

Geomecánica en la industria petrolera

Damián Hryb



Abril 2024

Agenda

- Introducción y conceptos
- Realización de un modelo geomecánico 1D
- Diferencias modelo 1D respecto a 3D y 4D
- Aplicaciones:
 - Estabilidad de perforación
 - Fracturas naturales
 - Producción de arena
 - Almacenamiento subterráneo
 - Fractura hidráulica

Introducción

La **geomecánica** es la disciplina que estudia las características mecánicas de los materiales geológicos y el equilibrio de esfuerzos en el subsuelo.

Reduciendo costosos problemas en la perforación

Predicción de presión poral y presión de fractura
Análisis de estabilidad de pozo
Perforación en desbalance

Incrementando el rendimiento del reservorio

Producción de fracturas naturales
Predicción de producción de arena
Mejora en el diseño de la fractura hidráulica
Reduciendo los casos de corte de casing y colapso

Reducción de los riesgos de exploración

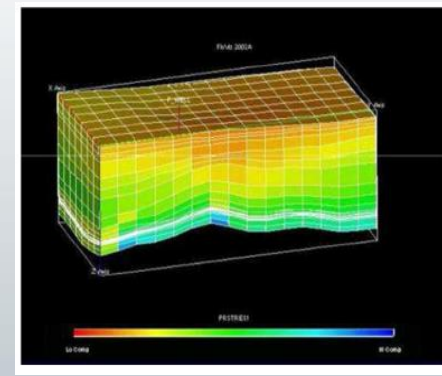
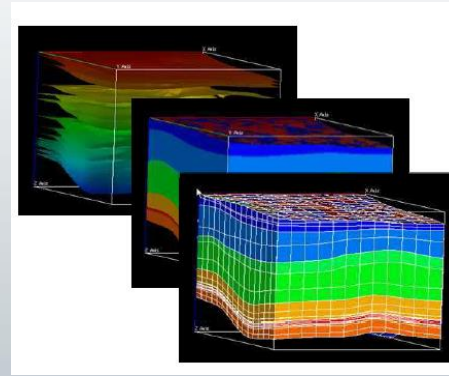
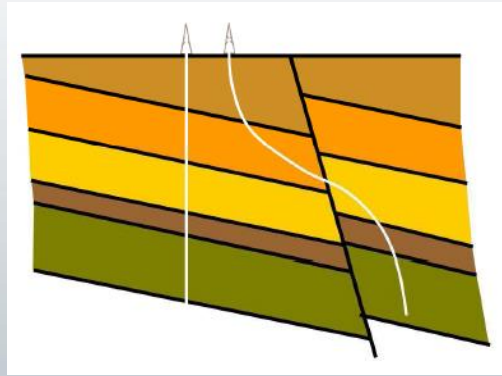
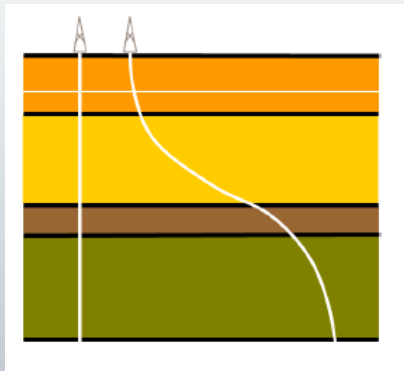
Análisis de fuga a través de fallas

Proyectos de almacenamiento subterráneo

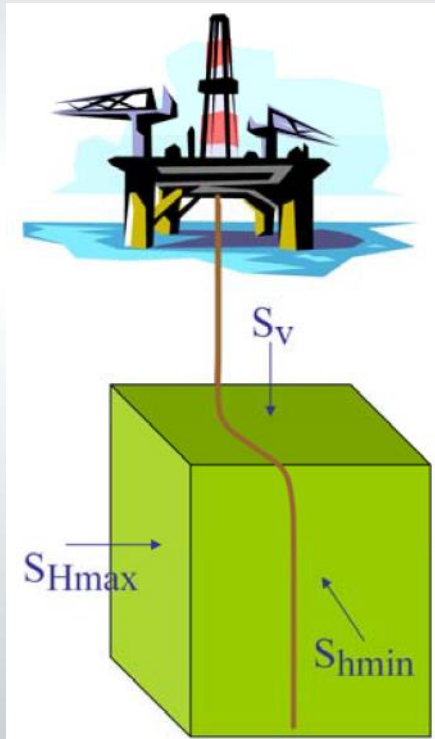
Definiendo la ventana de operación segura

