

# Modelagem Estática 3D de Reservatórios de Petróleo

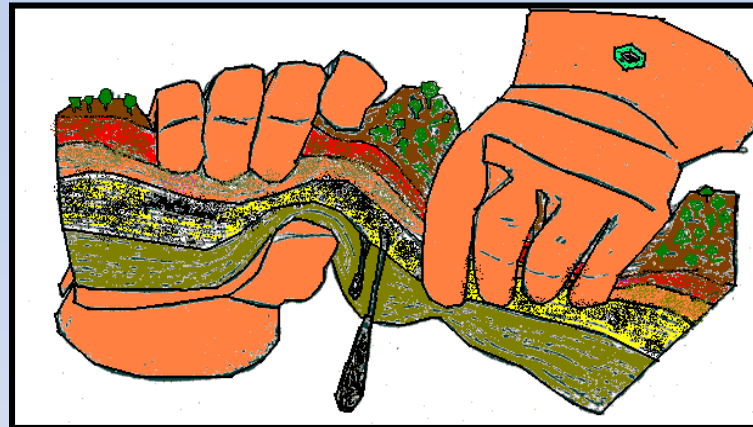


Carlos Henrique **Tozzi** de Oliveira  
Petrobras - UO-BS/ATP-C/RES

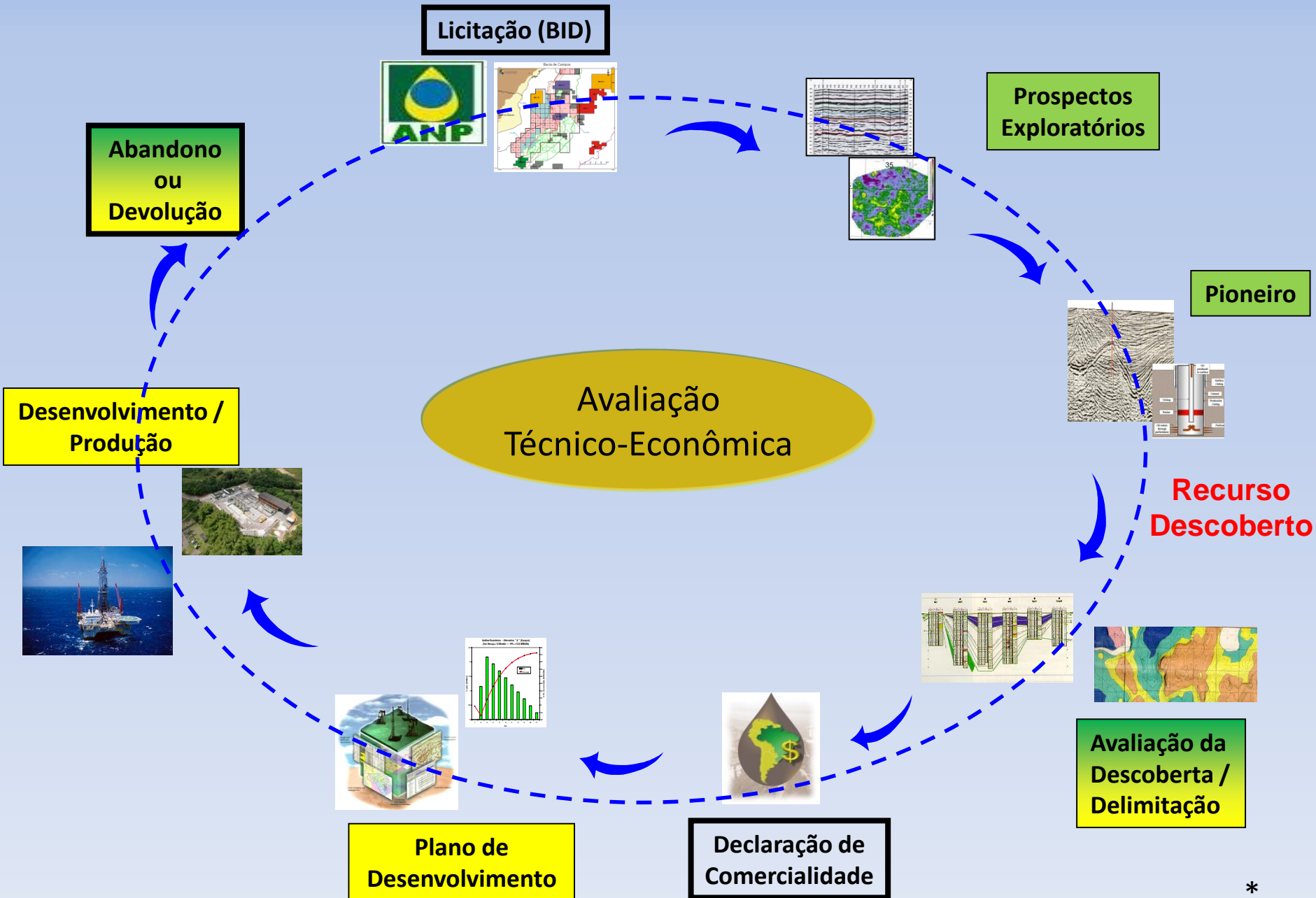
22/11/2016

- Visão Geral: Processos E&P e Reservatórios
- Modelagem Geológica Integrada:
  - Modelo Estrutural
  - Modelo Estratigráfico
  - Modelo Litológico
  - Modelo de Propriedades Heterogeneidades
- Considerações Finais

# Visão Geral

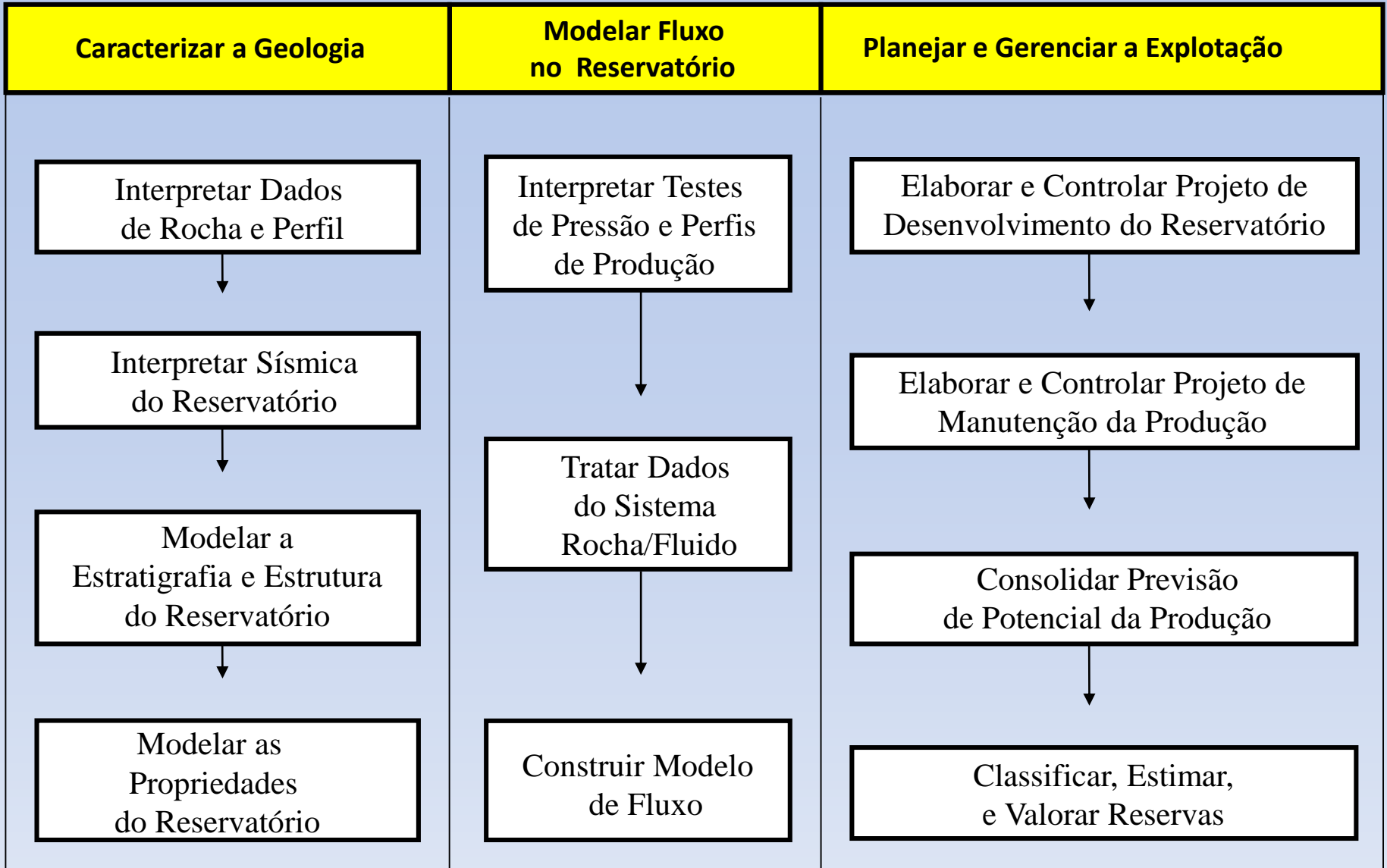


# Processo E&P

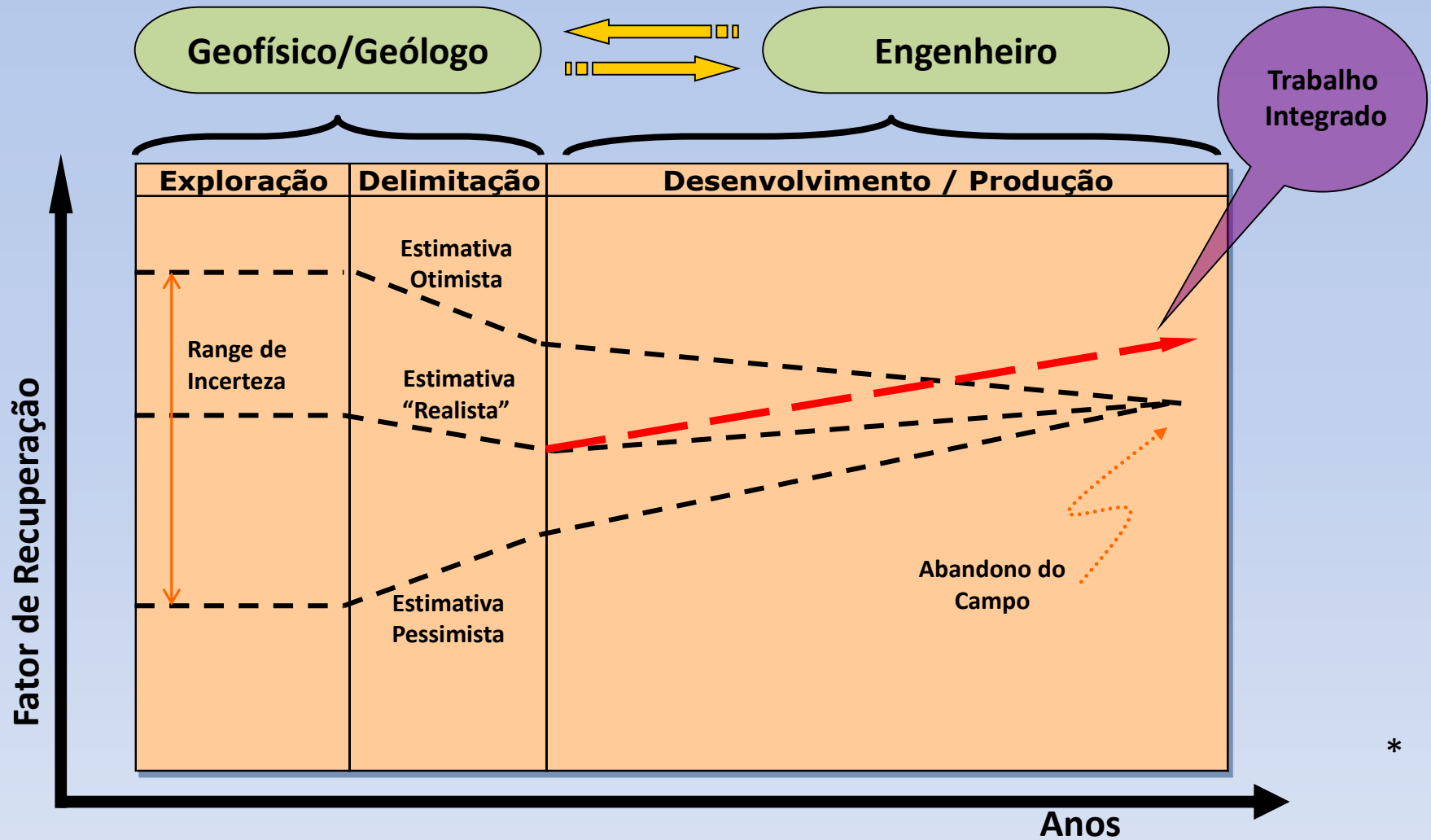




# Processos de Reservatórios



# Atividade Integrada de Reservatórios



**Equipe de Reservatórios:** objetivo de definir a estratégia de exploração, prever os volumes de fluidos a serem produzidos e gerenciar o reservatório de forma a otimizar a recuperação do petróleo até o abandono definitivo da jazida.

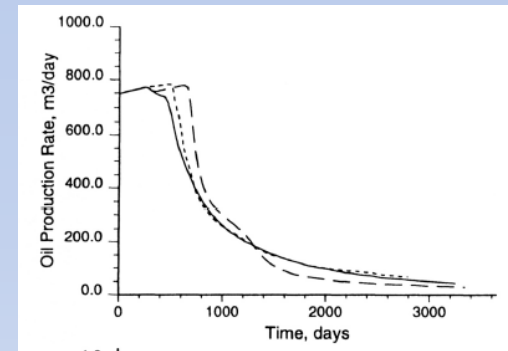
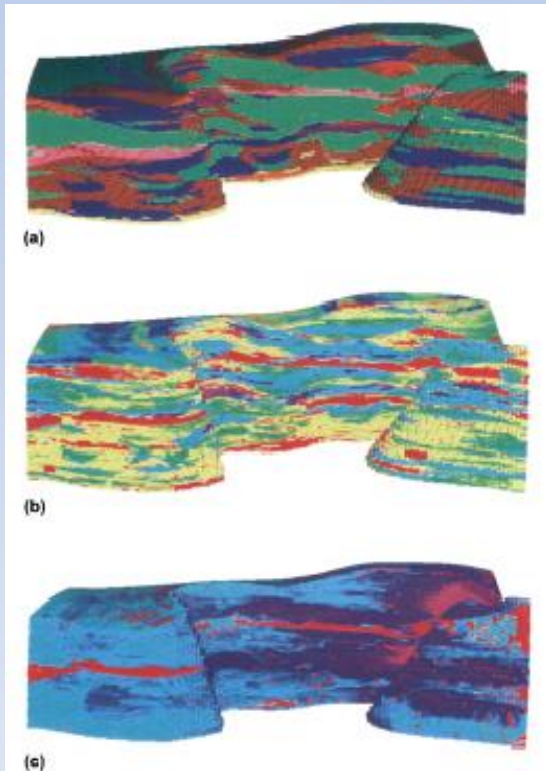
# Modelagem Geológica Integrada de Reservatórios



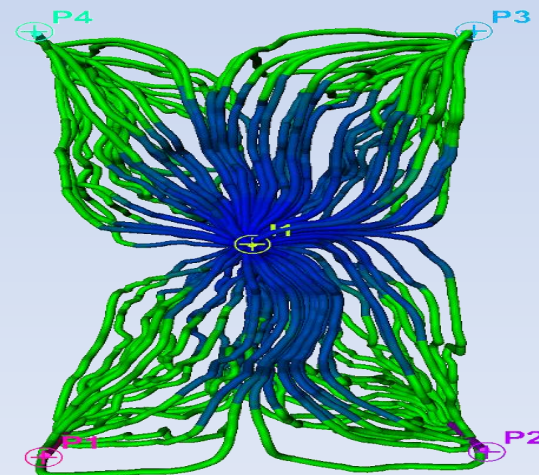
# Modelagem 3D de Reservatórios

Objetivo teórico: descrever de forma aproximada a distribuição espacial das propriedades físicas que governam o escoamento de fluidos no reservatório

Objetivo prático: *predição e desenvolvimento da produção*

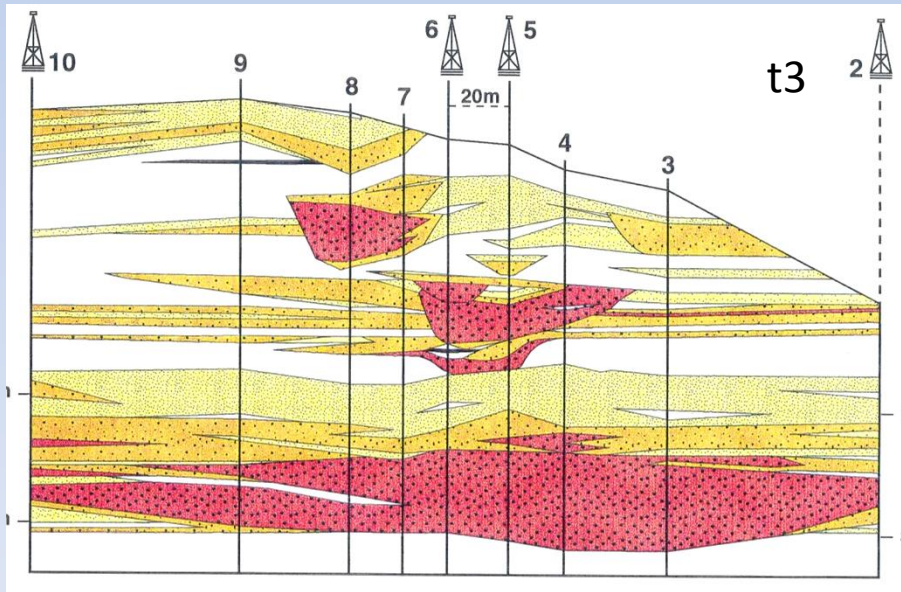
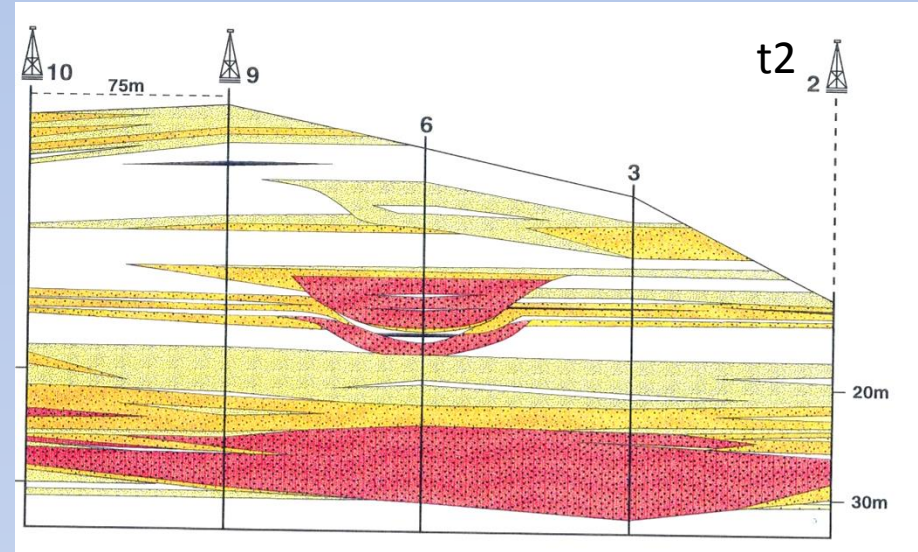
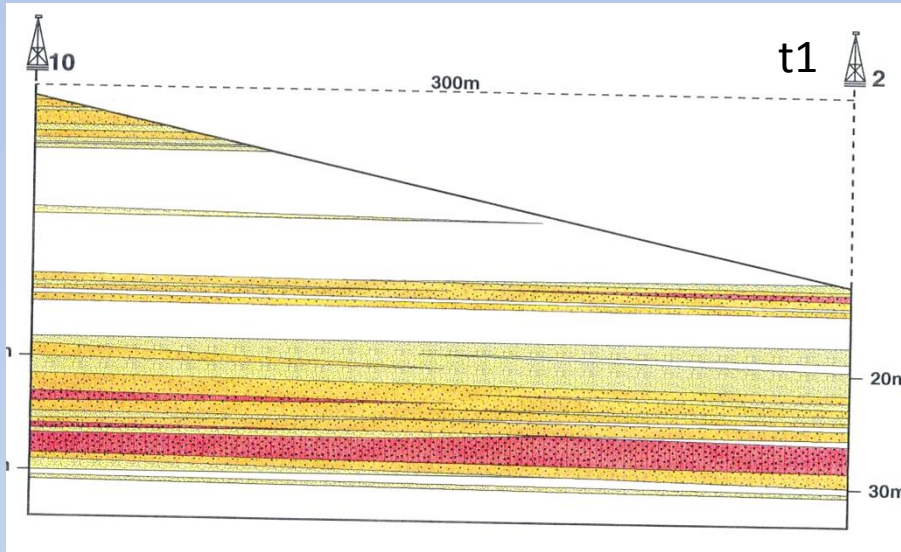


INCERTEZAS





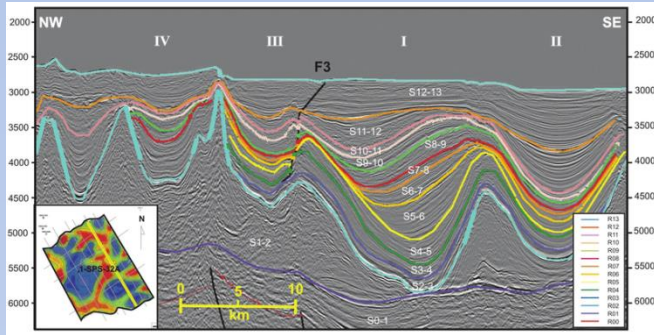
# Modelagem 3D de Reservatórios



- início: poucas informações  
muitas incertezas
- desenvolvimento:  
cada vez mais informações  
menos incertezas (?)

