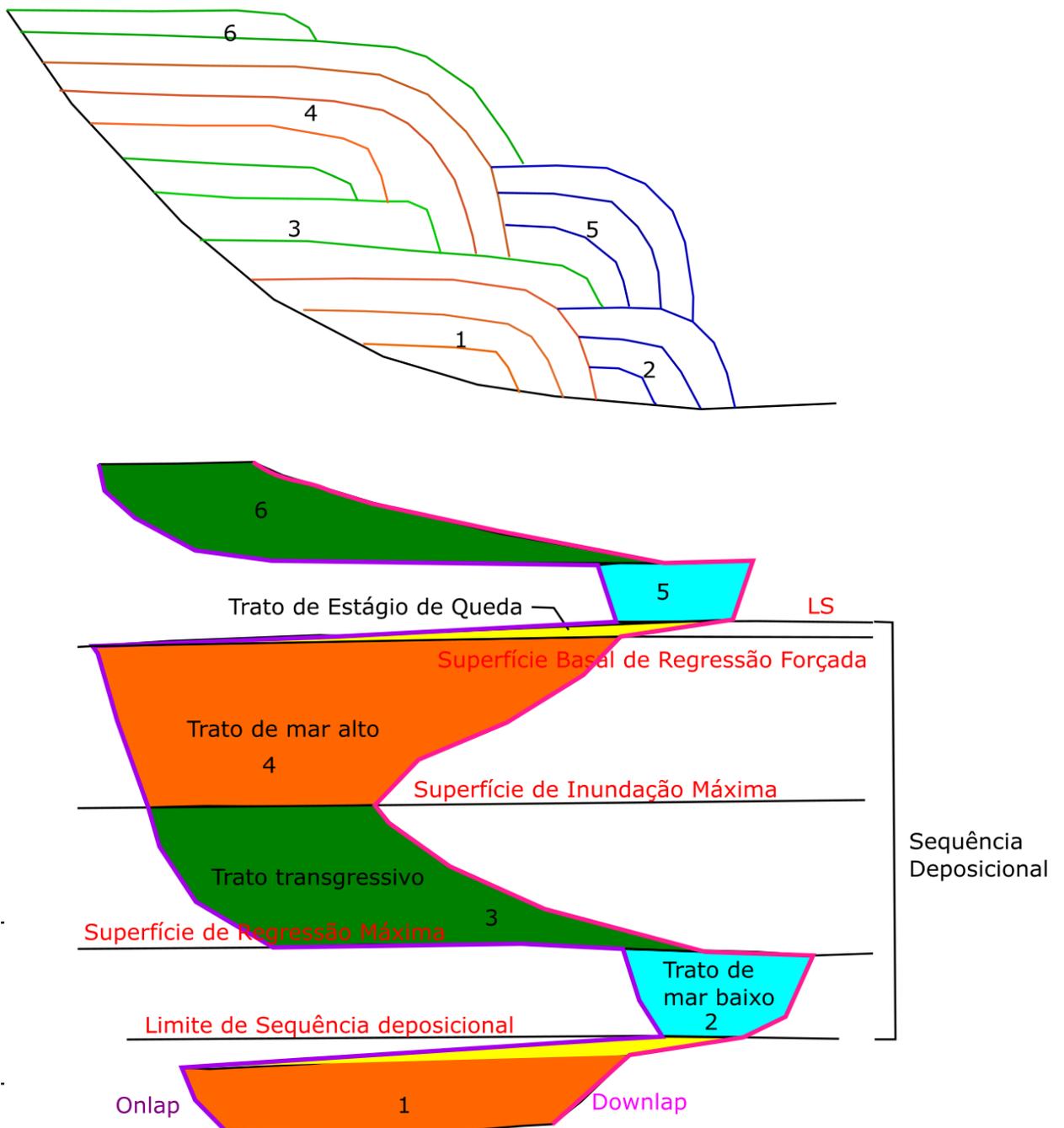


Figura 7: Representação da Sequência Depositional e dos seus elementos a partir das curvas de onlap (roxo) e downlap (rosa). Os números estão em ordem cronológica da deposição e as clinofomas estão associadas aos seus respectivos tratos pela numeração. O Trato de Estágio de Queda não está representado nas clinofomas, uma possível explicação para isso poderia ser a sua erosão devido ao rebaixamento rápido do nível de base.

Geometrias dos tratos

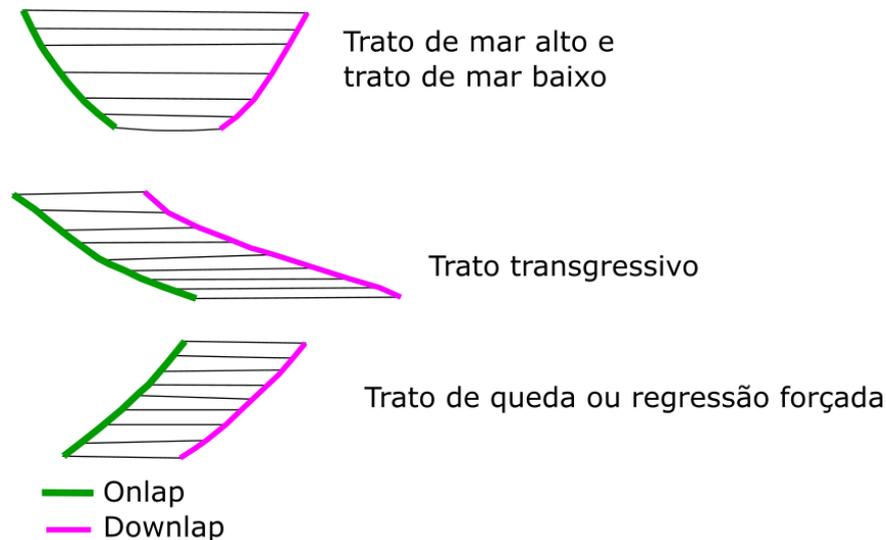


Figura 8: Geometrias dos diferentes tratos.