Caracterización geomecánica del subsuelo

- Un modelo geomecánico es una representación numérica del estado mecánico del subsuelo y está compuesto por estimaciones de:
 - Propiedades mecánicas
 - Presión poral
 - Dirección y magnitud de esfuerzos
 - Mecanismos y criterios de falla
- Pueden ser de 1D a 4D



Caracterización geomecánica del subsuelo



S_v Sobrecarga
 S_{Hmax} Tensión horizontal máxima
 S_{hmin} Tensión horizontal mínima
 Dirección del esfuerzo horizontal máximo

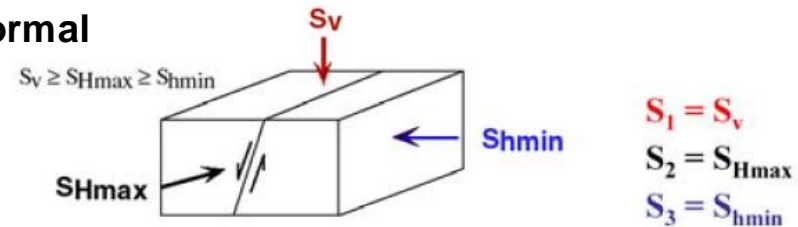
El estado de tensión queda definido generalmente conociendo 4 magnitudes independientes. En casos excepcionales es necesario conocer 6 magnitudes independientes como por ejemplo cerca de un domo salino.

Caracterización geomecánica del subsuelo

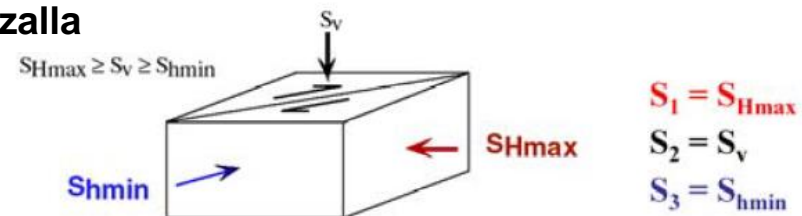
Los diferentes regímenes de tensión definen que tipo de fallas se producirían si la diferencia entre las tensiones es suficientemente grande

Regime/Stress	S_1	S_2	S_3
Normal	S_v	S_{Hmax}	S_{hmin}
Strike-Slip	S_{Hmax}	S_v	S_{hmin}
Reverse	S_{Hmax}	S_{hmin}	S_v