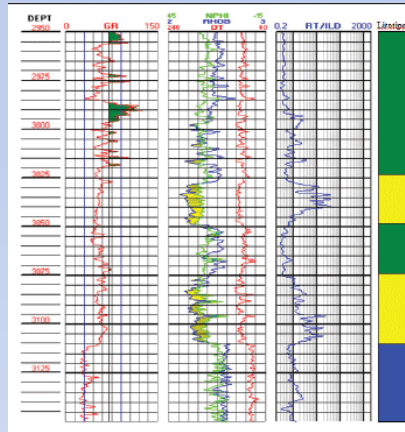
- NÍVEL DE COMPLEXIDADE

# Modelagem 3D de Reservatórios



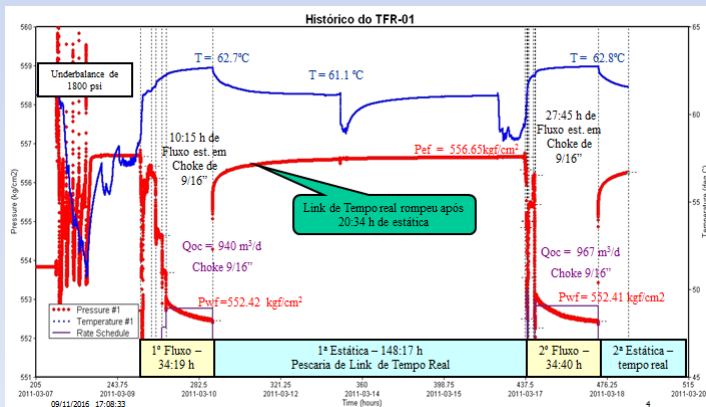
**GEOFÍSICA:** informação indireta (Sísmica)

- interpretação de horizontes, atributos, falhas



**GEOLOGIA:** informação direta (Poço)

- caracterização das propriedades estáticas e cubagem da jazida



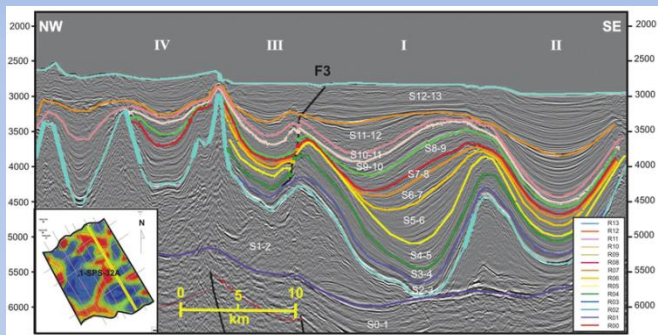
**ENGENHARIA:** informação direta (Fluidos)

- caracterização das propriedades dinâmicas (histórico, simulação) e gerenciamento

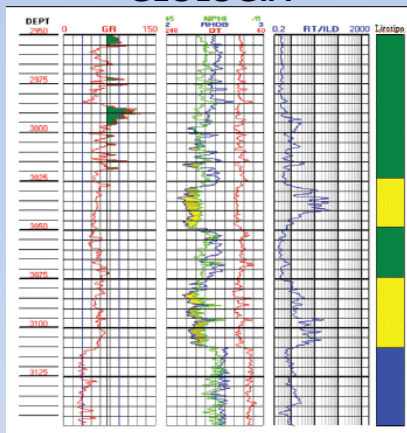


# Modelagem 3D de Reservatórios

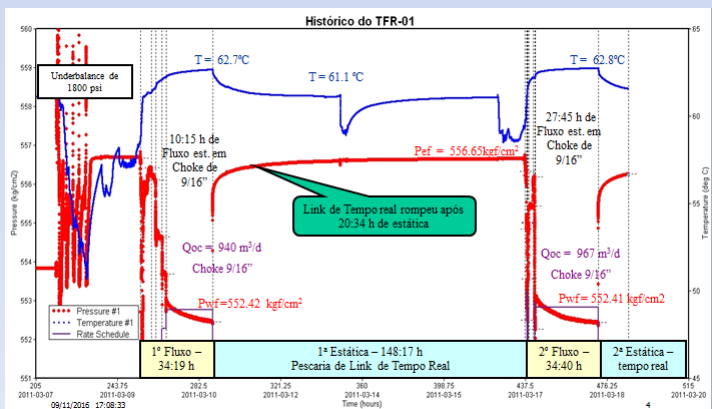
## GEOFÍSICA



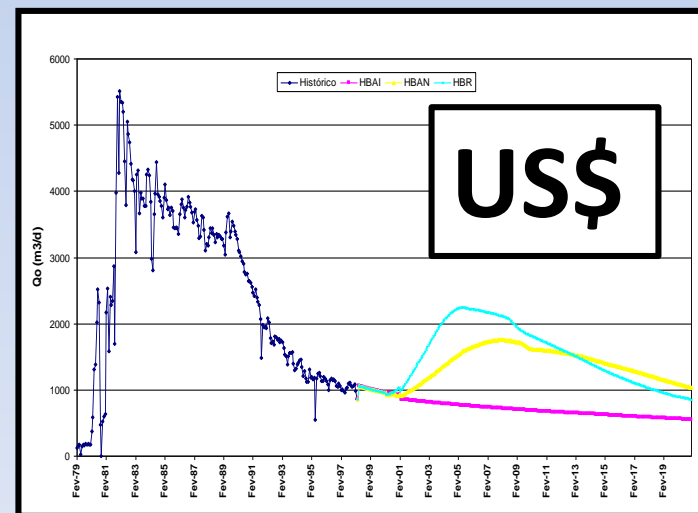
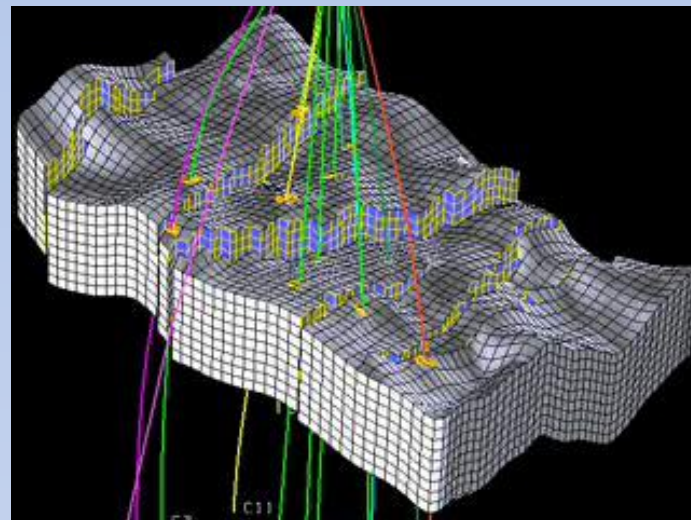
## GEOLOGIA



## ENGENHARIA



## RESERVATÓRIO



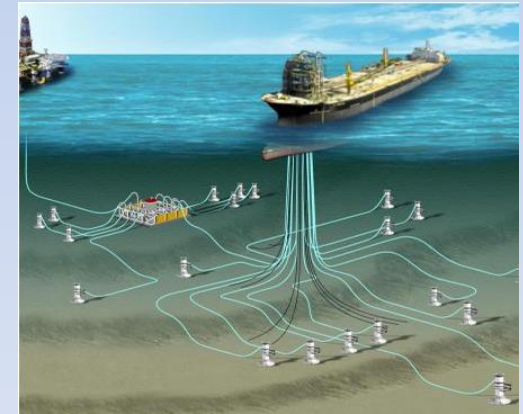
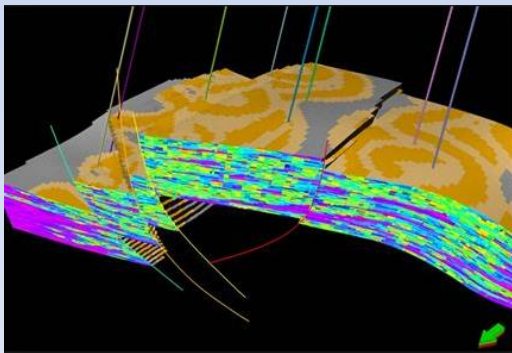
## PREVISÃO DE PRODUÇÃO

# Modelo Geológico Integrado

\* **Controle a posteriori:** *input* apenas de dados estáticos (sísmica, perfis, testemunhos, ...) enquanto as informações dinâmicas são usadas para checar a consistência do modelo.

\* **Controle a priori:** dados dinâmicos (P, fluidos, informações de testes, PLT, ...) devem ser melhor usados já como dados de entrada → modelo geológico realmente integrado.

A INTEGRAÇÃO é a melhor aproximação para uma caracterização robusta do reservatório, assim tal modelo terá maior chance não só de ser capaz de reproduzir a performance observada do campo mas principalmente **prever o comportamento futuro do campo.**



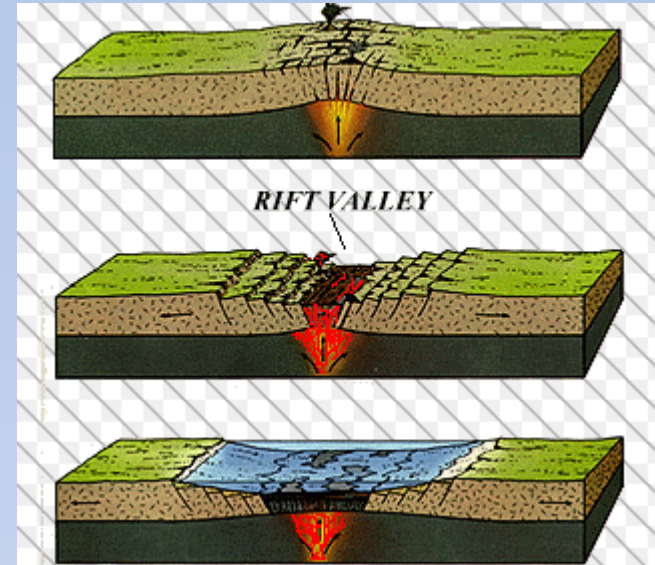
\* *Integrated Reservoir Studies.* Cosentino, L. 2001, Editions Technip, Paris, 310 p.



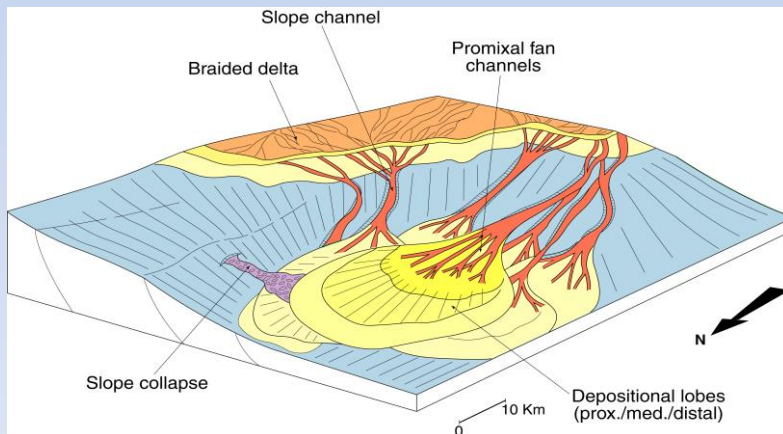
# Modelo Geológico



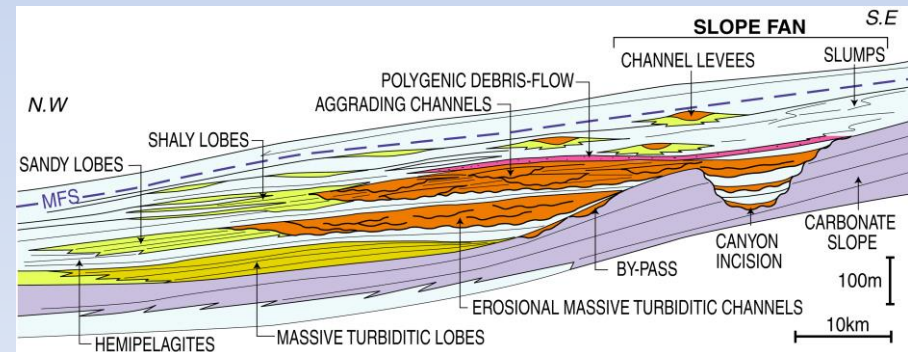
4) heterogeneidades



1) modelo estructural



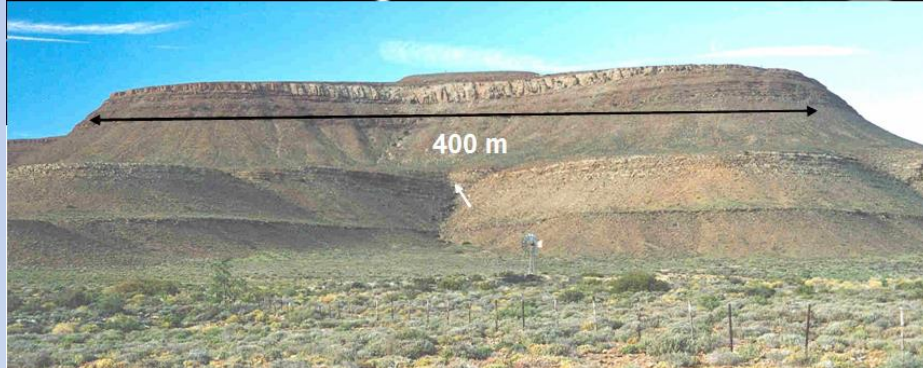
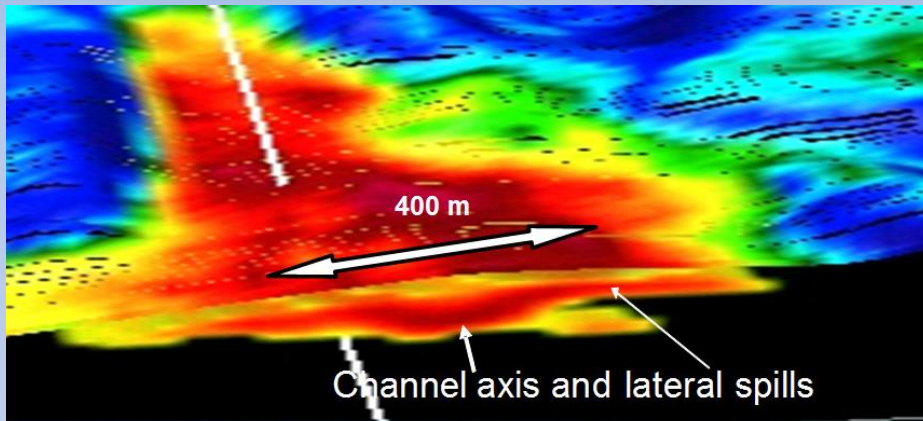
3) modelo litológico



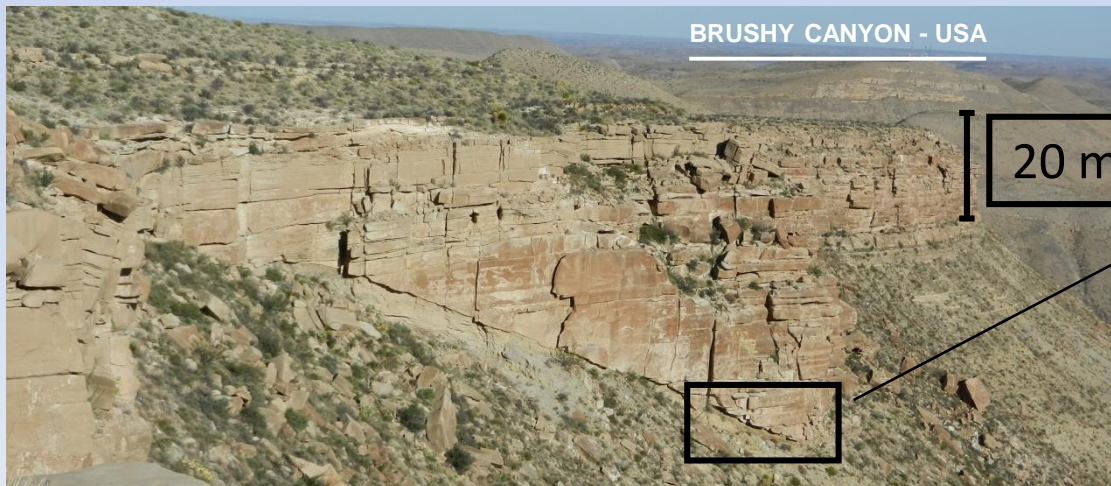
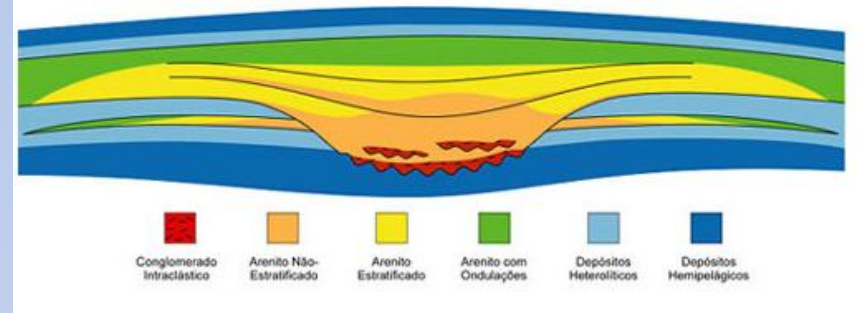
2) modelo estratigráfico



# Modelo Conceitual - Análogos



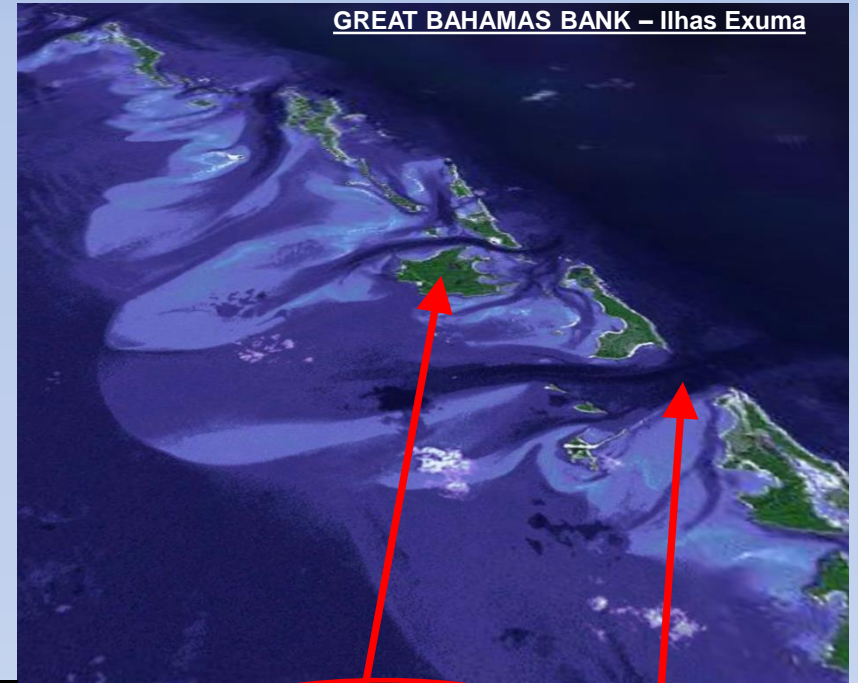
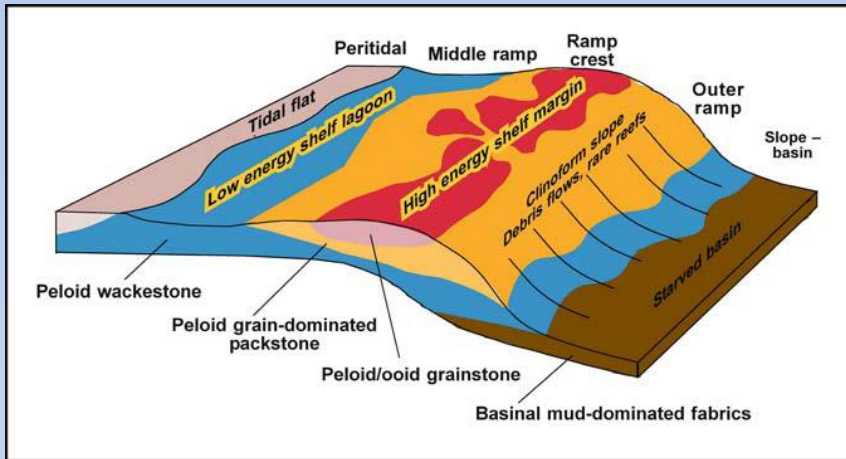
Modelo conceitual de geometria e fácies de canal deposicional. A figura representa aproximadamente 600 metros de largura por 10 metros de espessura.





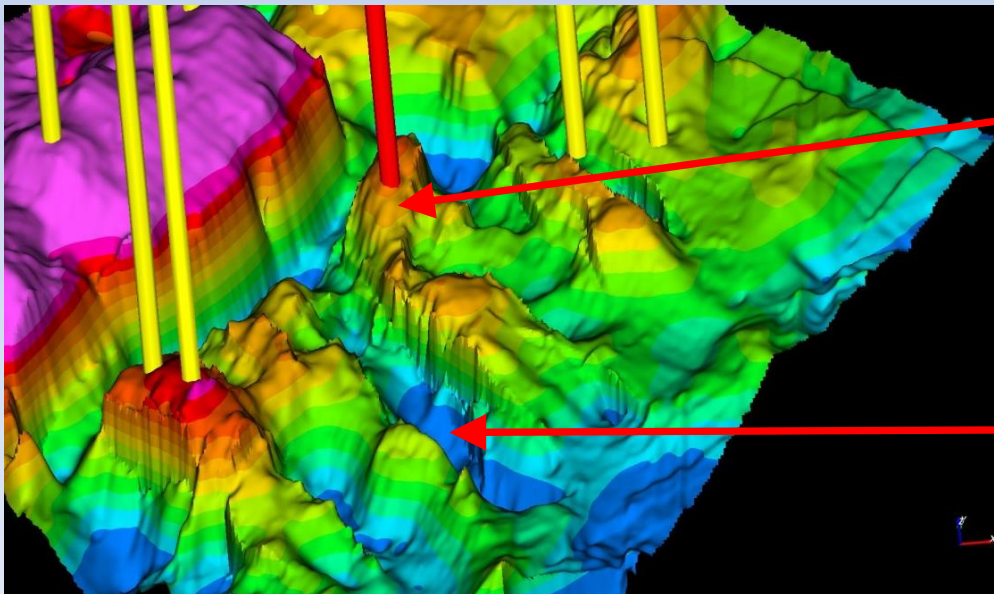
# Modelo Conceitual - Análogos

Análogo recente aos calcarenitos do Albiano



Formação de bancos predominantemente oolíticos

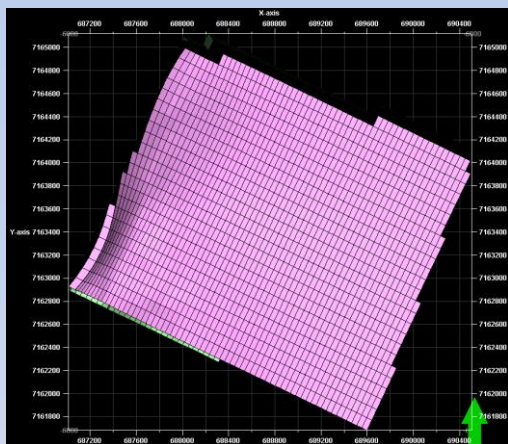
Na região interbancos, plataforma externa, quebra de plataforma e talude, predominam *packstone* e *wackestone*



# Modelagem Estática

Escala fina, procura representar todas as características estratigráficas e sedimentológicas do objeto geológico em estudo.

X/Y: 50 x 100



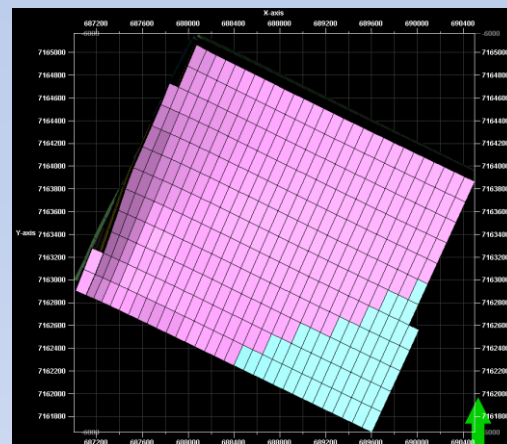
x

# Modelagem Dinâmica

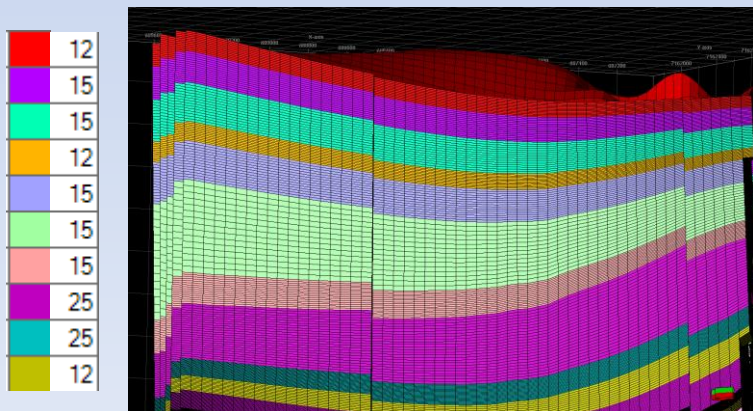
Escala apropriada para estudos de escoamento de **fluidos**.

- horizontal: normalmente 2 a 4 vezes maior que a malha do modelo geológico.
- vertical: maior que a horizontal, até dezenas de vezes maior.