Erosão marinha

Em regiões que ocorre influência das ondas e marés no substrato, há o retrabalhamento do sedimento. Ocorre remoção seletiva dos sedimentos, na qual os grãos mais finos como argila, silte e areia fina são levados para porções mais profundas pela corrente, enquanto que a região entre a costa e o nível de base de onda, afetada pelos seus orbitais, forma um depósito residual com cascalho e areia grossa. Essa camada residual é marcada pelas Superfícies de Erosão Marinha. Existem dois tipos, que se formam pelo mesmo processo, porém estão associadas a tratos de caráter diferentes.

- Durante a retrogradação: Superfície transgressiva de ravinamento, presente no Trato Transgressivo, migra muito rapidamente em direção ao continente.
- Durante a progradação: Superfície regressiva de erosão marinha, presente no Trato de Mar Alto e no Trato de Mar Baixo.

Essas superfícies são diacrônicas, ou seja, atravessam as linhas de tempo, de modo que não é possível utilizá-la para afirmar se uma camada é mais antiga que a outra utilizando-a como parâmetro.

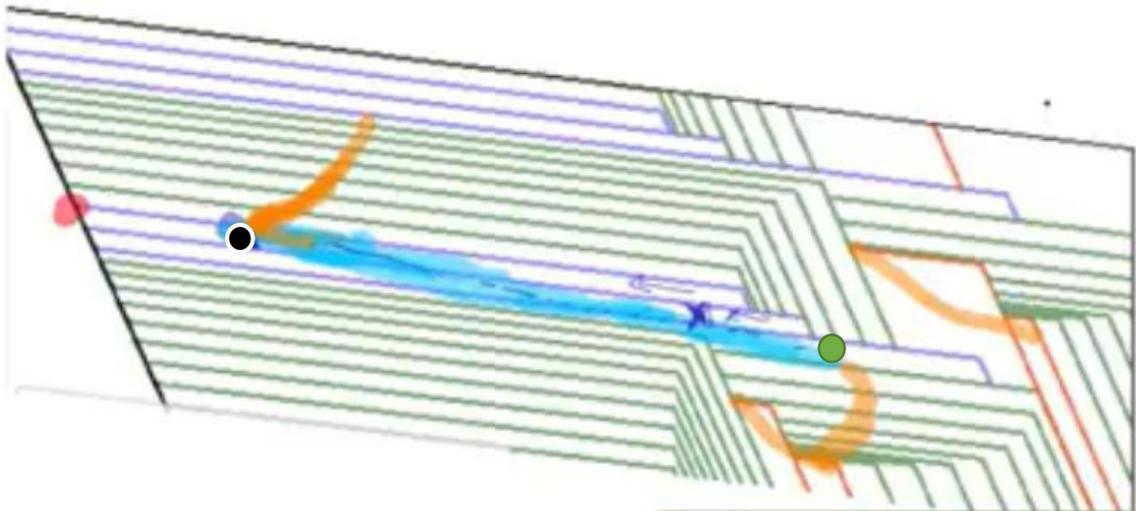


Figura 9: Superfícies de erosão marinha. Em azul, temos a superfície transgressiva de ravinamento. Em laranja, temos a superfície regressiva de erosão marinha, tanto no trato de mar baixo (lado direito), como no trato de mar alto (lado esquerdo). O ponto verde está acima da camada residual, porém sua deposição ocorreu antes do ponto preto, que está abaixo da camada residual, o que mostra que esse limite não é sincrônico, mas sim atravessa as linhas de tempo.

6.3 Videoaulas

Estratigrafia - Estratigrafia de Sequências 1 - conceitos iniciais

<https://www.youtube.com/watch?v=7OE4EdrZl-Y&list=PLvPIYIEGKfUFUZEyfCyjJEe7j2O8GZDoF>

Estratigrafia - Estratigrafia de Sequências 2 - Modelo 2D

<https://www.youtube.com/watch?v=6at3wQgBPaw&list=PLvPIYIEGKfUFUZEyfCyjJEe7j2O8GZDoF&index=2>

Estratigrafia - Estratigrafia de Sequências 3 - Cartas Crono-estratigráficas

<https://www.youtube.com/watch?v=CcEnUPsLnml>

Estratigrafia - Estratigrafia de Sequências 4 - Tratos de Sistemas e Superfícies

<https://www.youtube.com/watch?v=j00g1UX-KB0&list=PLvPIYIEGKfUFUZEyfCyjJEe7j2O8GZDoF&index=4>

Estratigrafia - Estratigrafia de Sequências 5 - Subsidência e Aporte

<https://www.youtube.com/watch?v=7y9RCWdpa5A&list=PLvPIYIEGKfUFUZEyfCyjJEe7j2O8GZDoF&index=5>

Estratigrafia - Estratigrafia de Sequências 6 - Eustasia

<https://www.youtube.com/watch?v=WHKT9-MK-rM&list=PLvPIYIEGKfUFUZEyfCyjJEe7j2O8GZDoF&index=6>

Estratigrafia - Estratigrafia de Sequências 7 - Superfícies (critérios)

<https://www.youtube.com/watch?v=kmPENlgxPdM&list=PLvPIYIEGKfUFUZEyfCyjJEe7j2O8GZDoF&index=7>

6.4 Referências

Catuneanu, O. (2006). *Principles of Sequence Stratigraphy*. Elsevier, Canadá: Edmonton.