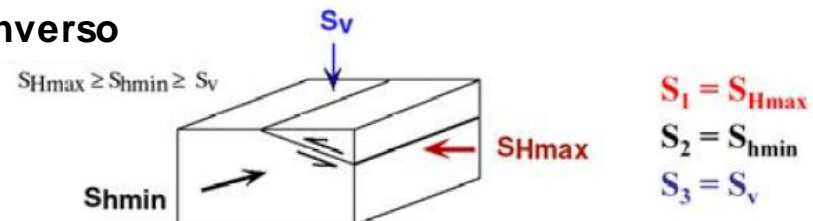
Normal



Cizalla



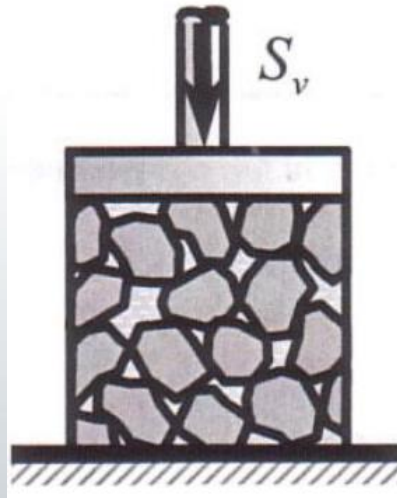
Inverso



Estado tensional en el subsuelo

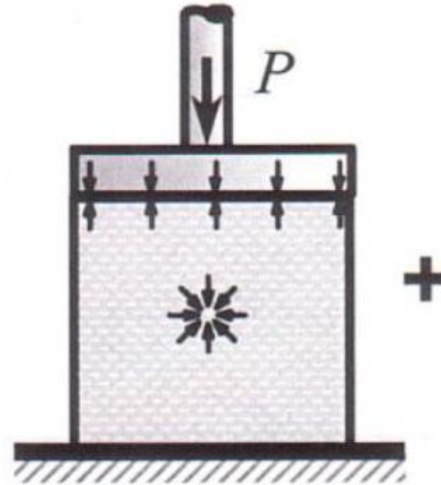
Tensión efectiva

Tensión total



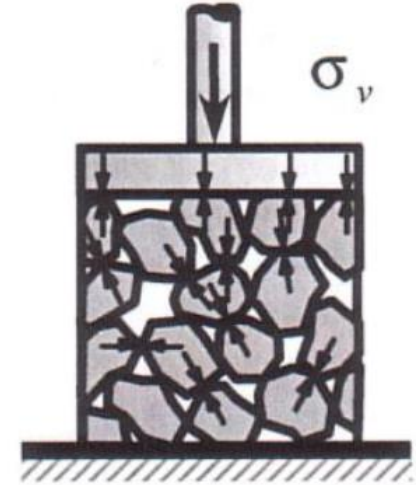
=

Presión poral



+

Tensión efectiva



Estado tensional en el subsuelo

Tensión efectiva

Para la mayoría de las rocas, un cambio en el esfuerzo total (o en la presión poral) no genera un cambio idéntico en el esfuerzo efectivo. Para tener en cuenta esto, el concepto de esfuerzo efectivo fue modificado por Maurice Biot (1941)

$$\sigma_{ij} = S_{ij} - \alpha \delta_{ij} P_p$$

↓

Coeficiente de Biot

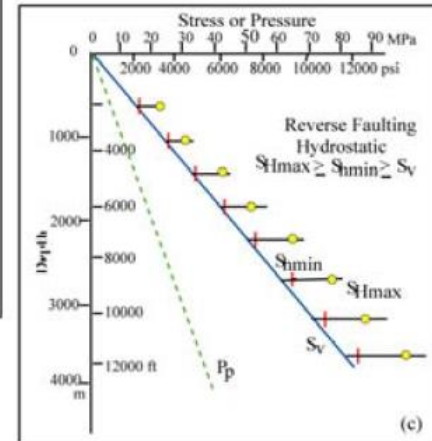
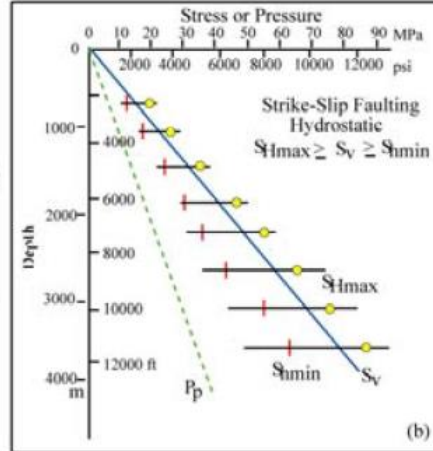
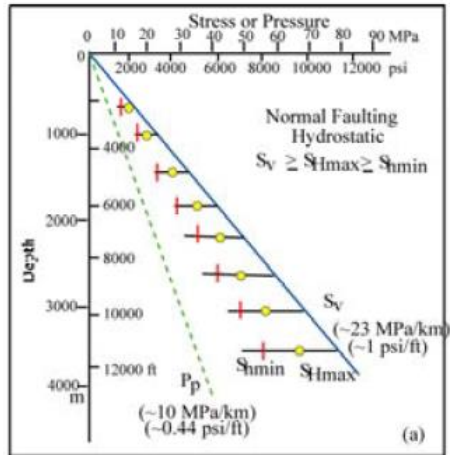
$$\left\{ \begin{array}{ll} 0 < \alpha < 1 & \text{rocas} \\ \alpha = 1 & \text{suelos} \end{array} \right.$$

Para una roca dada, el coeficiente de Biot varía en función de la tensión aplicada