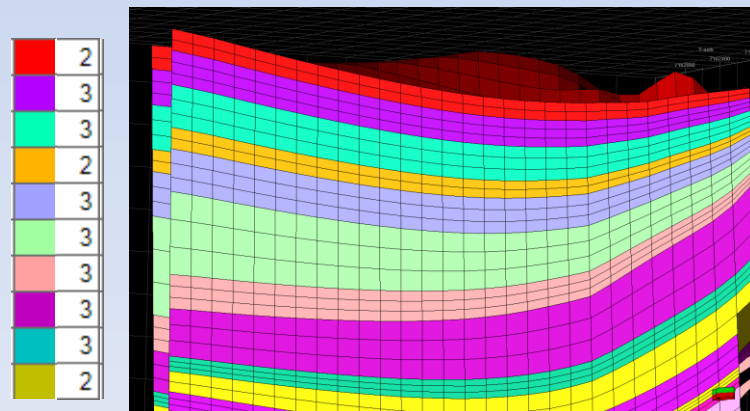
X/Y: 100 x 200



Z



Z





# Modelagem Geológica Integrada de Reservatórios

- Modelo Estrutural

# Modelo Estrutural

→ GEOMETRIA

definir

(t)

modelagem

potencial

outras inf

- características
- dados de projeto
- dados de projeto

(INTEGRAÇÃO)



TÓRIO

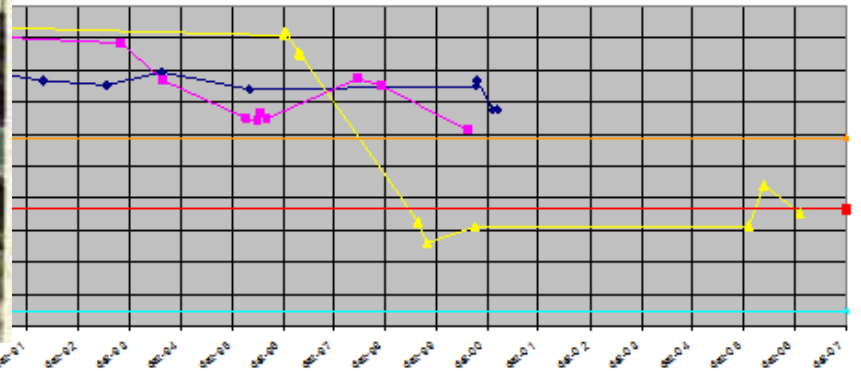
limites

)



ar e representar feições que podem  
o no fluxo de fluidos

imentação estrutural não vem da

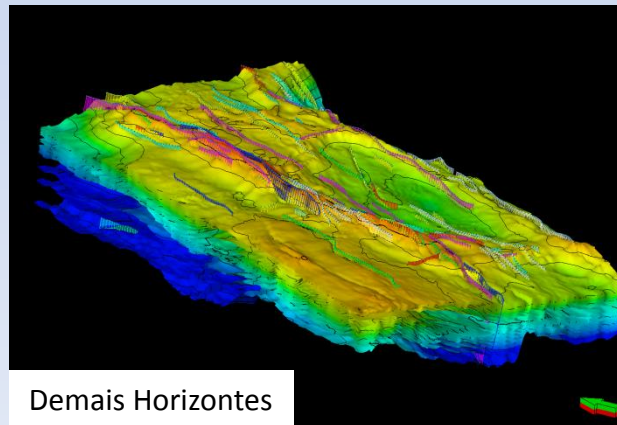
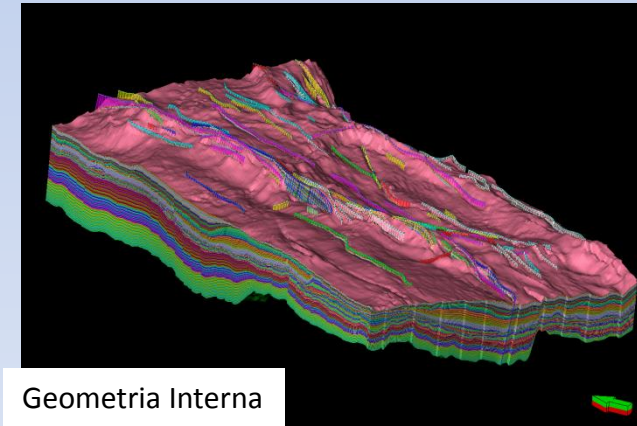
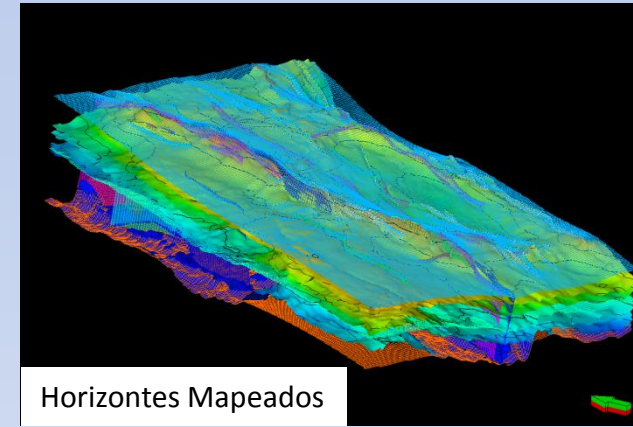
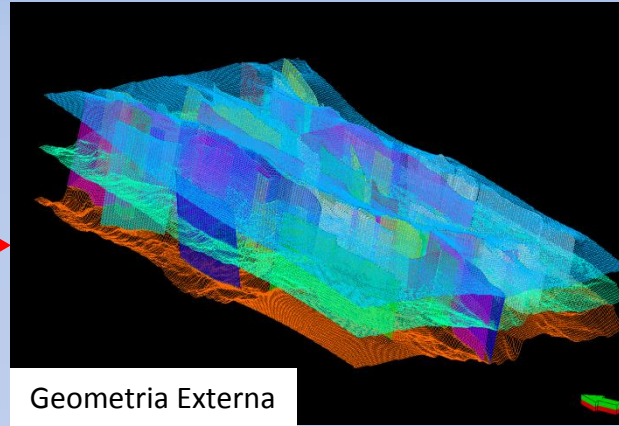
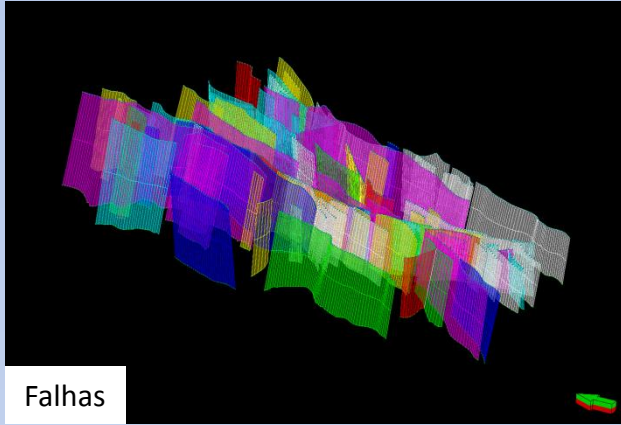


Bloco 1

Bloco 2

Bloco 3

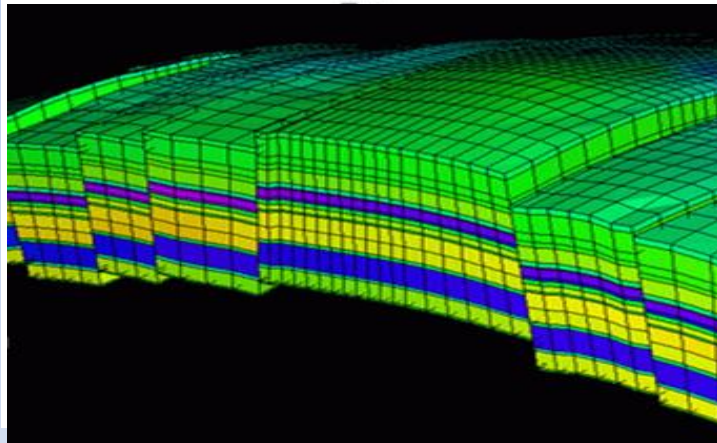
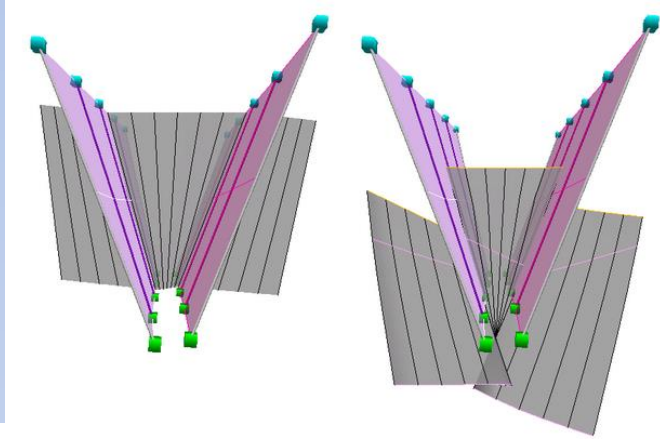
# Construção do *Grid*



# Construção do *Grid*

## Corner Point

- limitado para estruturas complexas

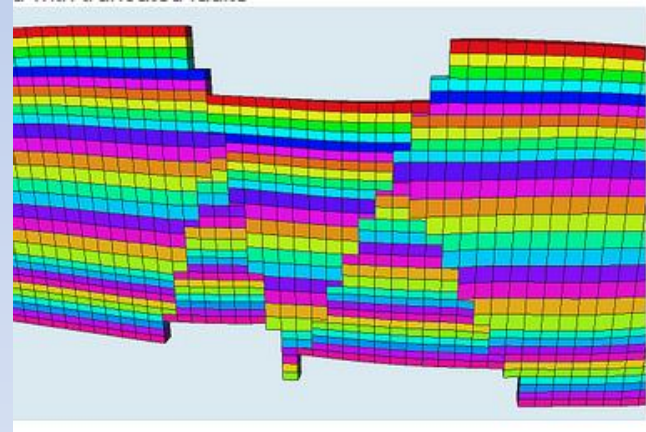
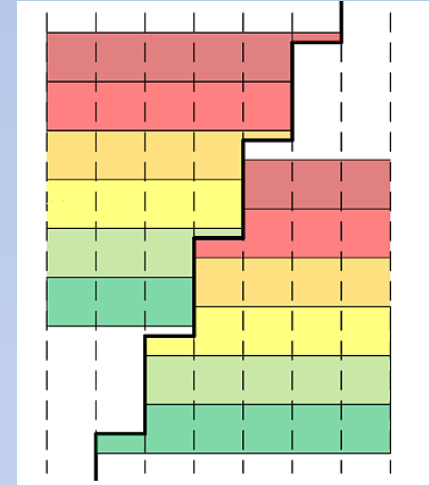


### PILARES DE FALHA

- paralelos as falhas e devem conectar topo e base  
→ **distorções** (não ortogonalidade e variação de tamanho podem afetar geoestatística e simulação)

## Stair Step

- modela estruturas complexas (Reversas, X, Y, ...)



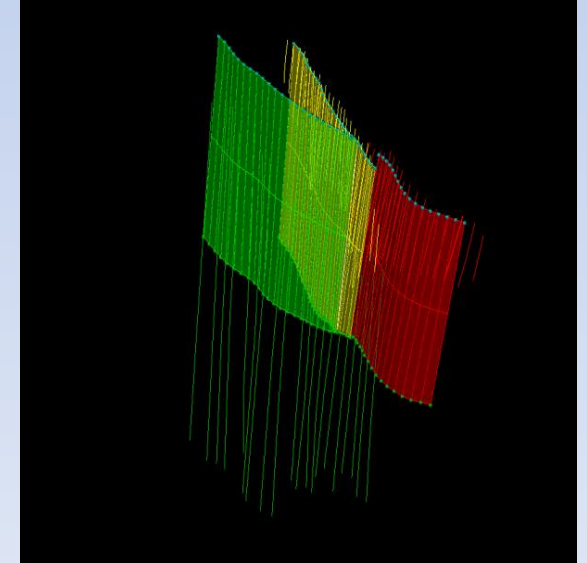
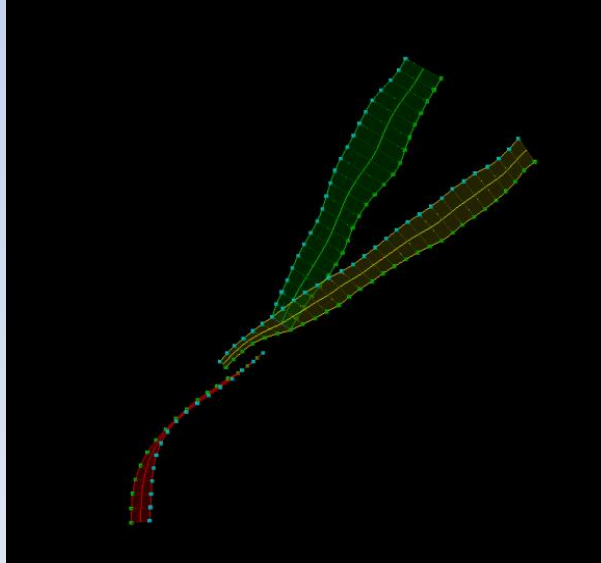
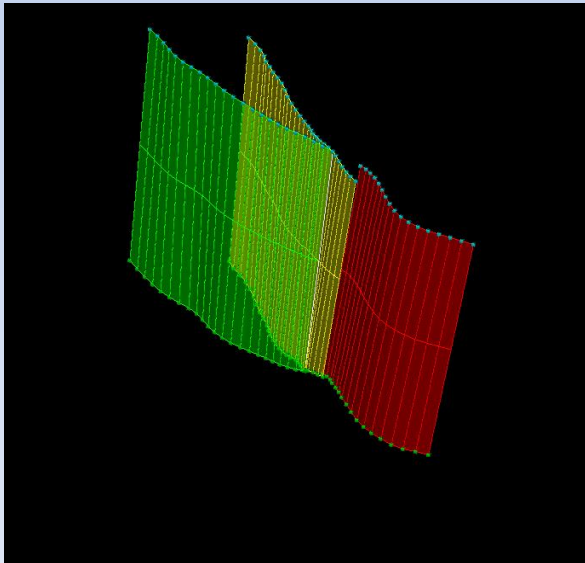
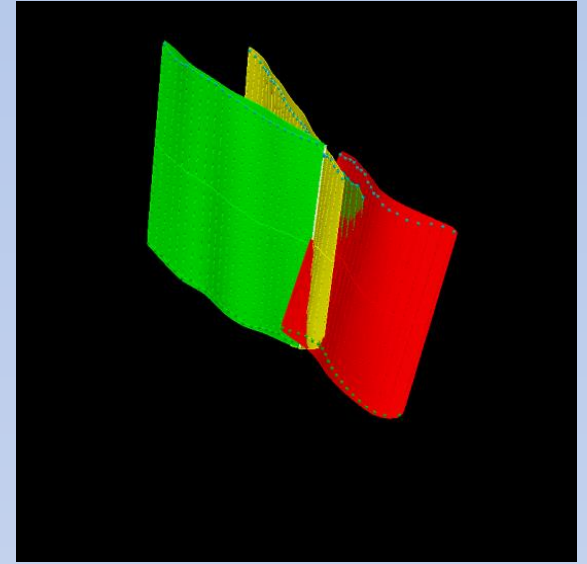
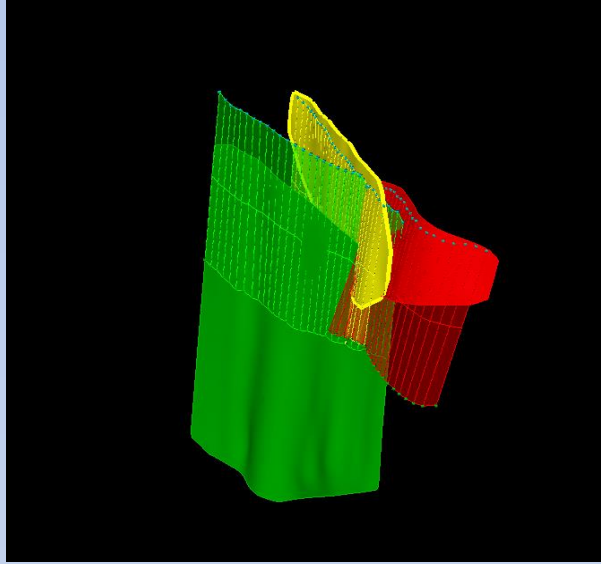
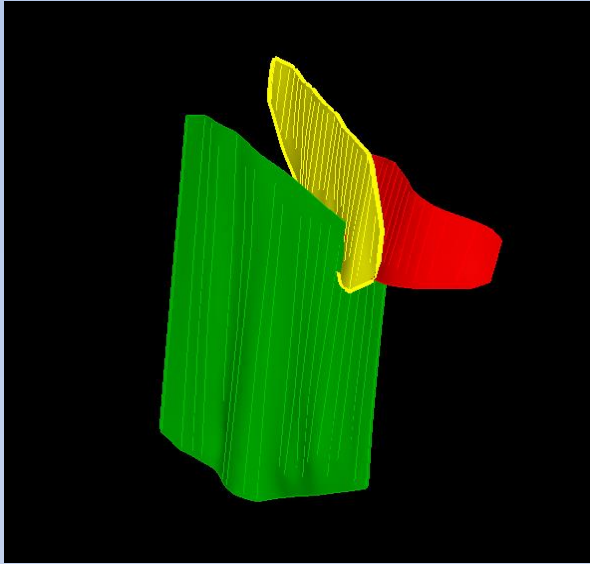
### VERTICAL STAIR STEP FAULTS

- células sem distorções e ortogonais  
→ **ideal para simulação**

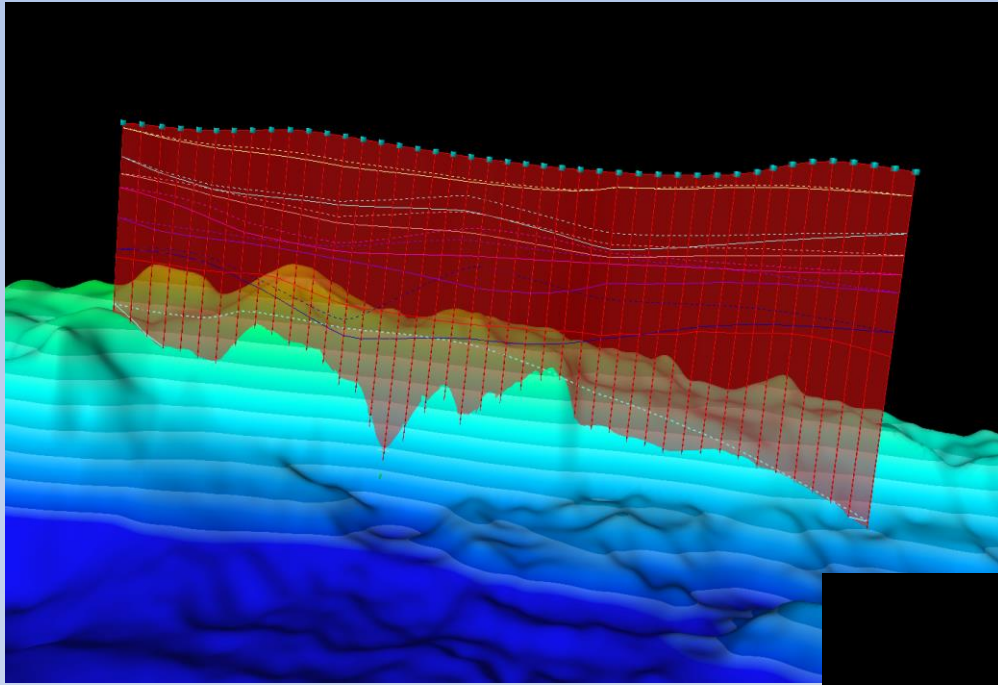
Em comum: *Grids* fino e grosso modelados com mesmo método



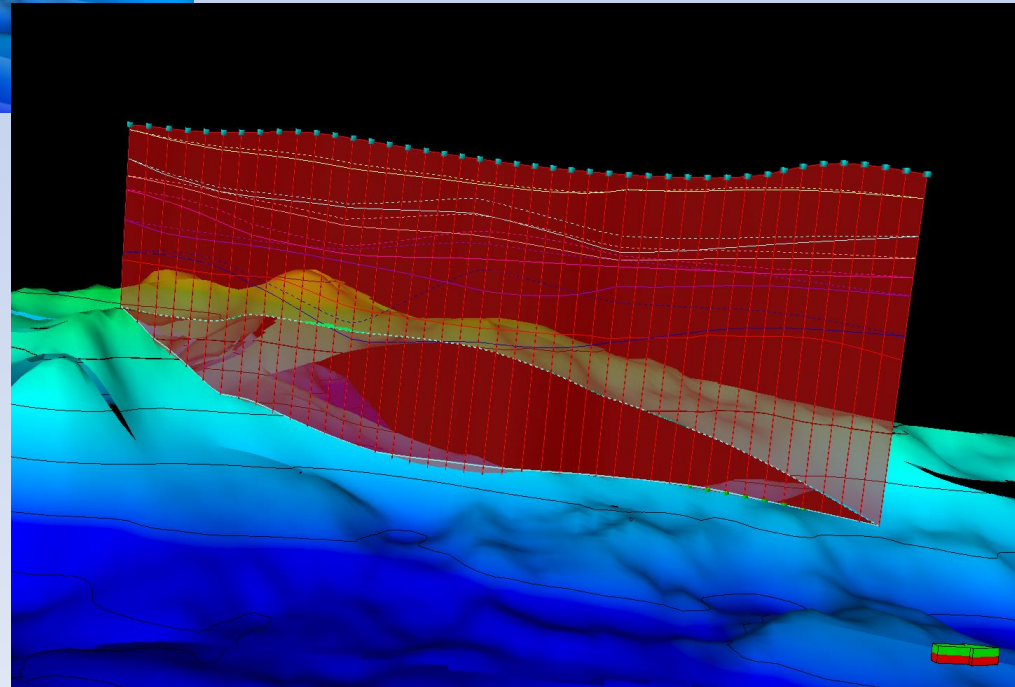
# Modelagem das Falhas



# Modelagem das Falhas

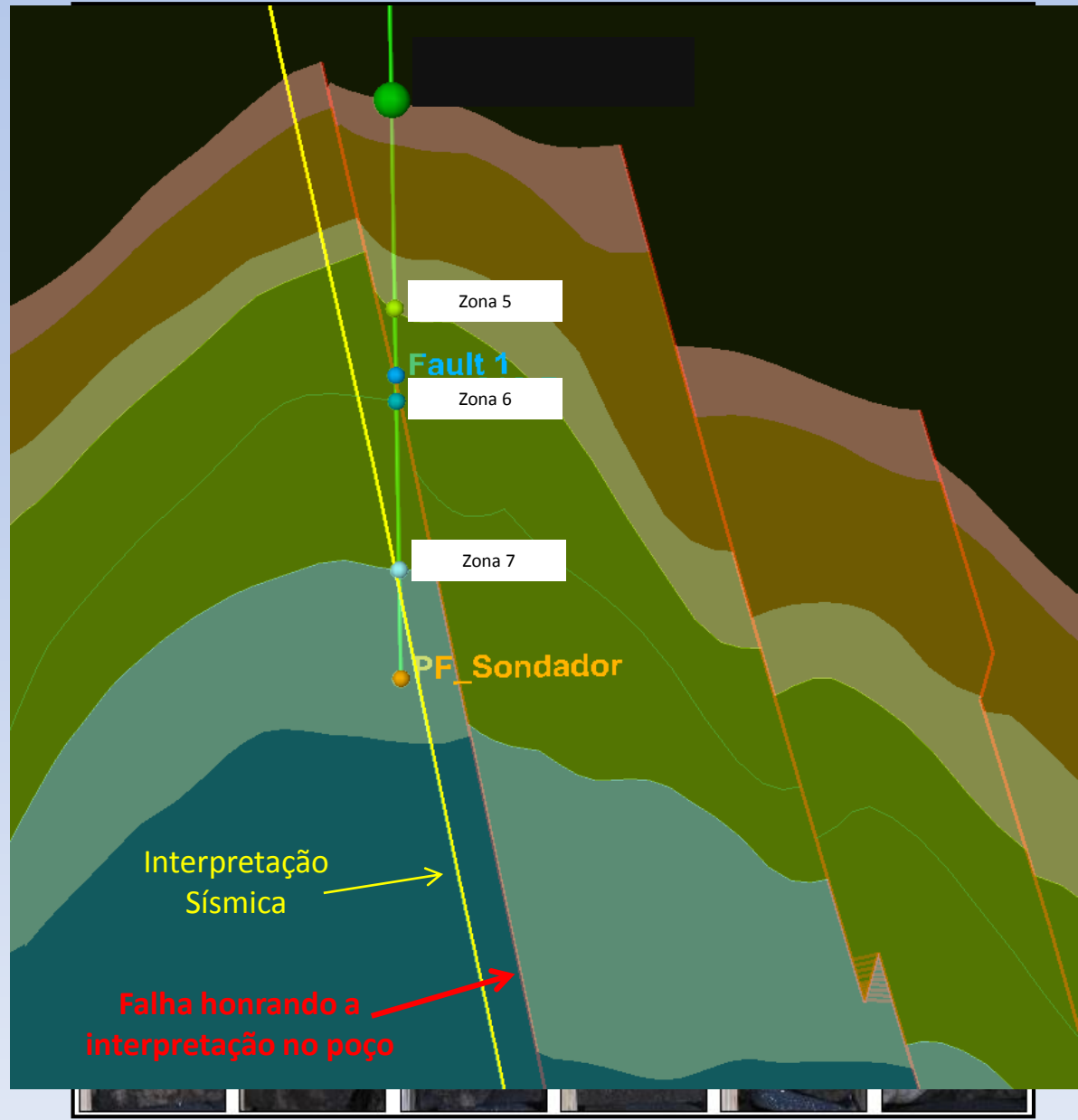
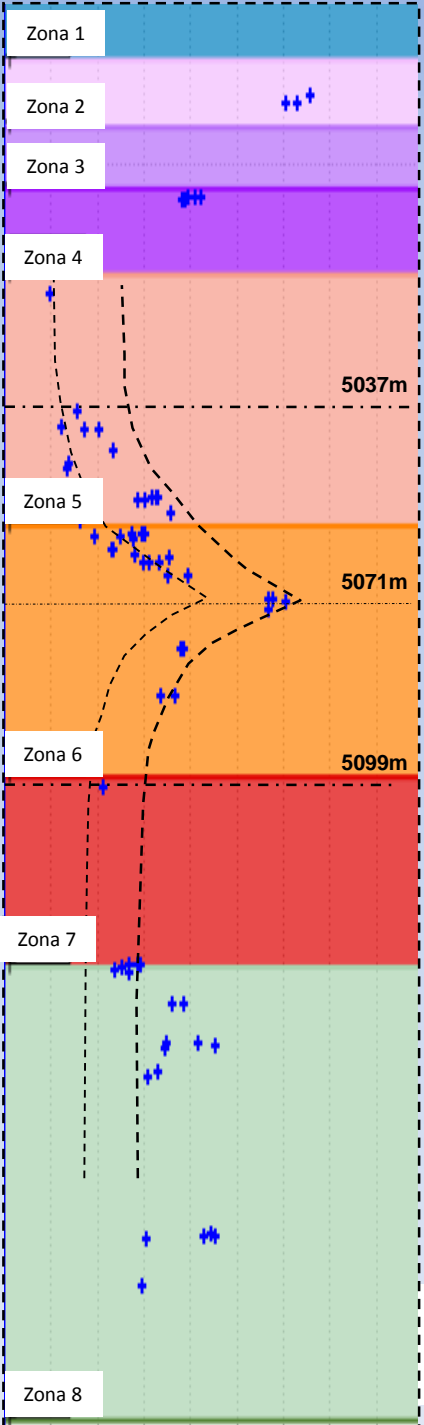


- Ajuste dos rejeitos



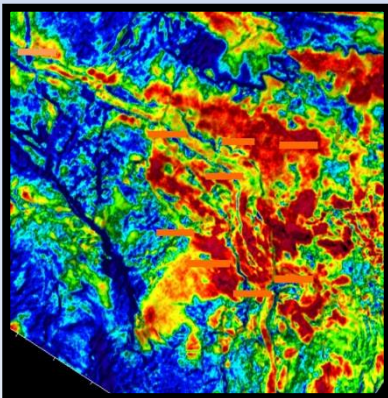
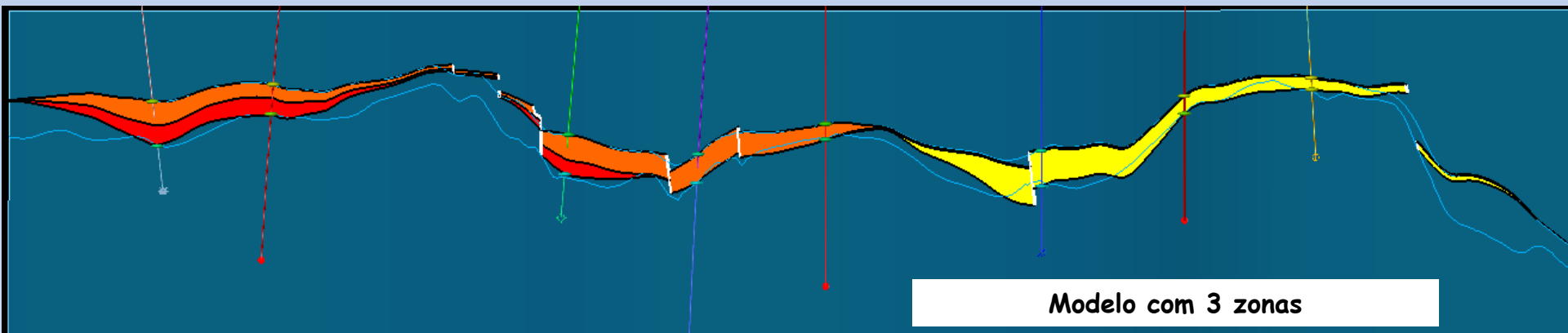
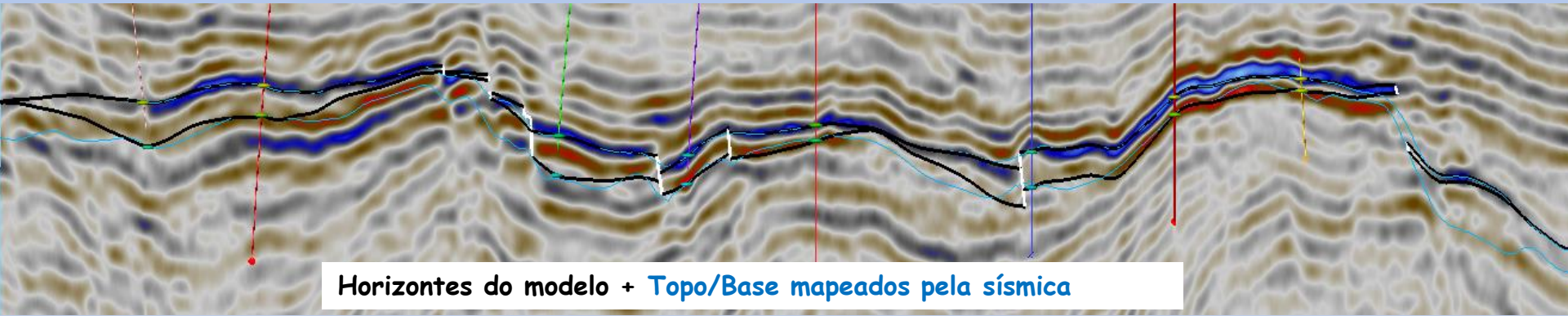


# Modelagem das Falhas



\*

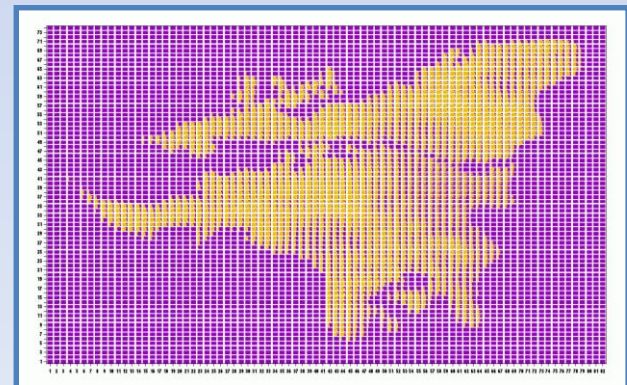
# Modelo Estrutural



Sísmica

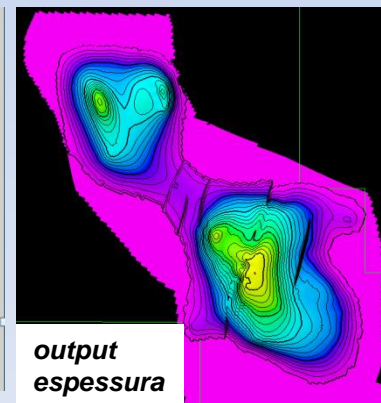
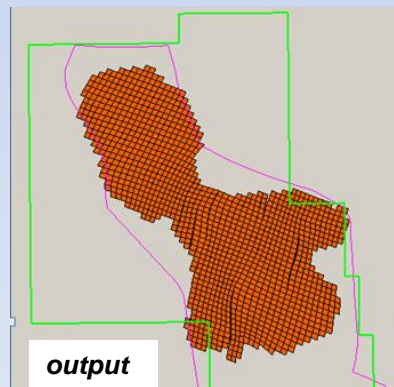
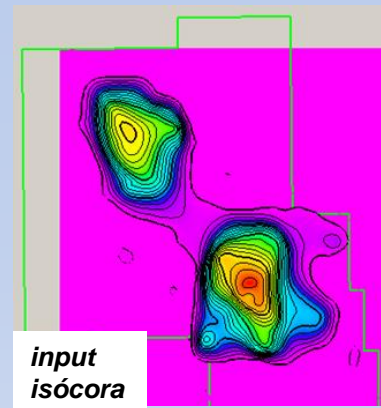
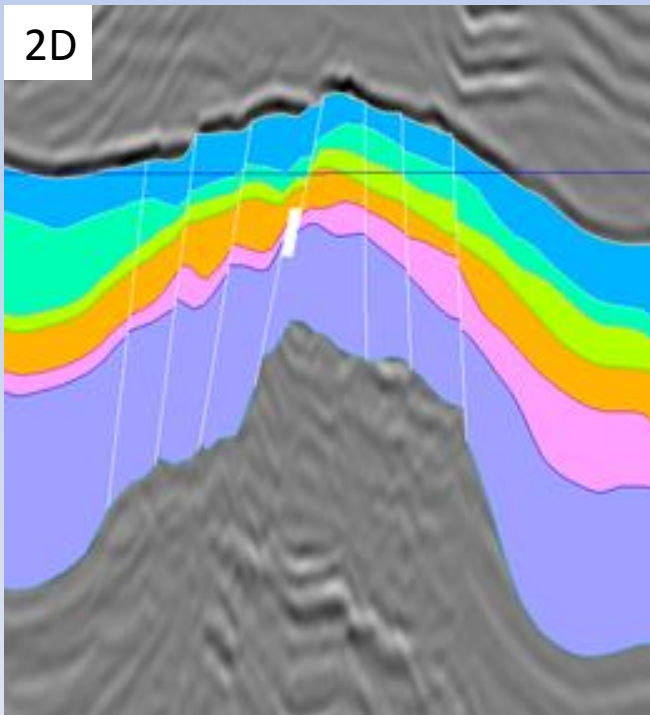
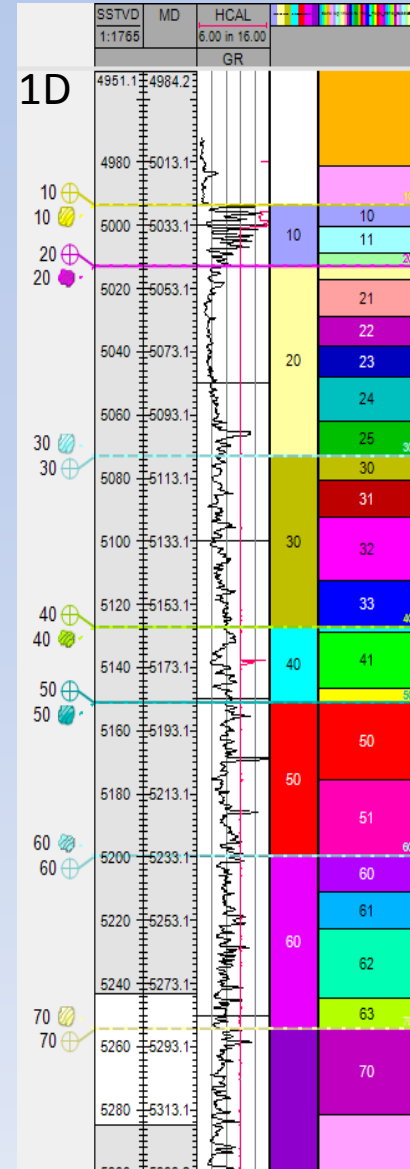


limites do  
reservatório



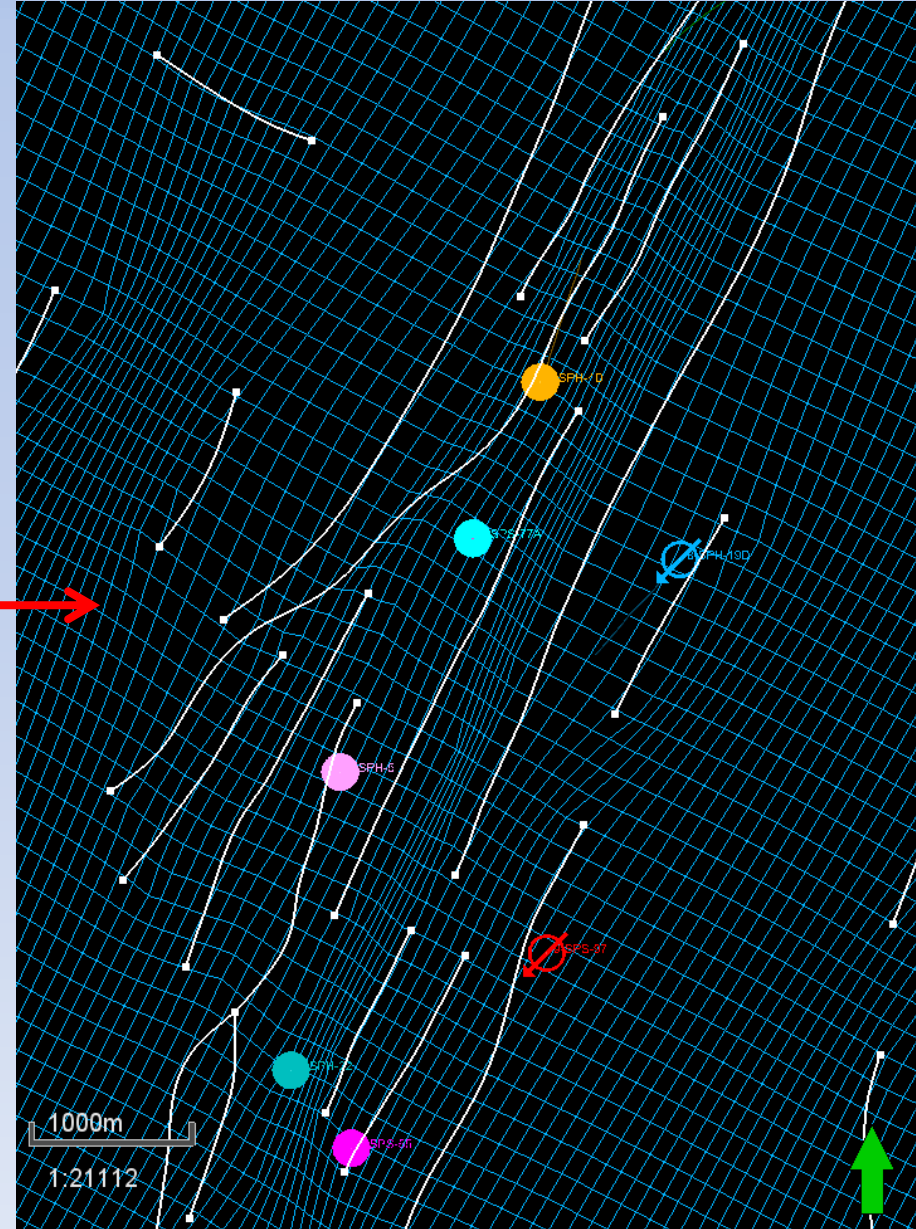
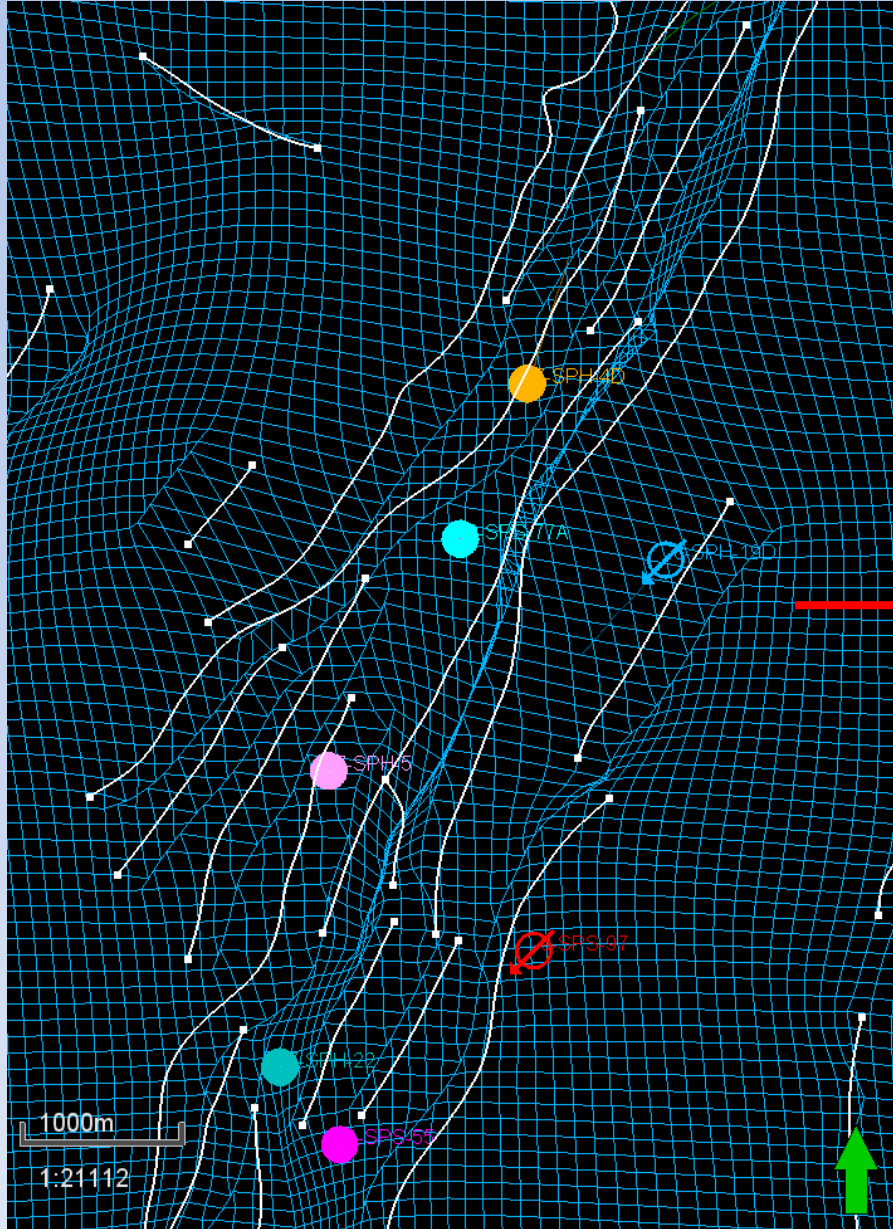
# QC - Modelo Estrutural

- Poços: - topos de marcadores coincidem com horizontes modelados  
- horizontais: estão na zona correta
- Rejeitos de falhas
- Propriedades: altura, ângulos, volume das células
- Mapas de espessura entre horizontes
- Comparar *inputs/outputs*

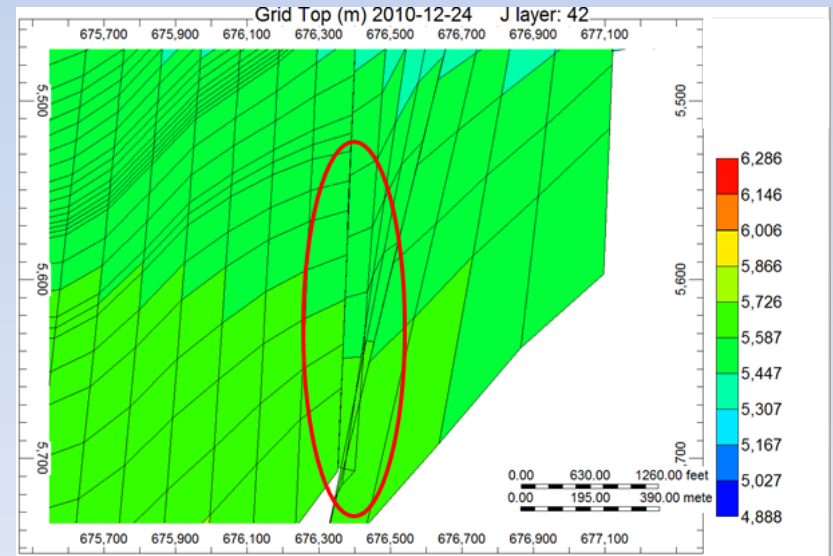
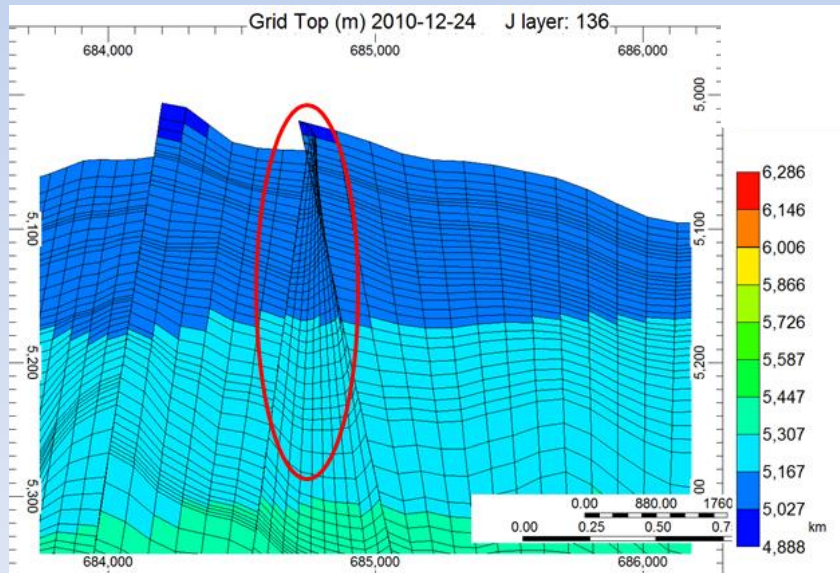
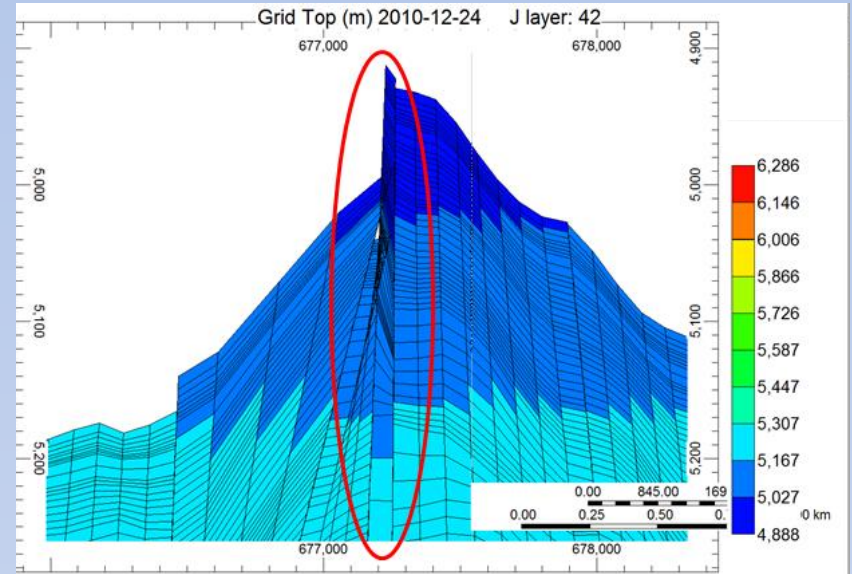
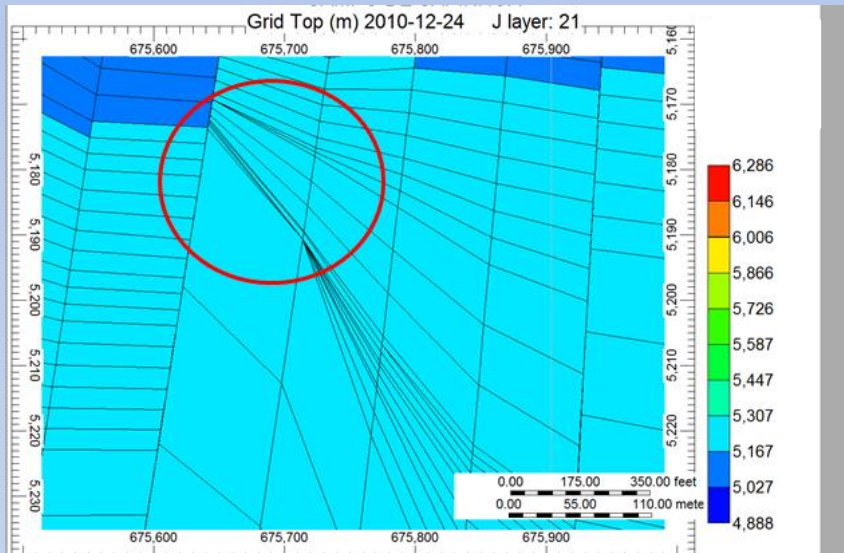




# QC - Modelo Estrutural



# QC - Modelo Estrutural



# Modelagem Geológica Integrada de Reservatórios

- Modelo Estratigráfico



# Modelo Estratigráfico

→ SUPERFÍCIES INTERNAS LIMITANTES DO RESERVATÓRIO

definição da arquitetura interna:

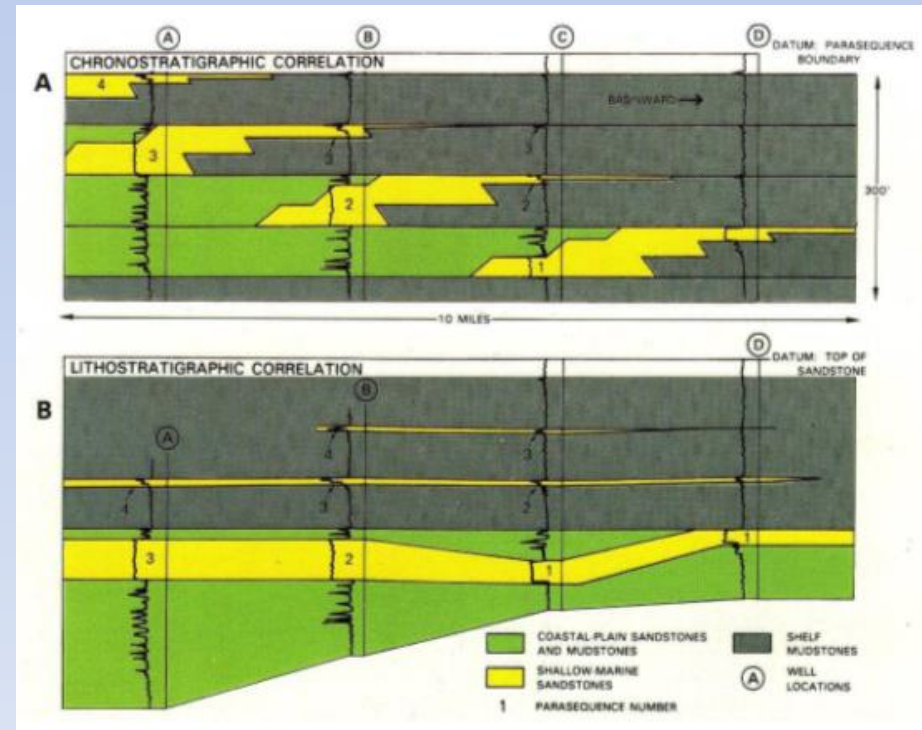


unidades de fluxo

identificação da geometria dos corpos sedimentares e de suas intercalações



essenciais para a simulação de produção/injeção de um campo



# Modelo Estratigráfico

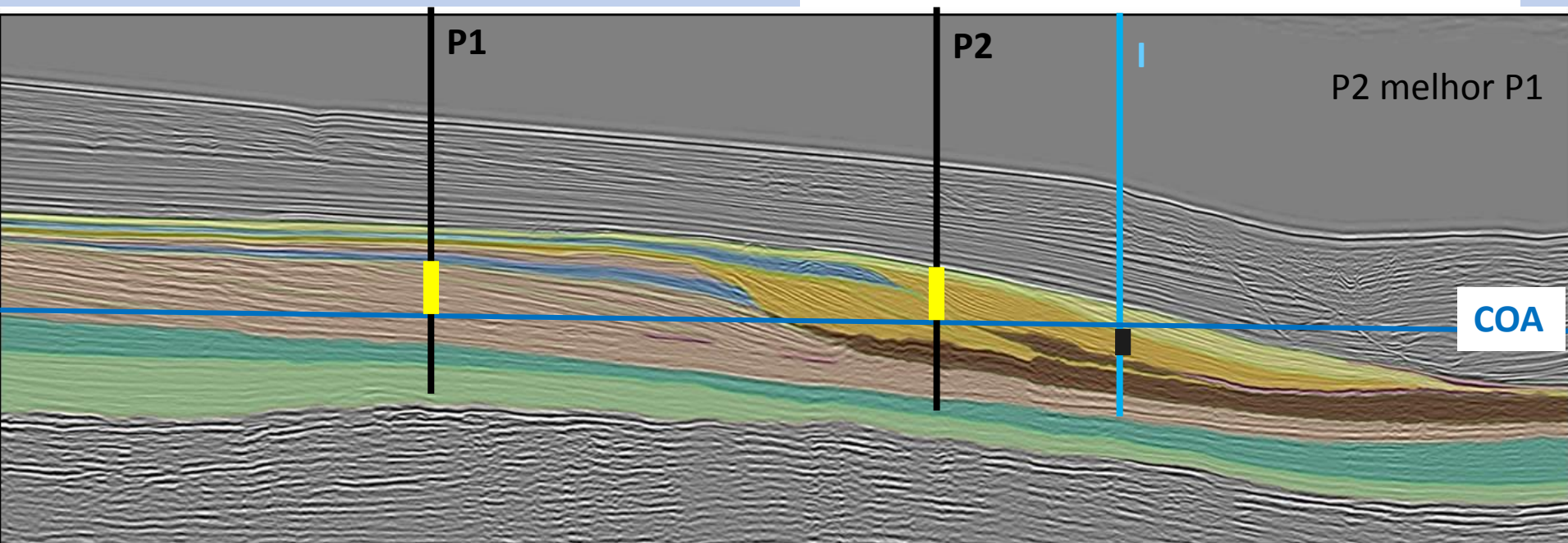
Estratigrafia de Sequências



Relação entre o espaço de acomodação e a geometria dos corpos sedimentares

SEQUÊNCIA

- prever a continuidade, a conectividade e a extensão de corpos arenosos (→ FLUXO DE FLUIDOS)
- estabelecer parâmetros representativos para a modelagem estocástica



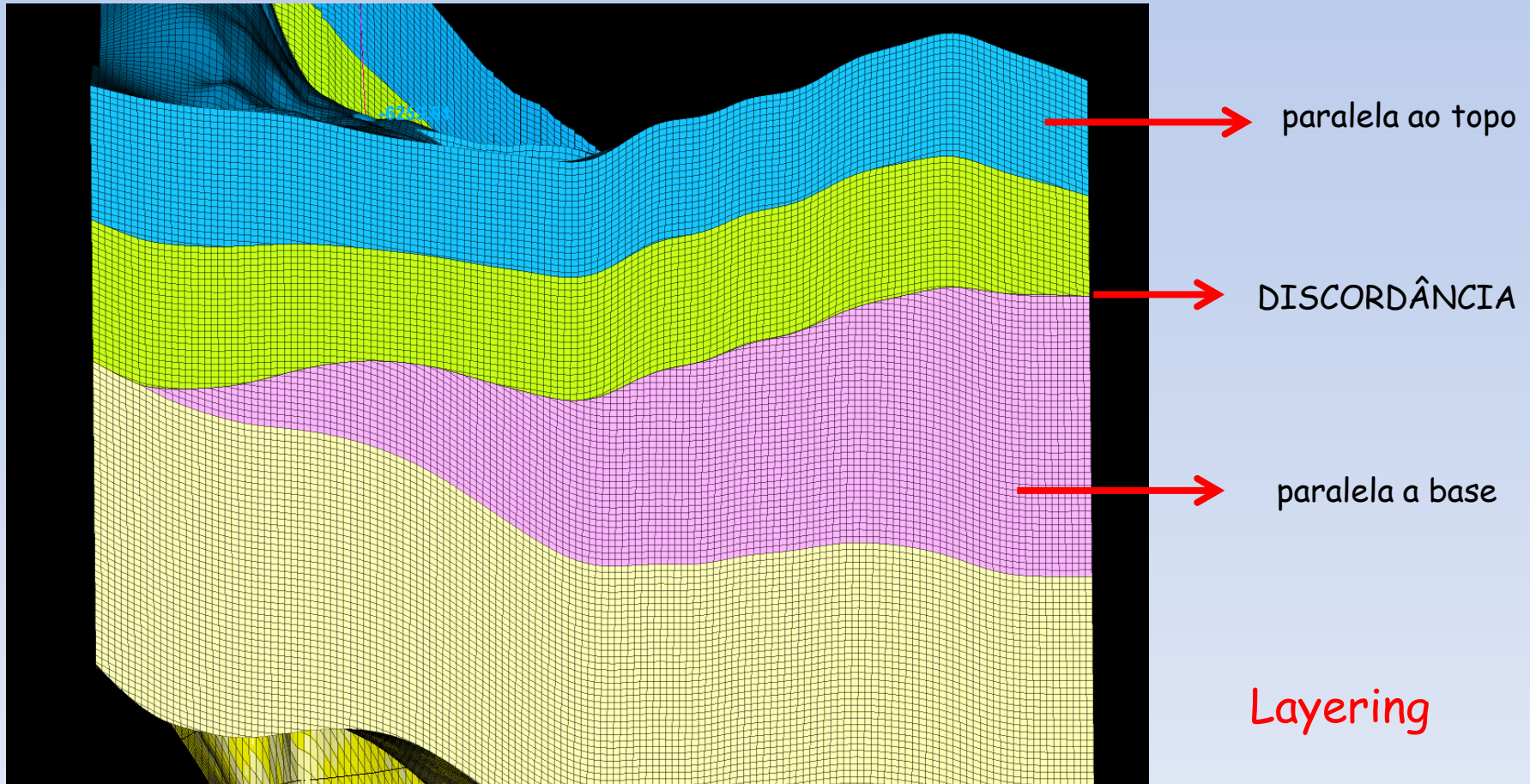
Modificado de Catuneanu, O., et al., *Towards the Standardization of Sequence Stratigraphy*, Earth-Science Reviews (2008)

FSST | TMB | TT | TMA

# Modelo Estratigráfico

## Importante:

- definição da geometria interna e espessura das unidades estratigráficas (proporcional, paralela ao topo,...)
- definição da geometria entre as unidades estratigráficas (concordantes, discordâncias, eventos erosivos,...)

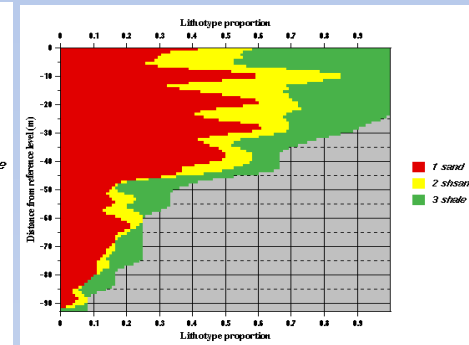
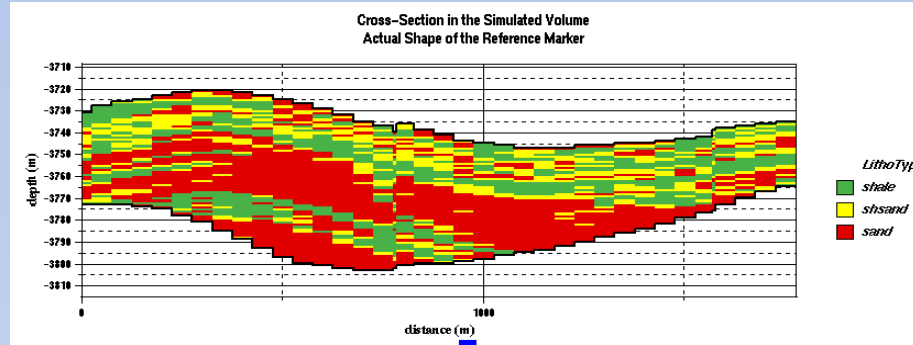


- Influência da Estratigrafia de Sequências

VPC

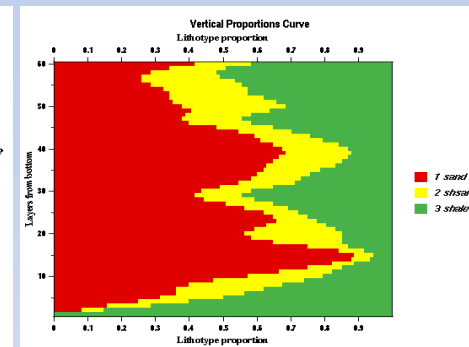
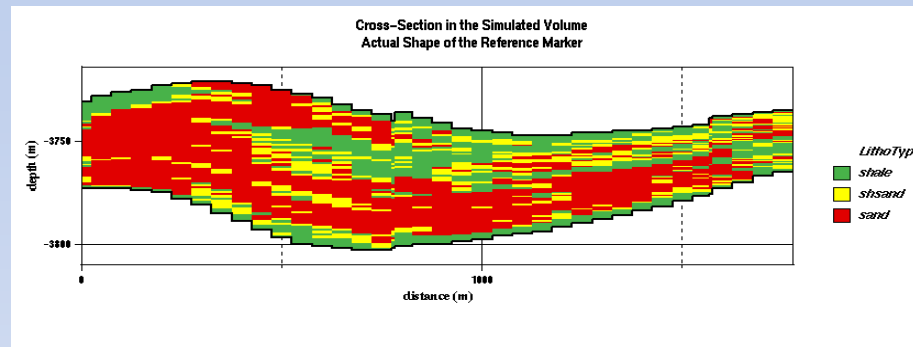
Paralelo ao  
Topo

Downlapping



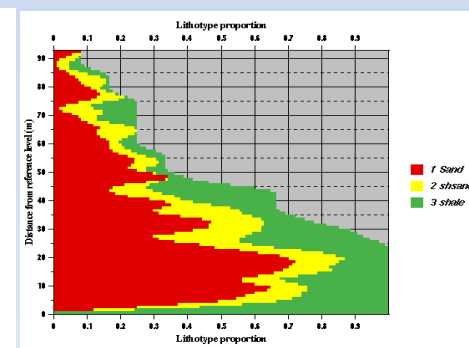
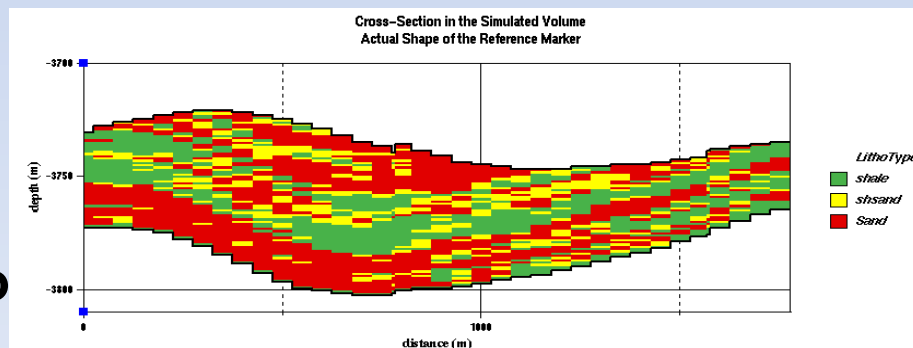
Proporcional

Sigmóide



Paralelo a Base

Agradação  
com erosão no topo





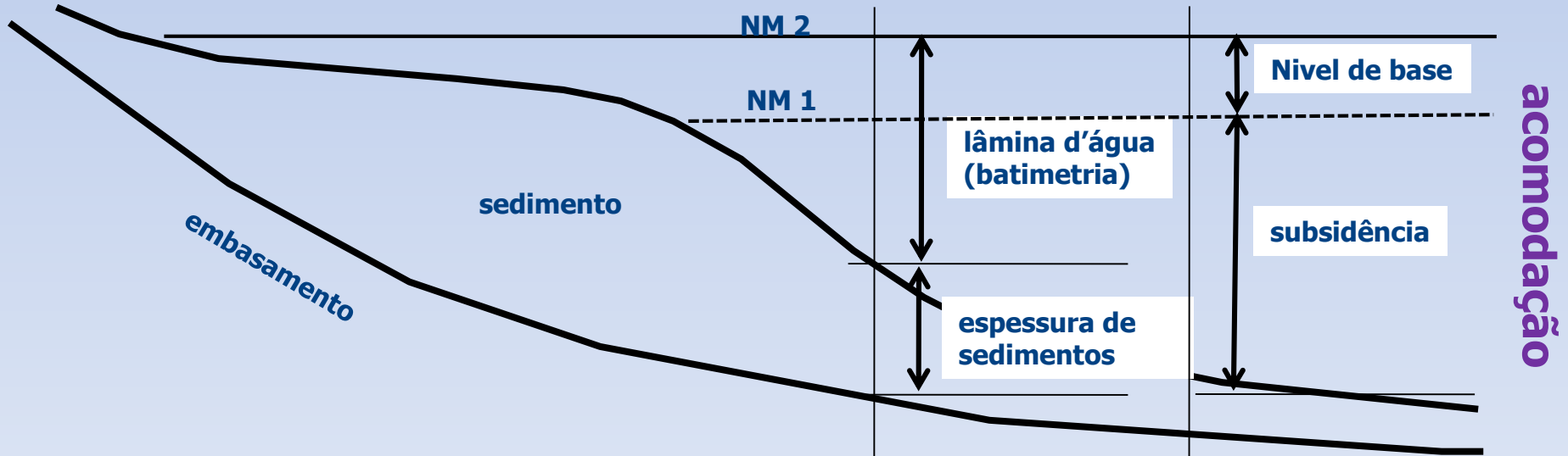
# Modelo Estratigráfico

## Simulação de Processos Depositionais:

- definir geometrias numa escala menor, que a sísmica não é capaz de resolver

### → MODELO CONCEITUAL

- reconstruir a **evolução do ambiente sedimentar**, e assim, gerar um modelo da distribuição espacial dos atributos estratigráficos das fácies sedimentares.



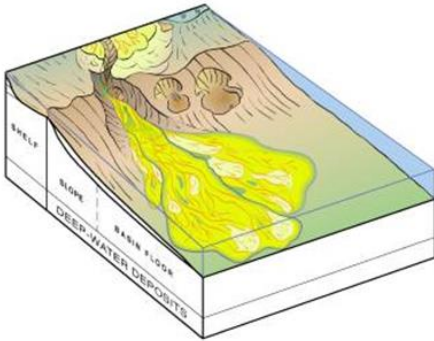
# Modelagem Geológica Integrada de Reservatórios

## Modelo Litológico

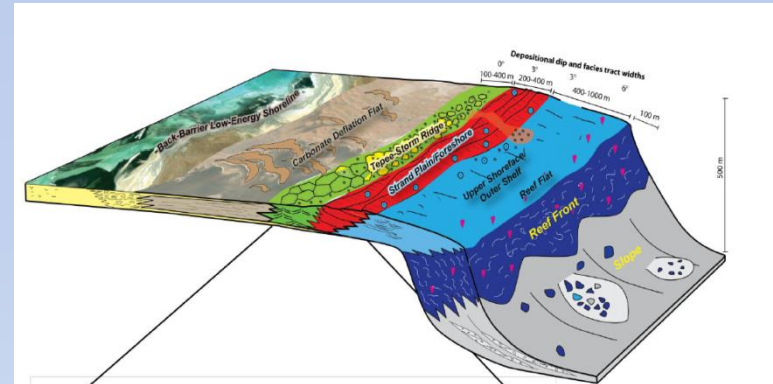
# Modelo Litológico

→ **RECHEAR (POPULAR) O MODELO (GRID GEOLÓGICO) COM AS CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS E SUA VARIABILIDADE ESPACIAL**

- guia para a distribuição das propriedades petrofísicas



modelo  
sedimentológico  
conceitual



**FÁCIES : bloco básico do modelo 3D**

1 - CLASSIFICAÇÃO DE FÁCIES: (1D,2D)

definir parâmetros litológicos + deposicionais + petrofísicos



dado **HARD** = ROCHA (testemunhos e A.L.) + perfis → **correlação rocha-perfil**

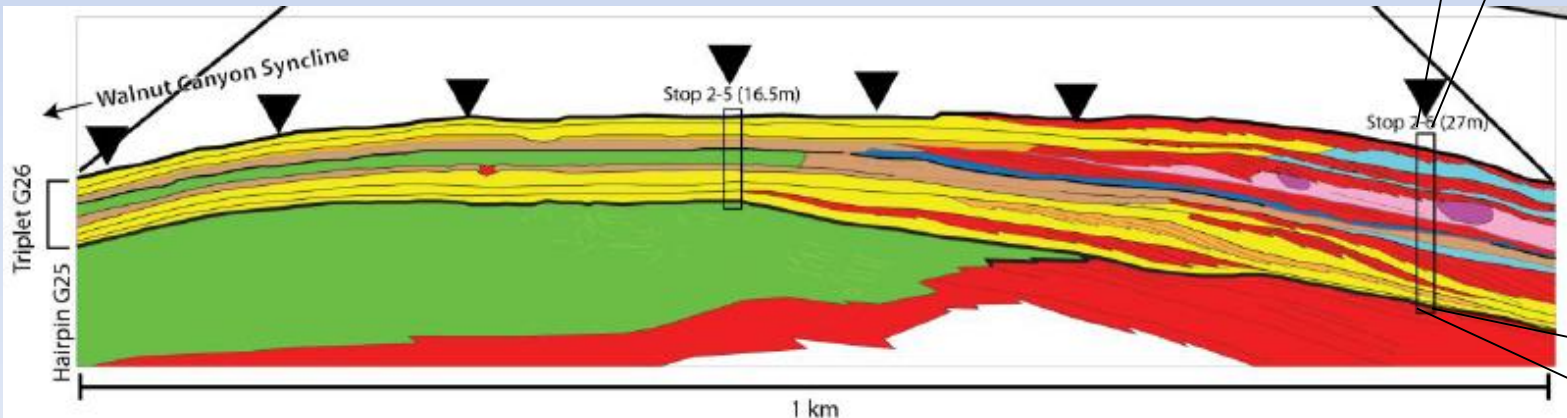
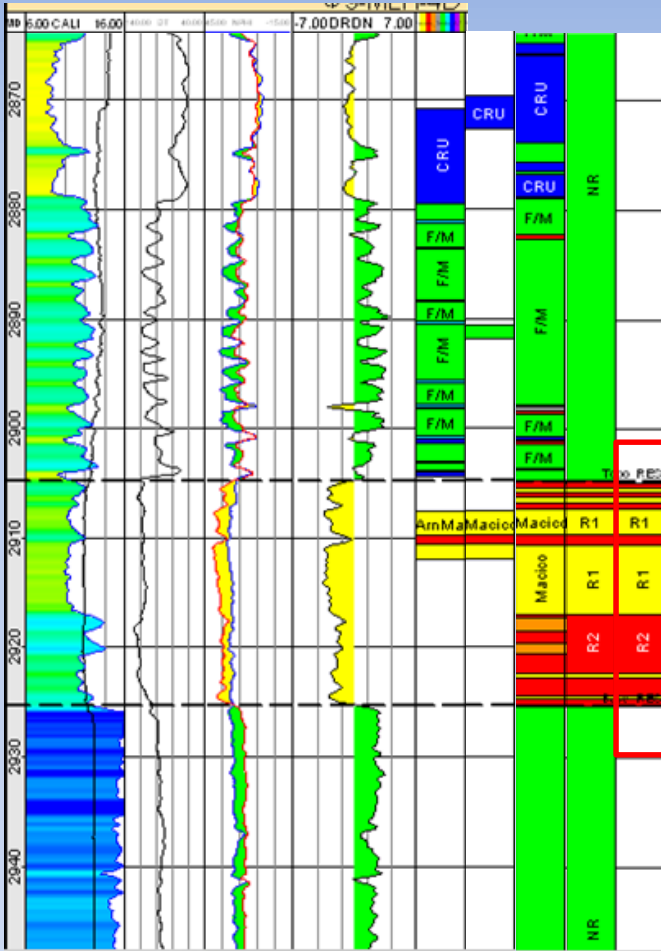
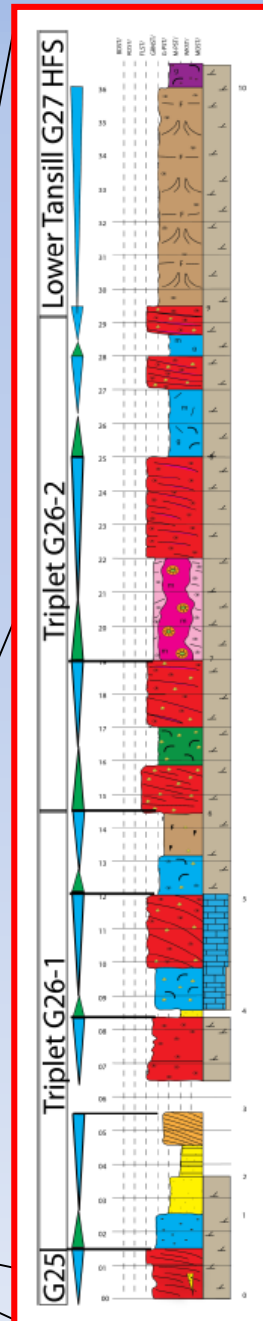
# Modelo Litológico - 1D

1 descrição

2 CORRELAÇÃO  
ROCHA-PERFIL

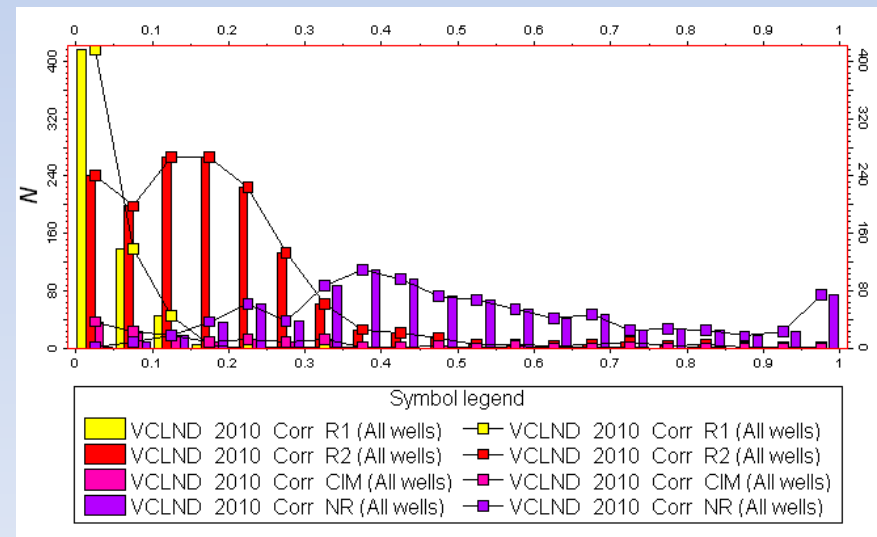
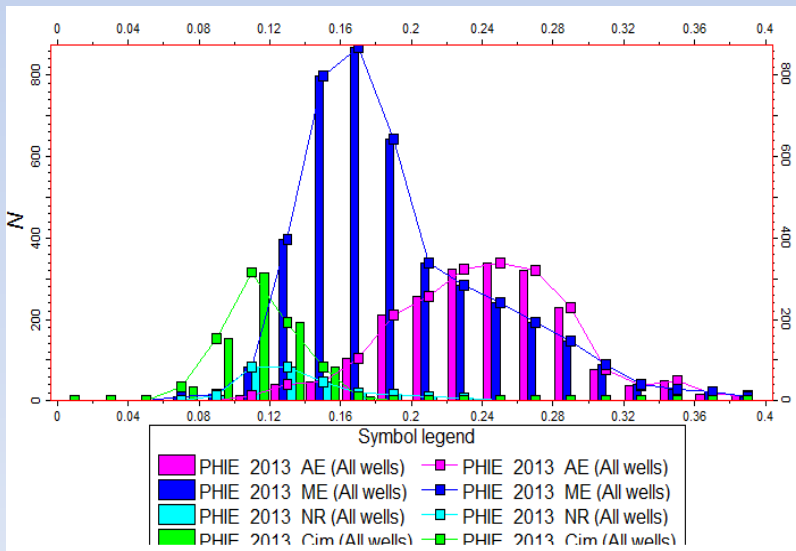
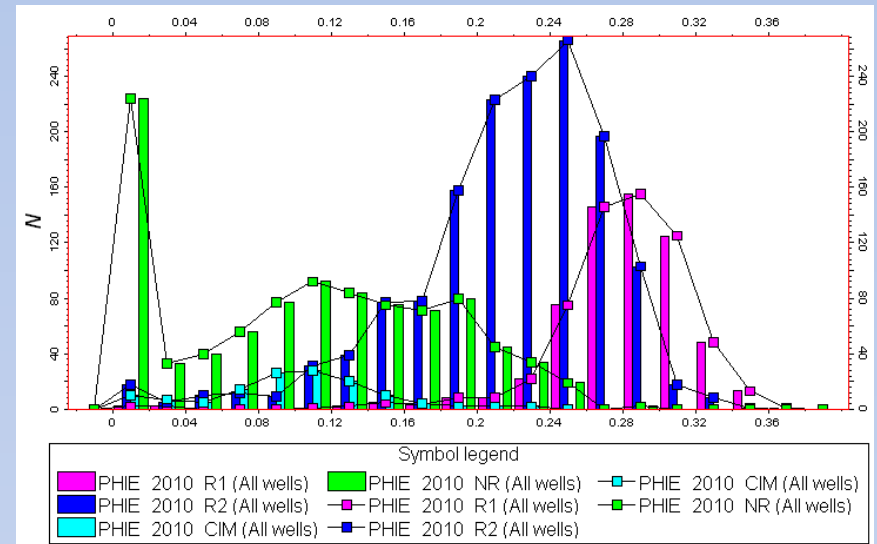
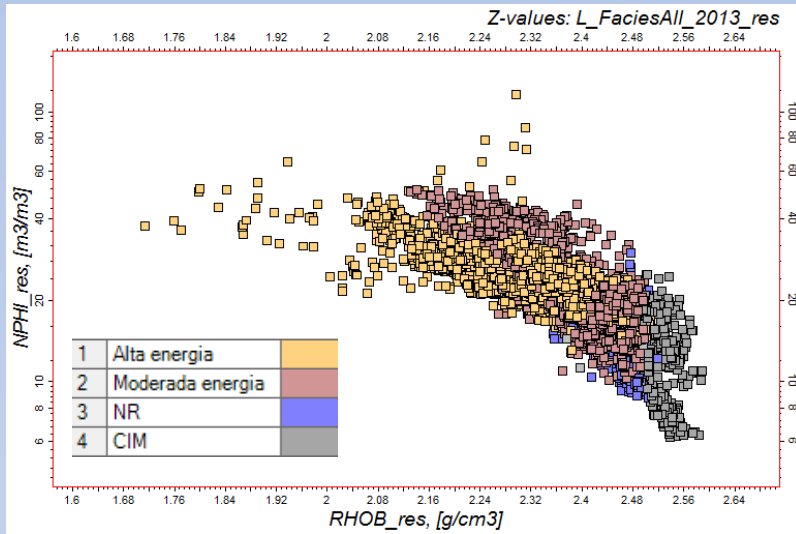
- identificação
- classificação em todo poço
- agrupamento de fácies
- extrapolação para outros poços

EFAC

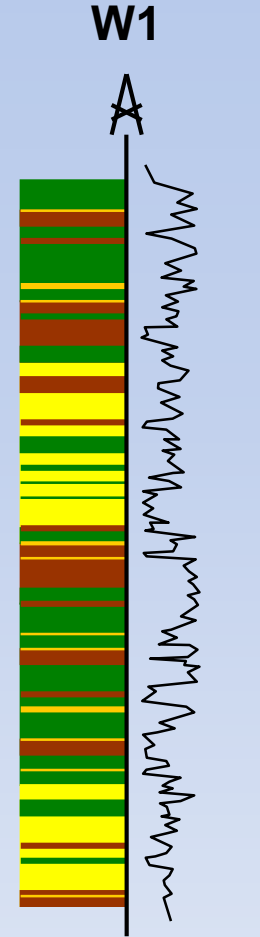




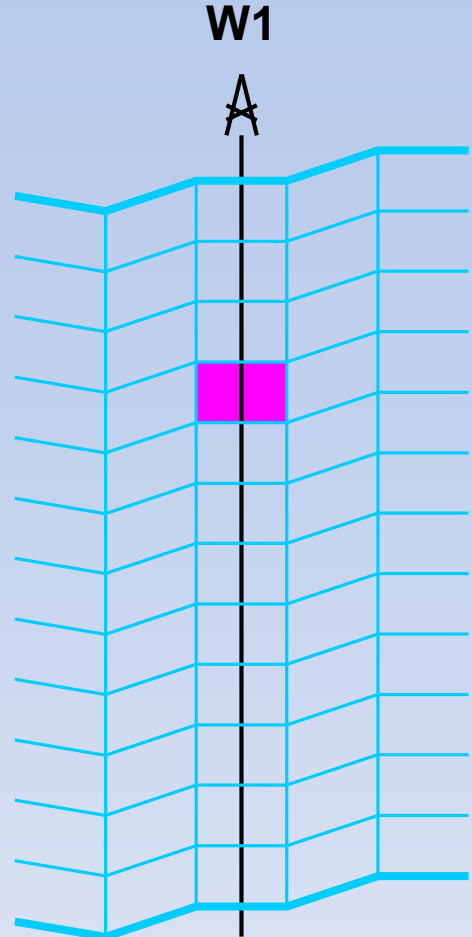
# EFAC - QC



# Modelo Litológico - 1D



Well data  
(scale  $\approx 0.2$  m)

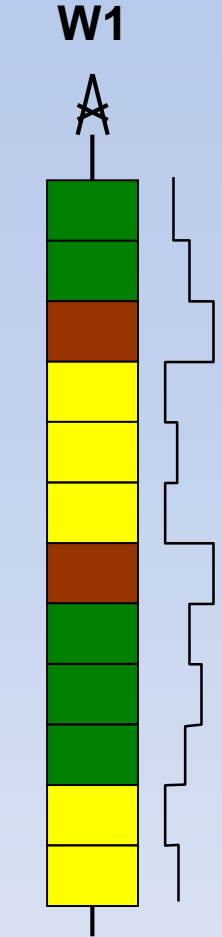


Grid building  
(scale  $\approx 2$  m)



Most present  
facies

Upscaling  
(per facies)



Discretized  
Well

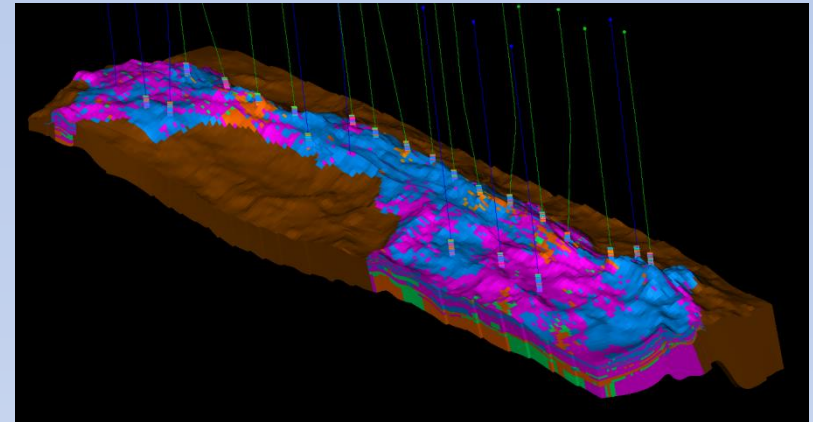
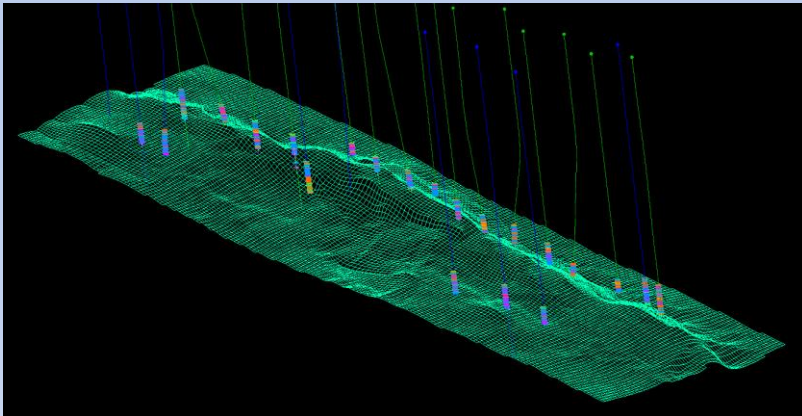
# Modelo Litológico -3D

1 - DISTRIBUIÇÃO DE FÁCIES:

(3D)



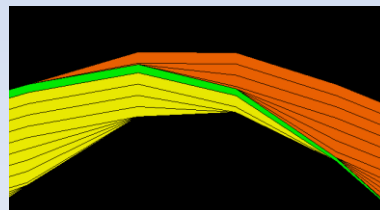
preencher o grid onde não há  
informação HARD (poço)



- **Modelagem Estocástica:**

" em um processo estocástico há uma indeterminação: mesmo que se conheça a condição inicial, existem várias, por vezes infinitas, direções nas quais o processo pode evoluir" (google)

- Modelagem Determinística



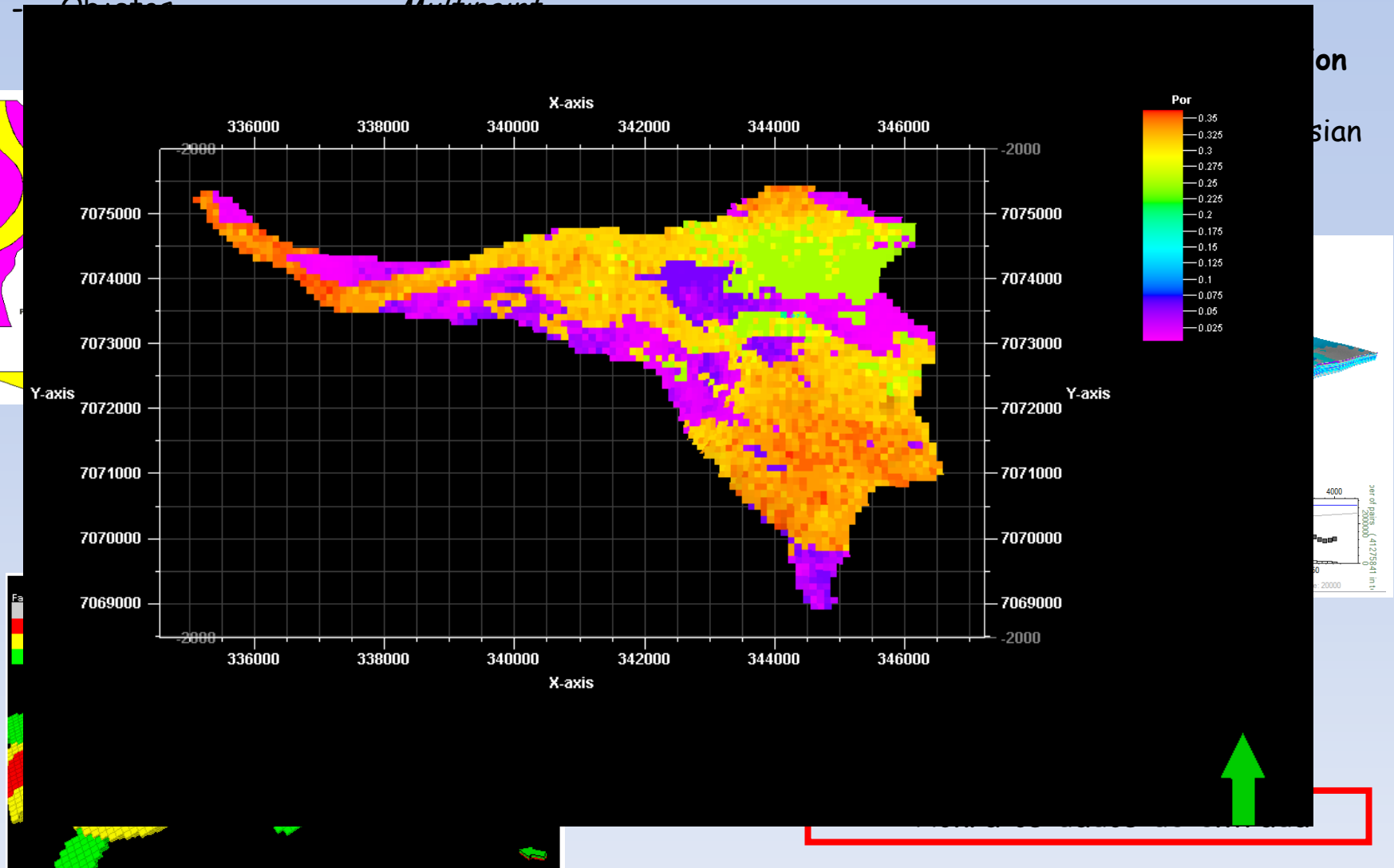
**Realizações Equiprováveis**

**QUAL O MELHOR MODELO ??**

# Modelo Litológico -3D

1) Booleana (geometria)

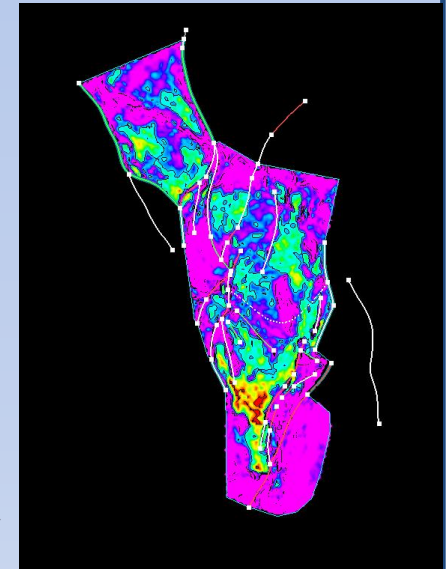
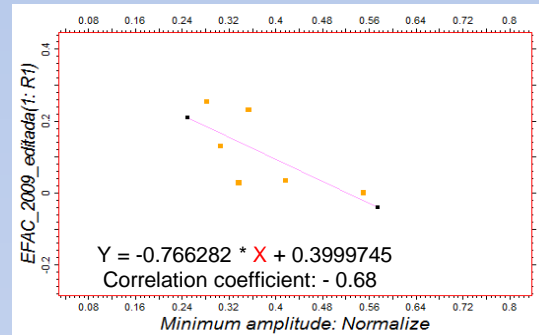
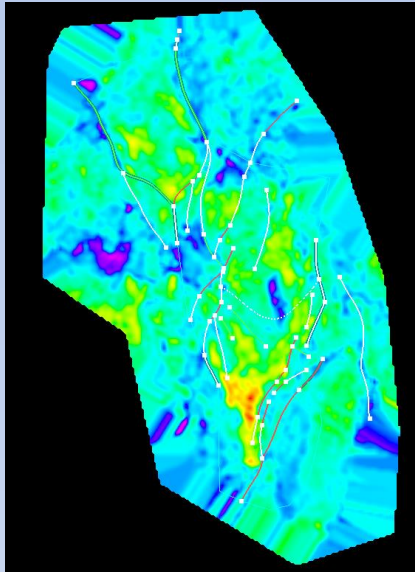
2) Pixel (fç aleatória discreta)  
geostatística



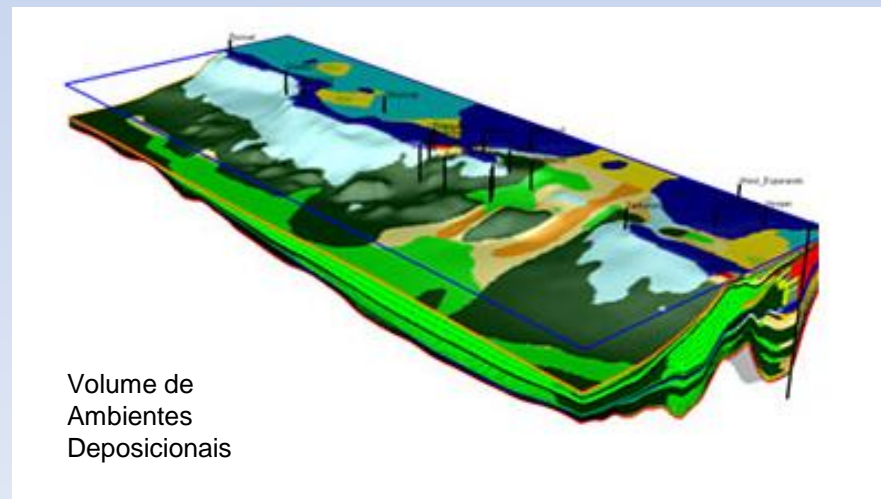
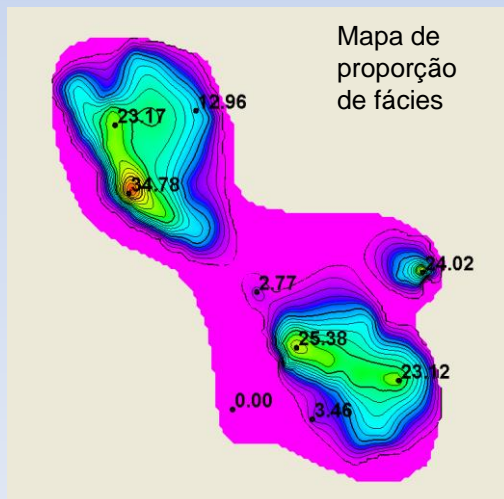


# Modelo Litológico -3D

- Tendências (*SOFT data*) = variável que tenha correlação com a propriedade a ser modelada, desde que tenha sentido geológico



Mapa de proporção de fácies gerado usando a sísmica como deriva

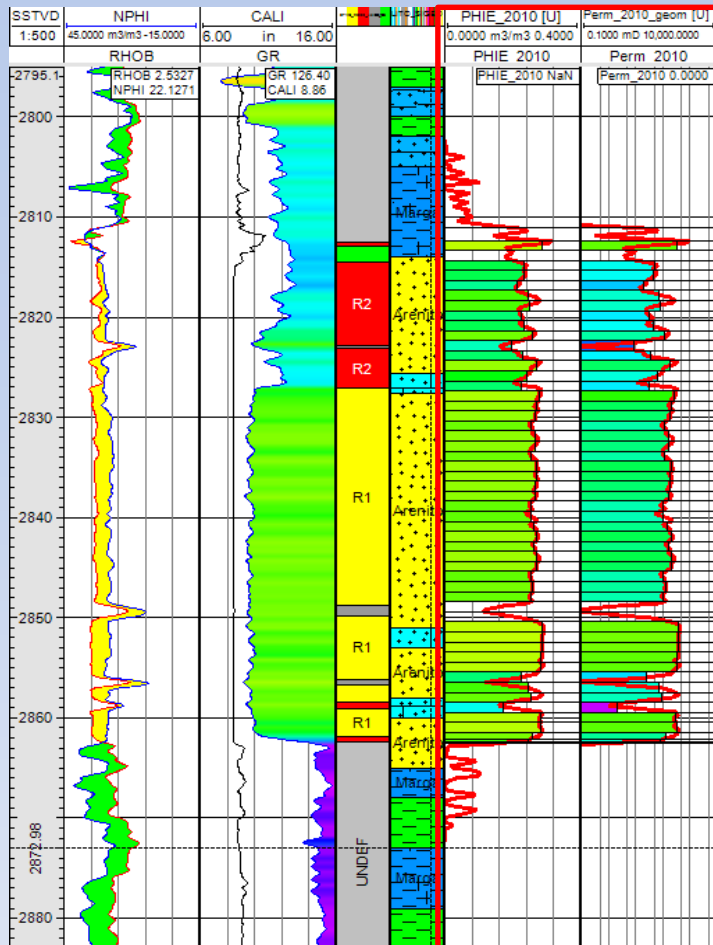


# Modelagem Geológica Integrada de Reservatórios

- Modelo de Propriedades

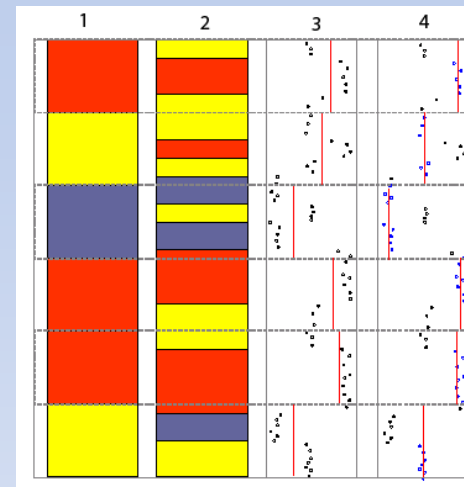
# Modelo de Propriedades

→ **RECHEAR (POPULAR) O MODELO (GRID GEOLÓGICO) COM AS CARACTERÍSTICAS PETROFÍSICAS E SUA VARIABILIDADE ESPACIAL**



$\bar{\phi}$  - média aritmética  
K - harmônica / geométrica

- Propriedades contínuas:  $\bar{\phi}$ , K (h/v), Sw, Vcl
- 1D: condicionadas a FÁCIES (*bias*)



neste exemplo:  
 $\bar{\phi}_{red} > \bar{\phi}_{yellow} > \bar{\phi}_{blue}$

- 3D: condicionadas a FÁCIES (zonas, ambientes,...)
- Pixel : **SGS** **Sequential Gaussian Simulation**

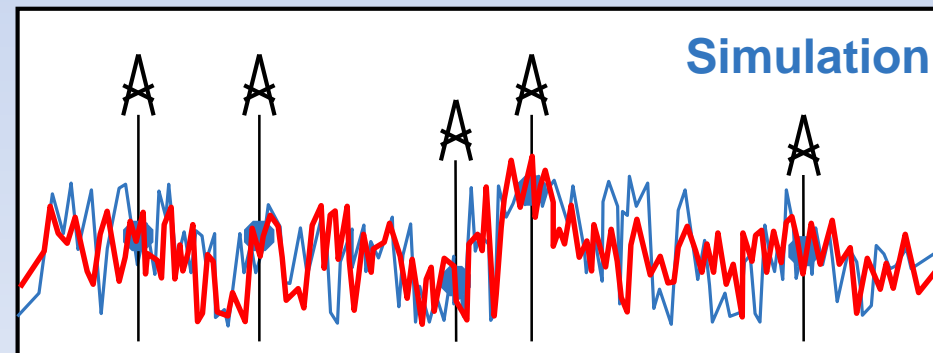
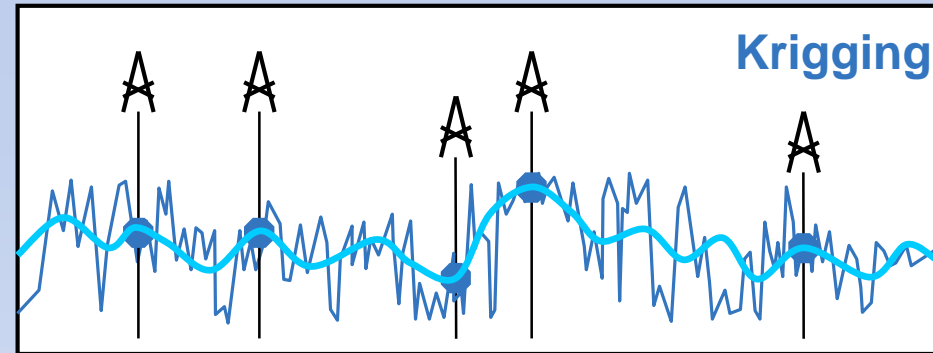
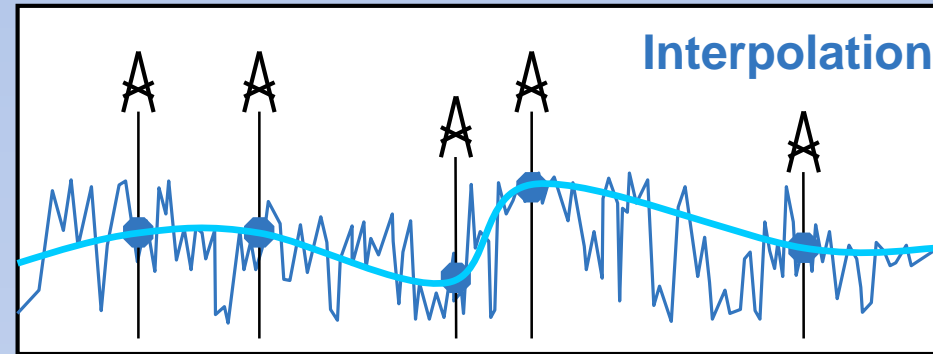
Krigagem

Redes Neurais



# Simulações

**Objetivo : obter um resultado aceitável da propriedade onde não há informação**

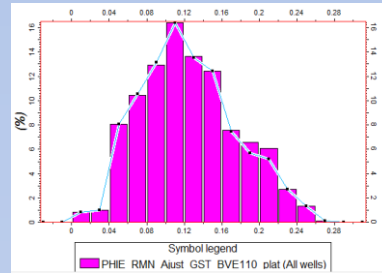


- Interpolação :
  - Valores Intermediários
  - Continuidade exagerada
- Simulação :
  - Reproduz variabilidade
  - Representa heterogeneidades

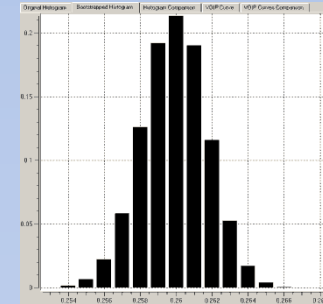
**EXISTE MODELO "CERTO"??**

# Modelo de Propriedades

- Propriedades contínuas

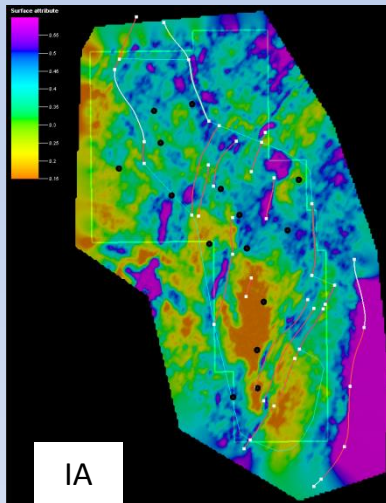


Histograma de valores de perfil



Histograma da média amostral (BOOTSTRAP)

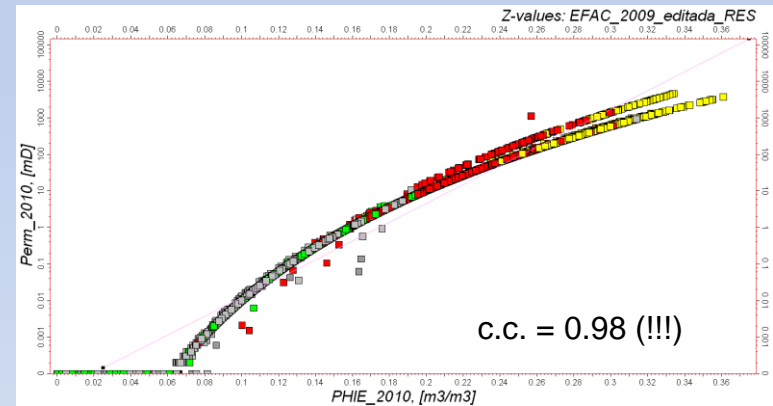
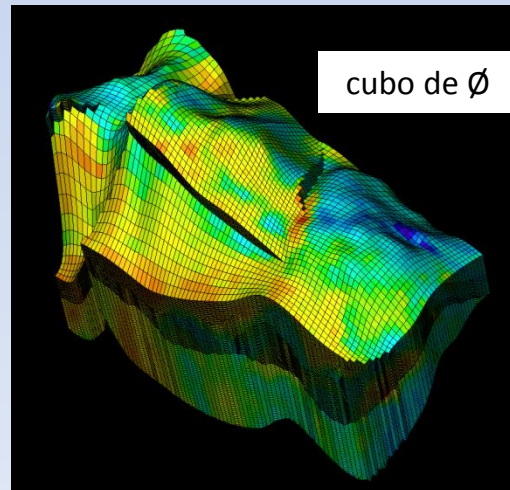
- Tendências: atributos, correlações, propriedades



geralmente

$$\emptyset \leftarrow IA$$

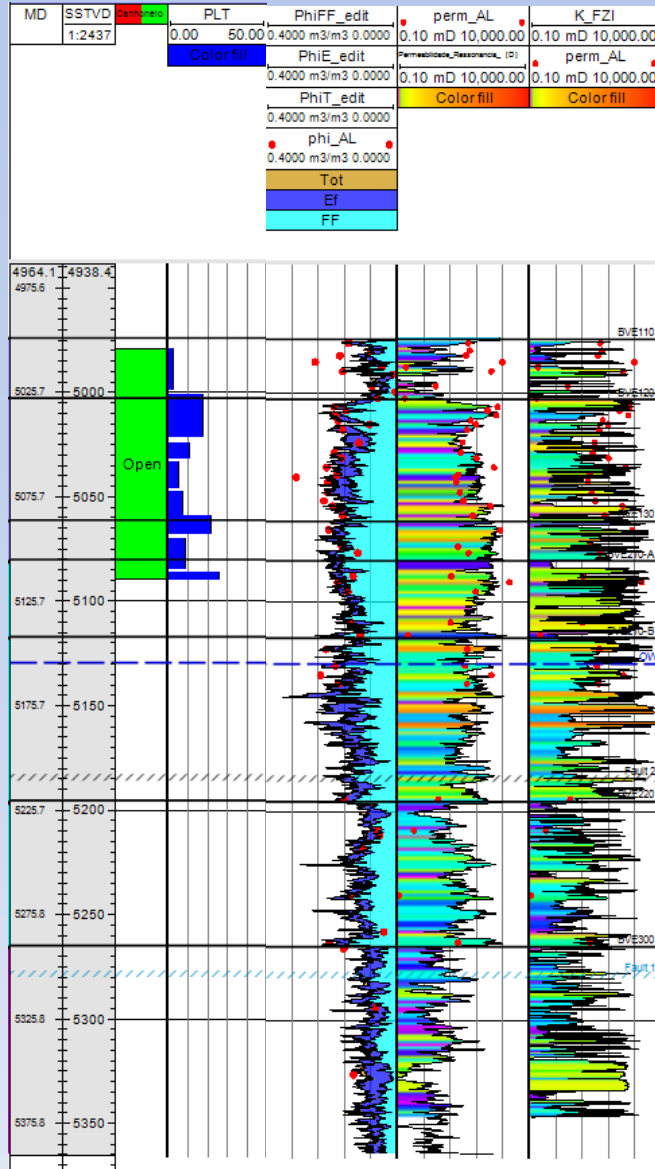
$$K \leftarrow \emptyset$$



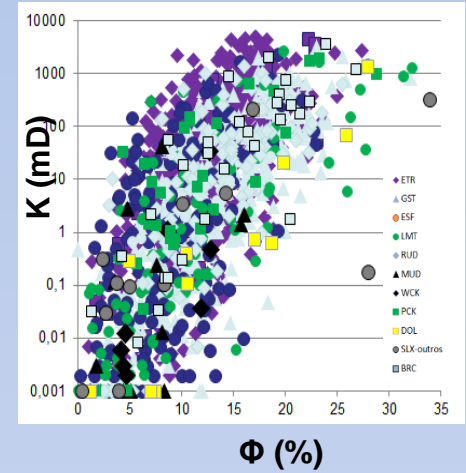
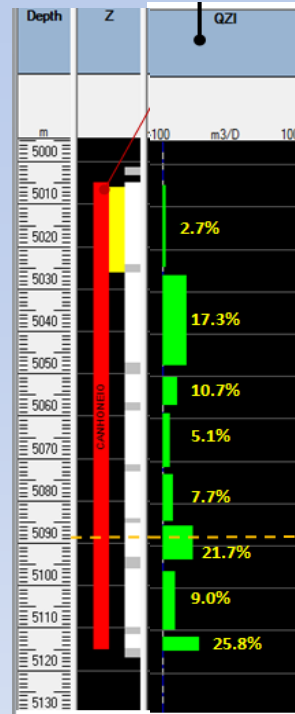
- Geoestatística

# Modelo de Propriedades

- Permeabilidade: propriedade de mais difícil caracterização

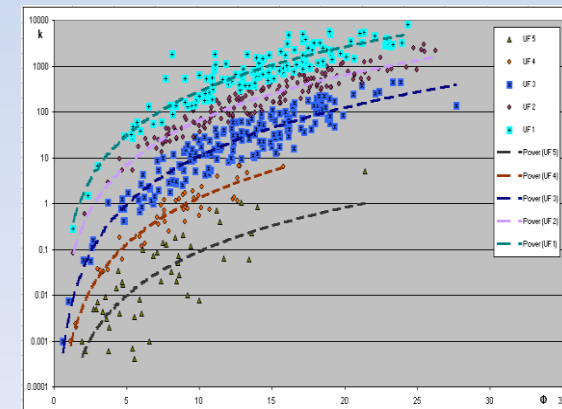


perfil: RMN  
 rocha: petrofísica (A. L.)  
 produção: PLT



$$FZI = \left( \frac{1 - \phi}{\phi} \right) \times 0,0314 \sqrt{\frac{K}{\phi}}$$

(Amaefule et al., 1993)



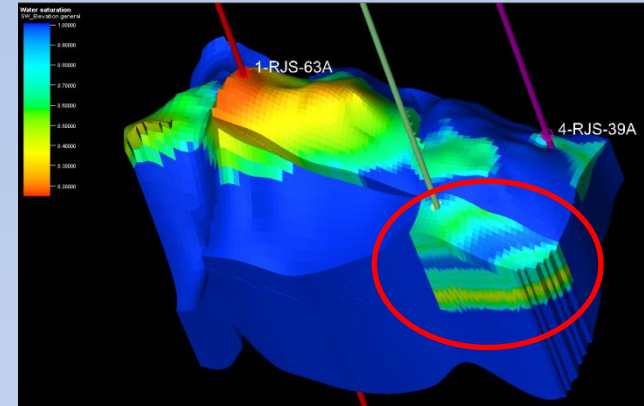
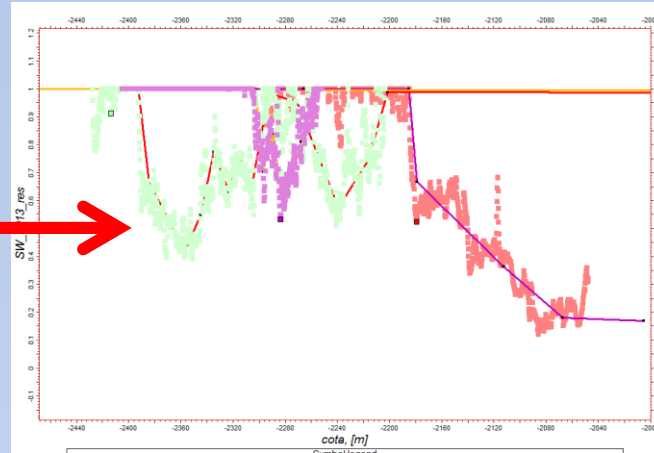
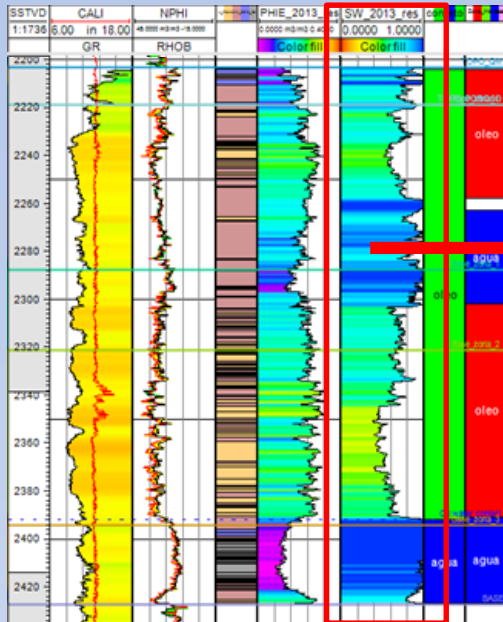
Qual melhor ajuste?



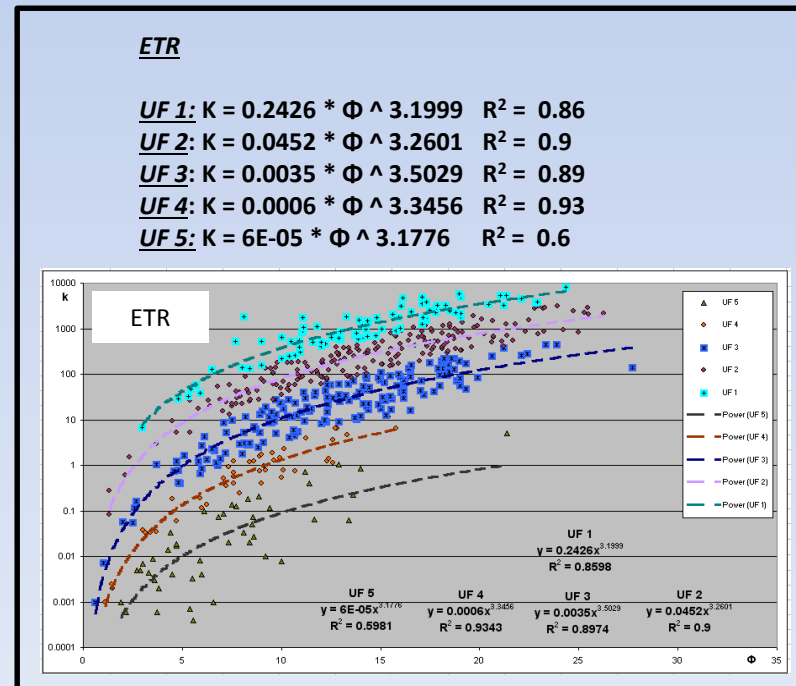
**Modelo Dinâmico**

# Modelo de Propriedades

## - Saturação

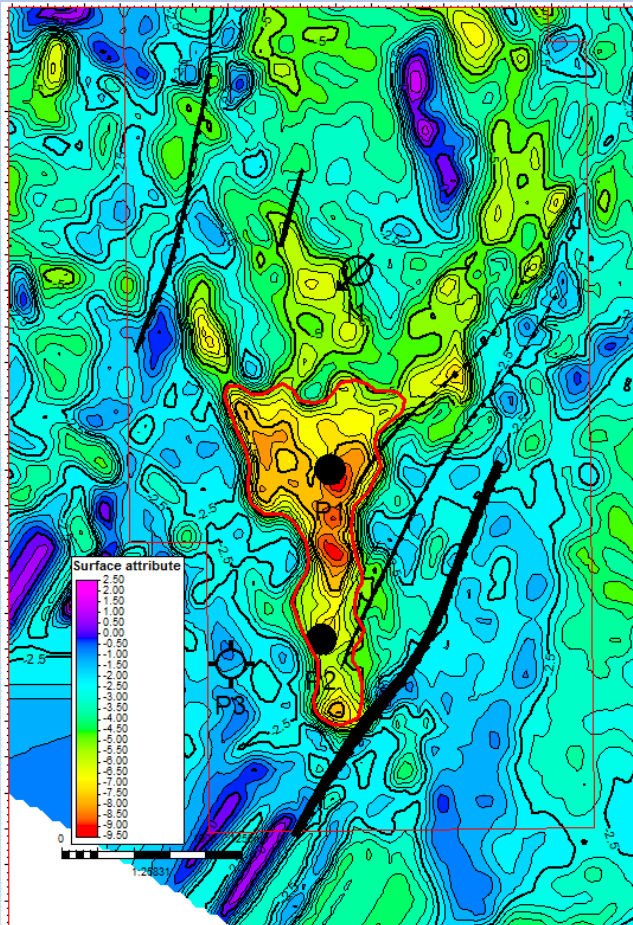


- Casos + simples:  
valor cte por fácies (ex. arenitos)
- abaixo COA:  $Sw = 1$
- GÁS:  $Sg$

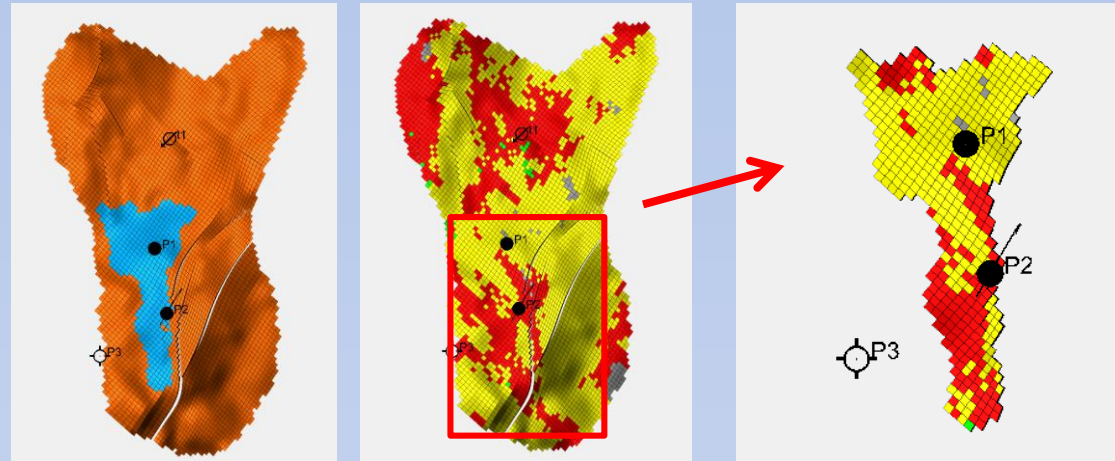




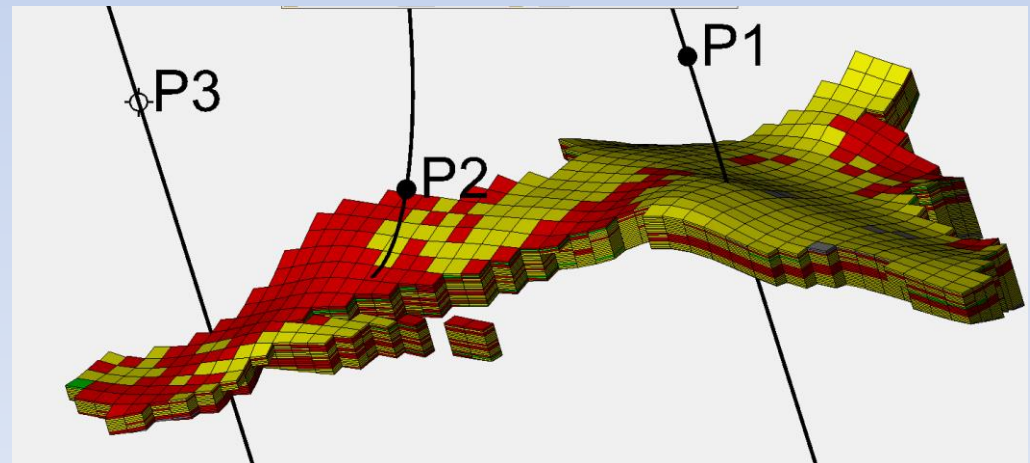
# Modelo de Permeabilidade



Mapa de amplitude do topo

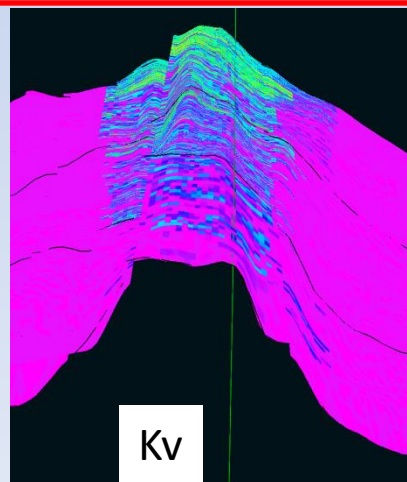
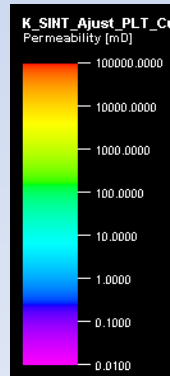
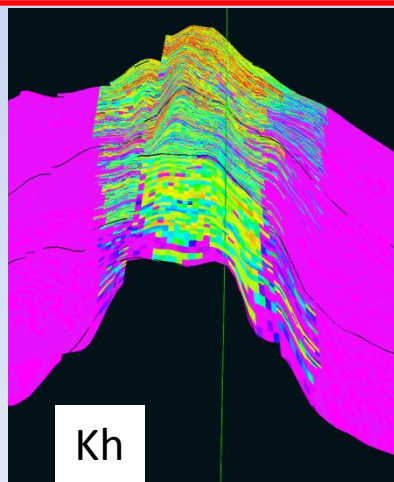
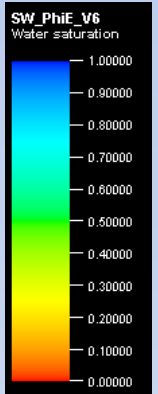
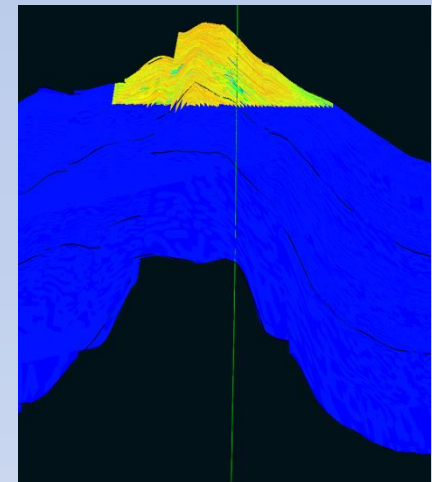
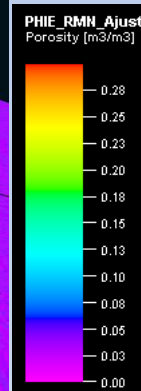
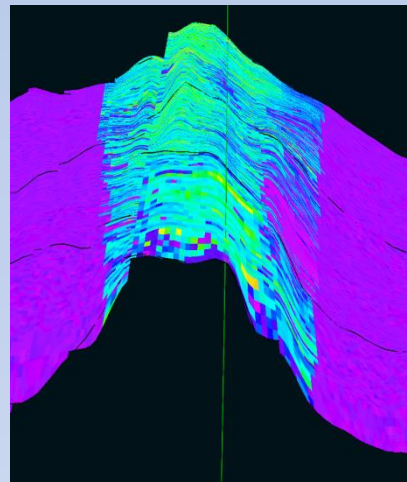
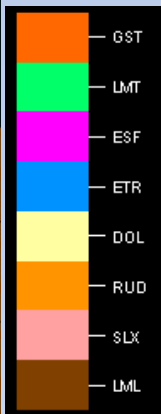
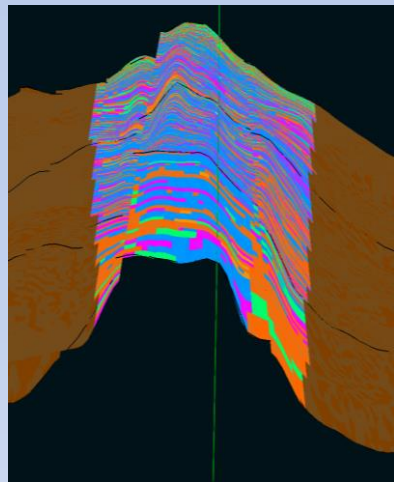
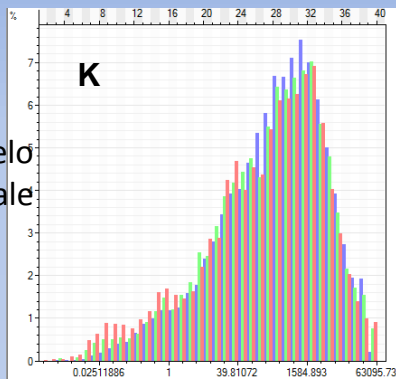
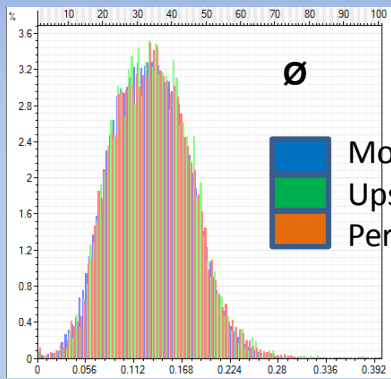


Corredor de permeabilidade entre os poços P1 e P2 e modelo de fácies

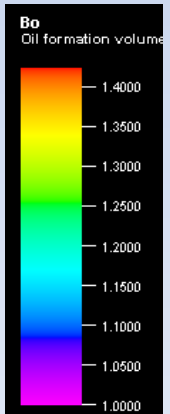
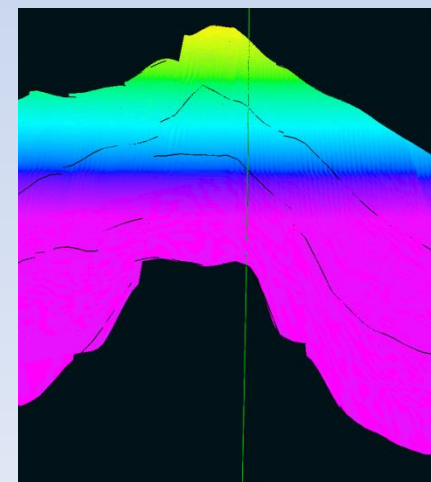


# QC - Modelo de Propriedades

**Melhor QC: resposta no Modelo Dinâmico**

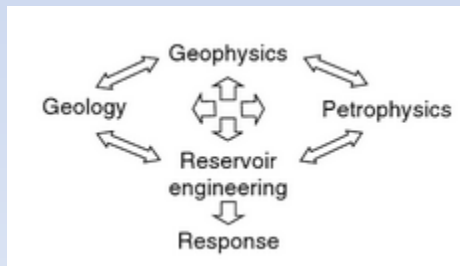


**Kv**



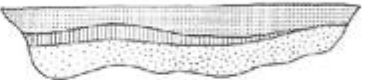
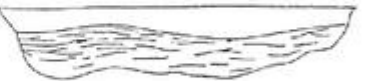
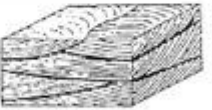

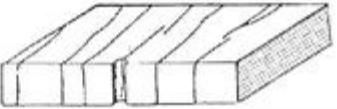


# Modelagem Geológica Integrada de Reservatórios

## Heterogeneidades



# Heterogeneidades de Reservatórios

	Reservoir heterogeneity type	
Grande escala	Sealing fault Semi-sealing fault Non-sealing fault	
	Boundaries genetic units	
	Permeability zonation within genetic units	
	Baffles within genetic units	
Pequena escala	Lamination, cross-bedding	
	Microscopic heterogeneity, textural type, mineralogy	
	Fracturing tight, fracturing open	

- Um dos fatores mais relevantes que afetam o **comportamento dinâmico** de um campo. --> **F. R.**



- Características geológicas em escala variável que podem ou não ser significantes p/ uma caracterização estritamente estática, mas têm grande **impacto no fluxo de fluidos.**

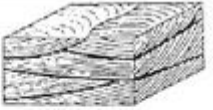



- Portanto a relação H. R. - parâmetros dinâmicos é uma **questão fundamental p/ um estudo integrado.**

\* *Integrated Reservoir Studies*. Cosentino, L. 2001, Editions Technip, Paris, 310 p.



# Micro e mesoescala

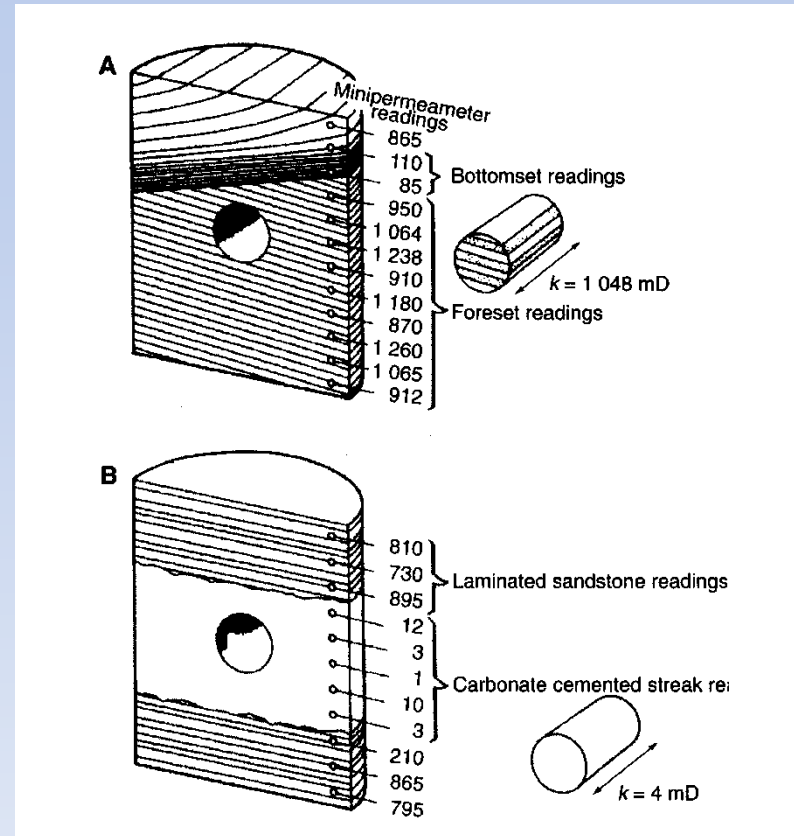
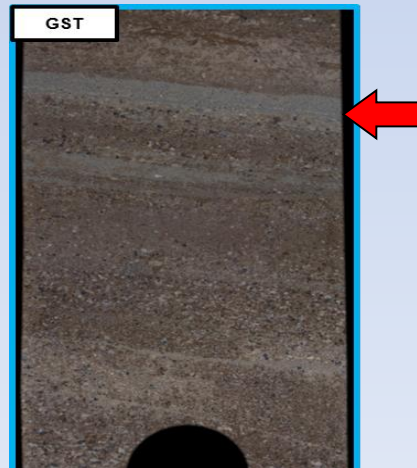
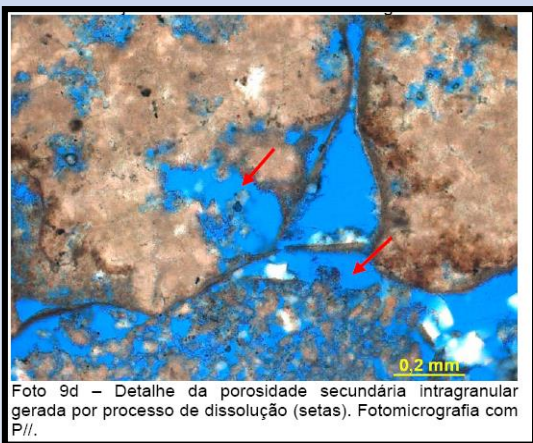
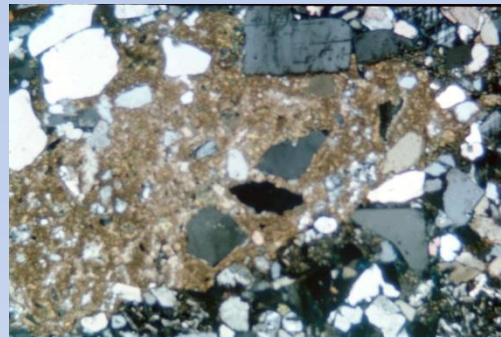
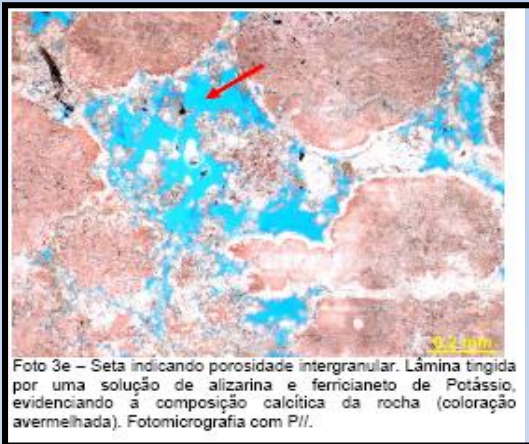
Lamination, cross-bedding	
Microscopic heterogeneity, textural type, mineralogy	

testemunho, *plug*

laminações, estratificações

lâmina

tipos de porosidade



**E a diagênese ??**

Podem representar barreiras ao fluxo



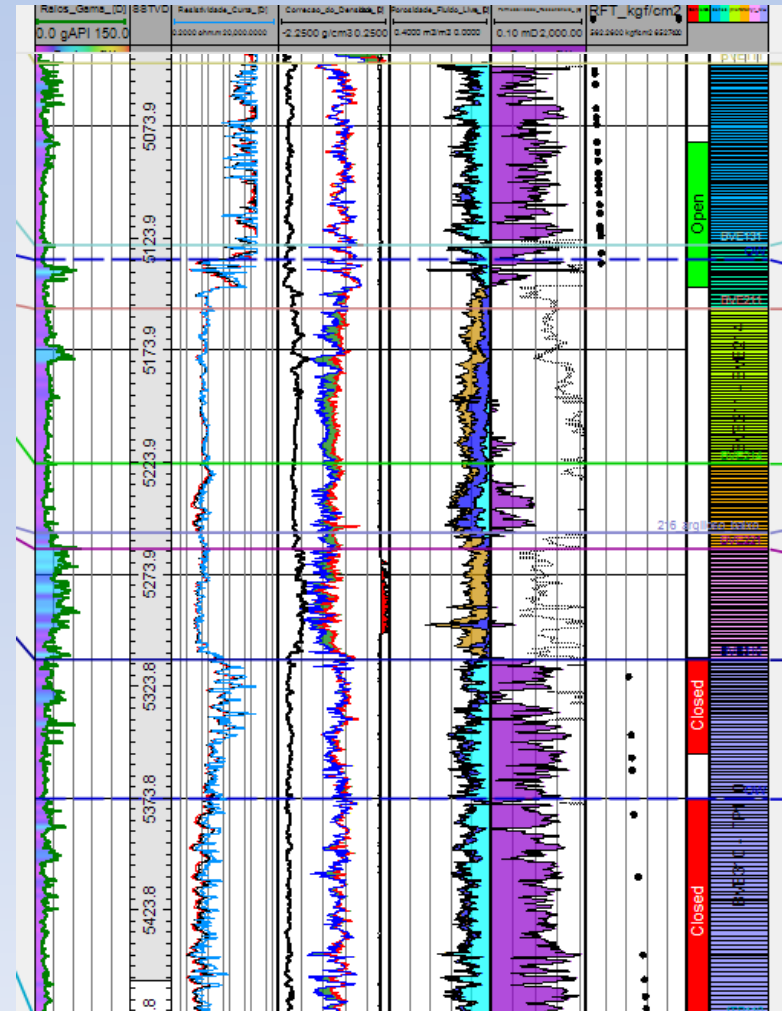
**COMPARTIMENTAÇÃO DO RESERVATÓRIO**

- continuidade de folhelhos
- níveis cimentados

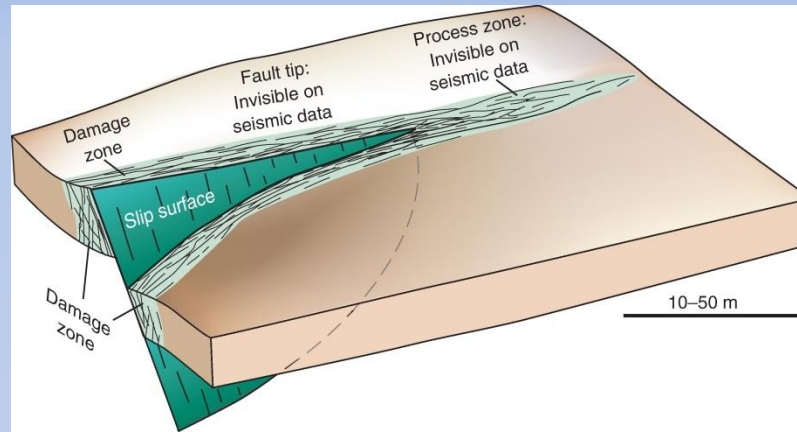
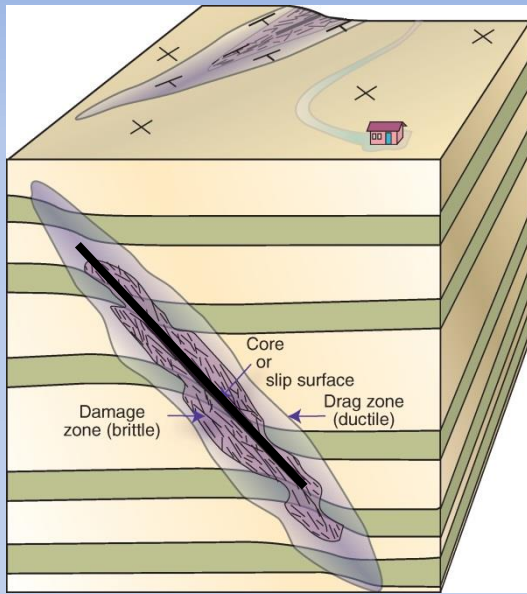
poço

Permeability zonation within genetic units	
Baffles within genetic units	

variação lateral de fácies ?



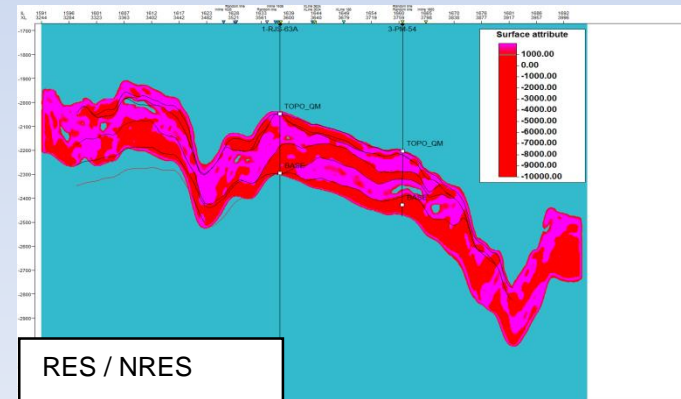
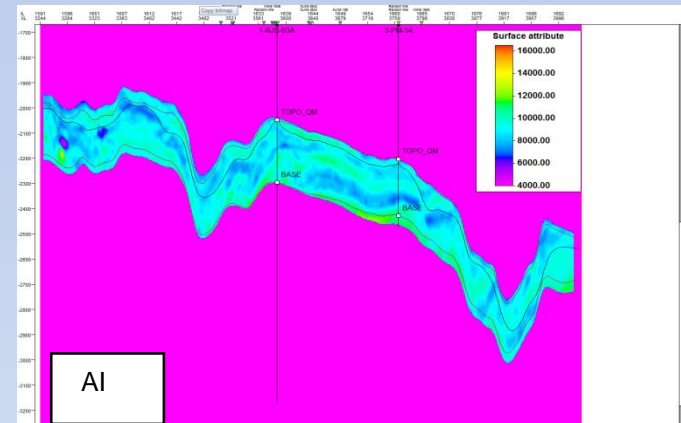
# Megaescala



potencial selante de falhas

sísmica

Sealing fault Semi-sealing fault Non-sealing fault	Oil
Boundaries genetic units	



- Contrastes litológicos / petrofísicos / estratigráficos
- Mesmo contrastes suaves podem representar barreiras

variação lateral de fácies



# Construção do *Grid* - outras possibilidades

- **FZG - *fault zone grids***: Zona de Falha = volume tridimensional de rocha deformada.
- A caracterização das falhas e compreensão do seu impacto no fluxo de fluidos são chave para D.P.

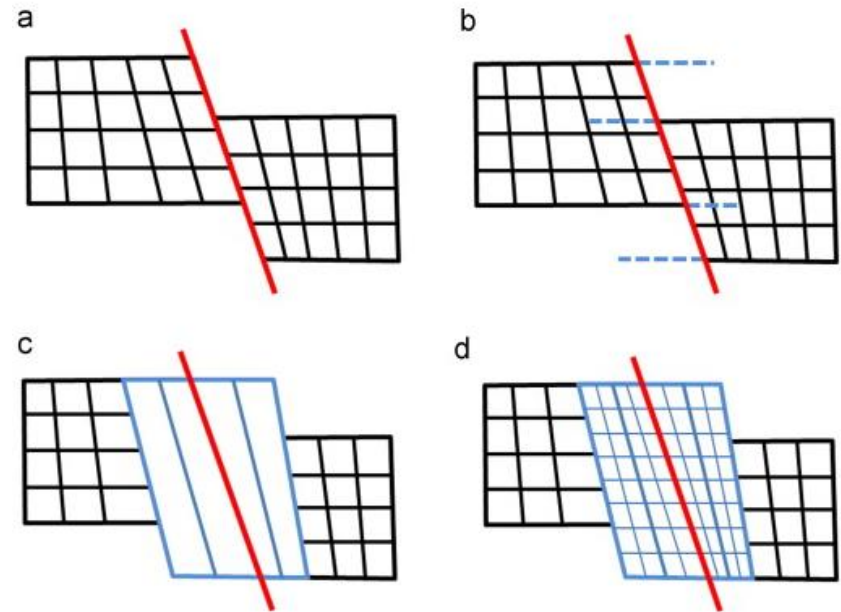
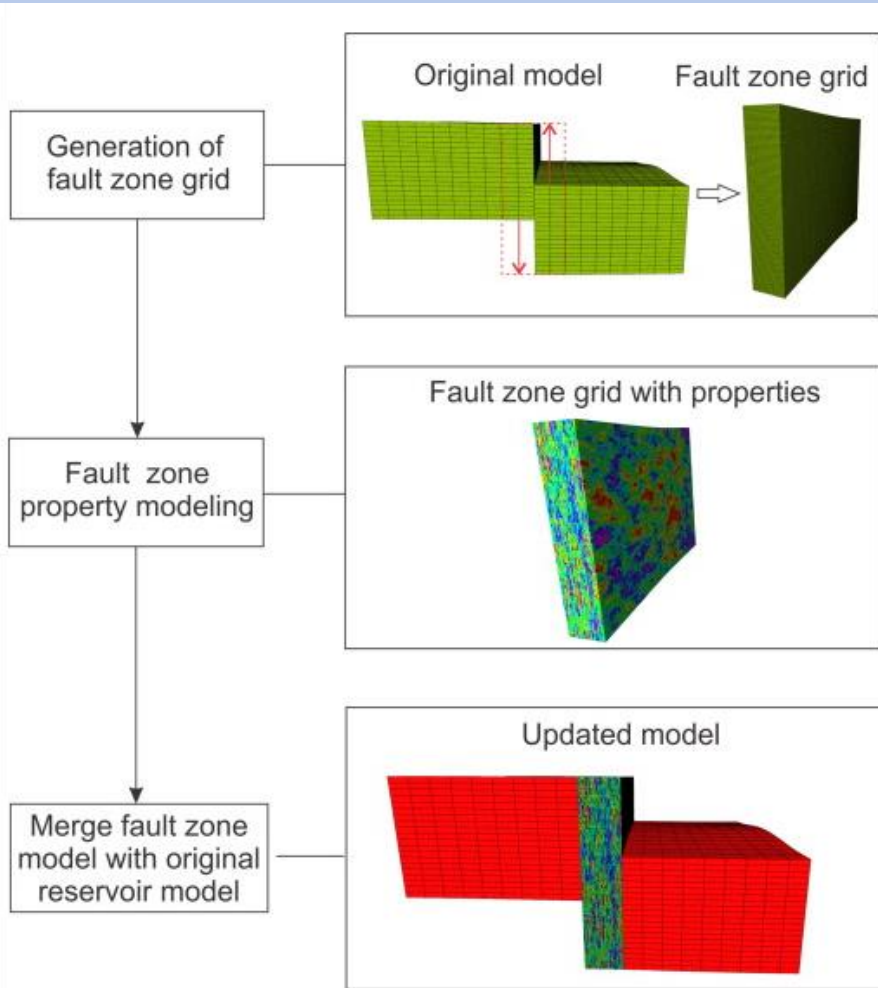


Fig. 2. Fault zone gridding. (a) Cross-section through the grid with the fault trace in red. (b, c) The top and the bottom surfaces of the FZG are defined using extrapolation. (d) Grid refinement within the fault zone. (f

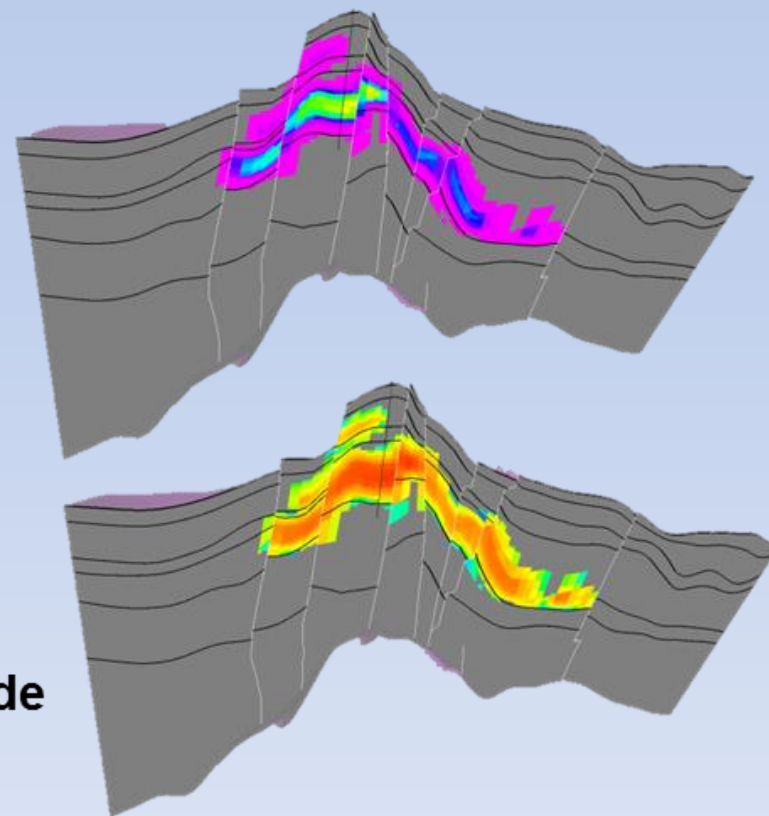
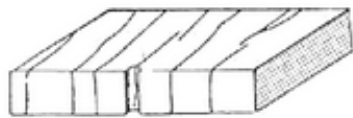
\* A Method for Generating Volumetric Fault Zone Grids for Pillar Gridded Reservoir Models. Dongfang, Q., Roe, P. e Tveranger, J. Elsevier, 08/2015.



# Fraturas

Desde microfaturas e estilólitos até juntas e padrões regionais. Podem ser **barreiras**, mas geralmente comportam-se como **condutos**, principalmente em carbonatos de baixa porosidade.

Fracturing tight,  
fracturing open



de

Ex de modelo 3D de fraturas,  
 $\emptyset$  (acima) e K (abaixo)

# Heterogeneidades e integração de dados

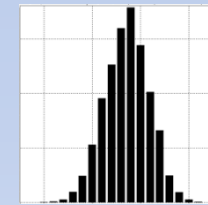
## Identificação:

- Geofísica : megaescala → interpretação, análise de atributos sísmicos
- Fluidos : contatos diferentes, variações de parâmetros de óleo/água da formação (composição, propriedades PVT,...)
- Testes em poços : depleção diferenciada lateral/vertical, interferências em outros poços, traçadores,....
- Produção : depleção diferenciada, RGO, RGL, BSW

# Incertezas

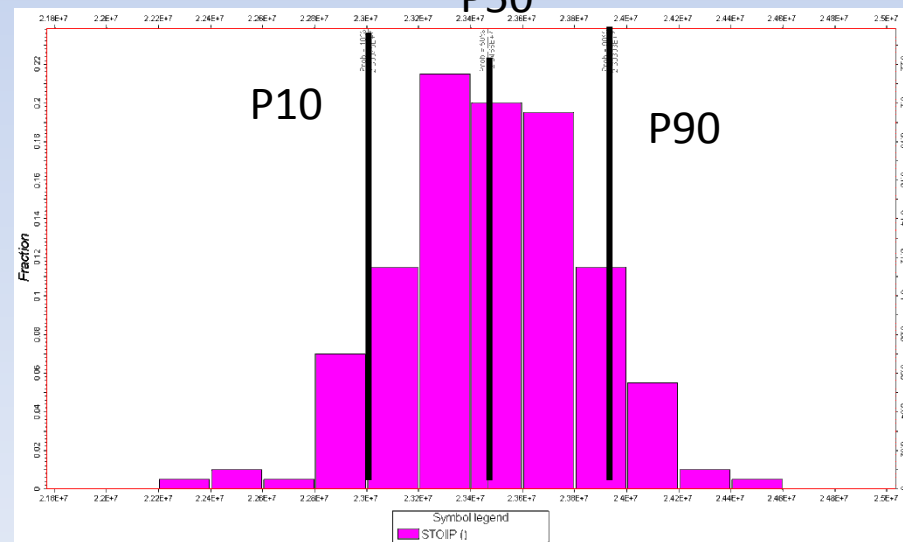
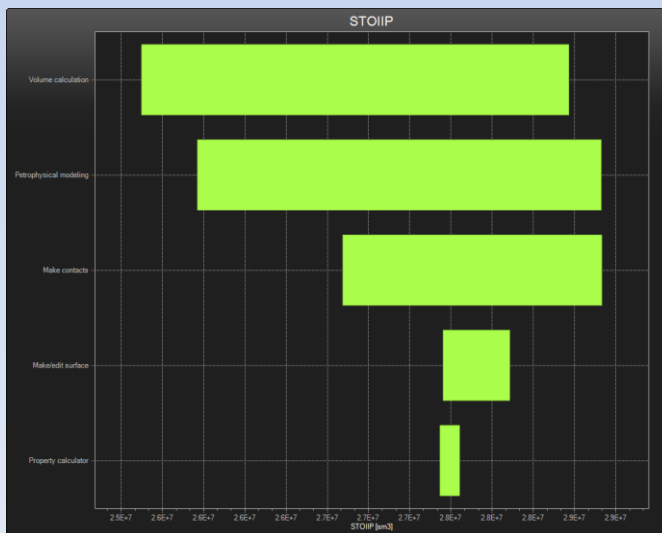
→ Cenários

Realizações



	Otimista	Moderado	Pessimista
Interpretação	 Interpretação 1	 Interpretação 1	 Interpretação 2
PinchOut			
Fac	Gaussiana Trunc	SIS	SIS
Fac	Mapa de Isoproporção Facies Canal Mais Contínuo → Menos Contínuo		
Heterolito	Res	Res	Nres

P50



# Modelagem Geológica Integrada de Reservatórios

- Considerações Finais



# Considerações Finais

- Informações dinâmicas devem sempre ser cruzadas e integradas com as estáticas, pois esta INTEGRAÇÃO é a melhor aproximação p/ uma caracterização de reservatórios efetiva.
- Geólogo/Geofísico tem que entender a Engenharia de Reservatórios, assim como o Engenheiro tem que entender as Geociências de Reservatórios.
- As incertezas estão presentes em todas fases e precisam ser bem trabalhadas.
- O Geólogo deve dar mais consideração para a **qualidade** do *grid*, tendo em mente que o objetivo da modelagem não é apenas caracterizar a geologia, mas principalmente permitir que a engenharia possa utilizá-lo para a simulação de fluxo, ajuste de histórico e principalmente a previsão do comportamento do reservatório.

**(MODELO BOM = MODELO QUE SE AJUSTA)**

**- O MODELO GEOLÓGICO É FUNDAMENTAL PARA A CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA**

A MAIORIA DAS FIGURAS APRESENTADAS FOI RETIRADA DA INTERNET OU FORAM GERADAS PELO PRÓPRIO AUTOR.

CITAÇÕES OU FIGURAS DE LIVROS / ARTIGOS ESTÃO IDENTIFICADAS.

ALGUMAS IMAGENS FORAM RETIRADAS E/OU MODIFICADAS DE APRESENTAÇÕES DOS SEGUINTE COLEGAS/GERÊNCIAS DA PETROBRAS: OLINTO GOMES DE SOUZA JUNIOR, MICHAEL STRUGALE, ANA PAULA BURGOA TANAKA, MARCOS MORETZSOHN, MARCO ANTONIO SCHREINER MORAES, LUCAS ALVES PAES GOMES, EQUIPE DE RESERVATÓRIOS DA UO-BC E E&P/PRESAL.

# FIM