Estado tensional en el subsuelo

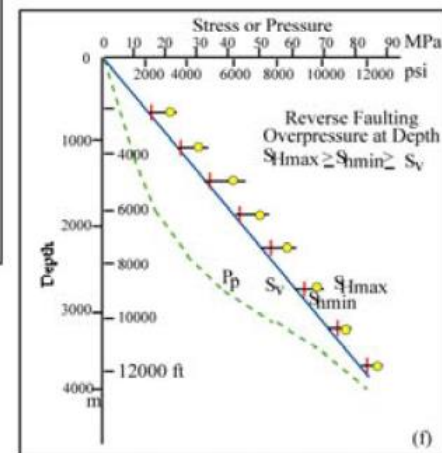
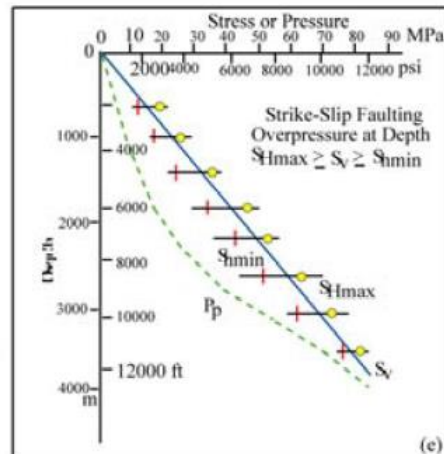
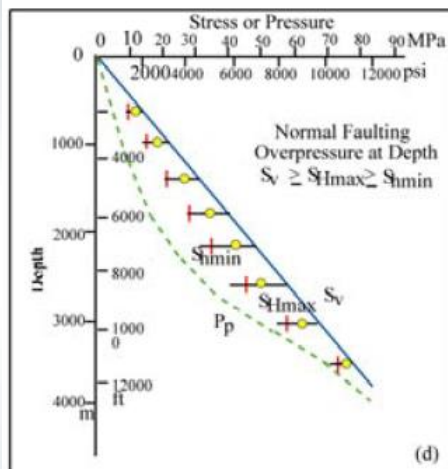
Estado tensional en el subsuelo

En una condición de presión hidrostática, generalmente se observan grandes diferencias entre los tres esfuerzos principales



Estado tensional en el subsuelo

Estado tensional en el subsuelo

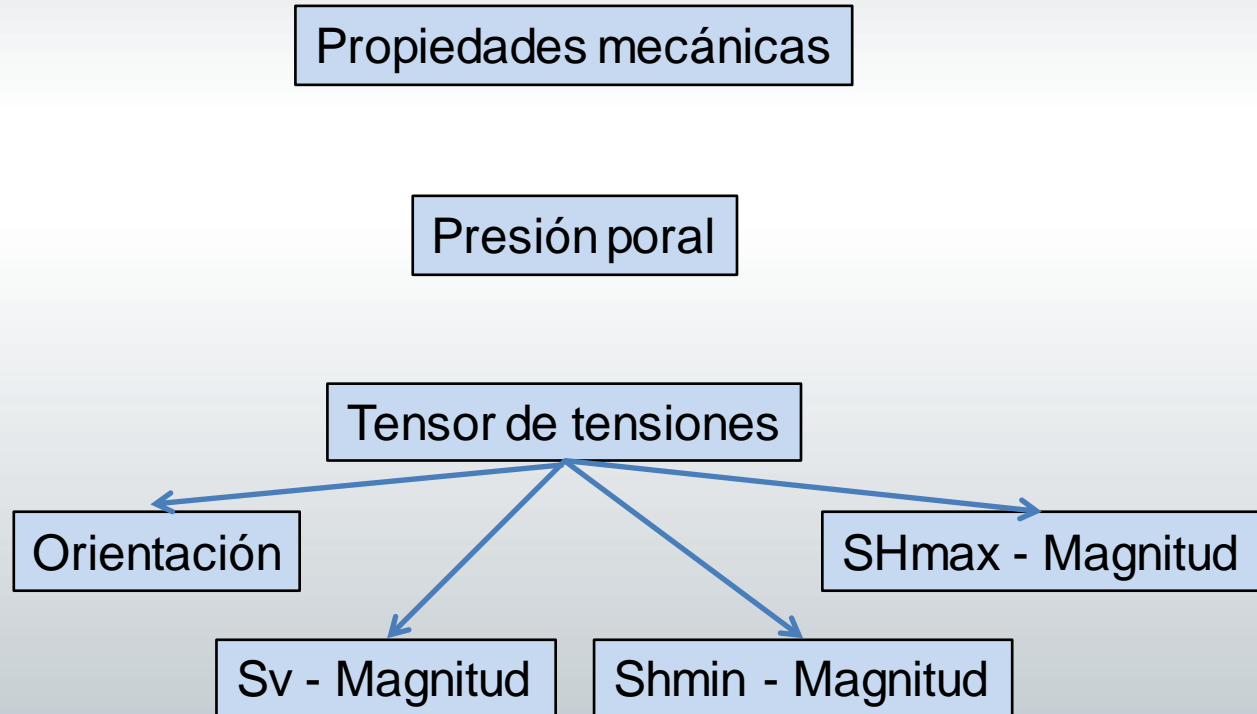
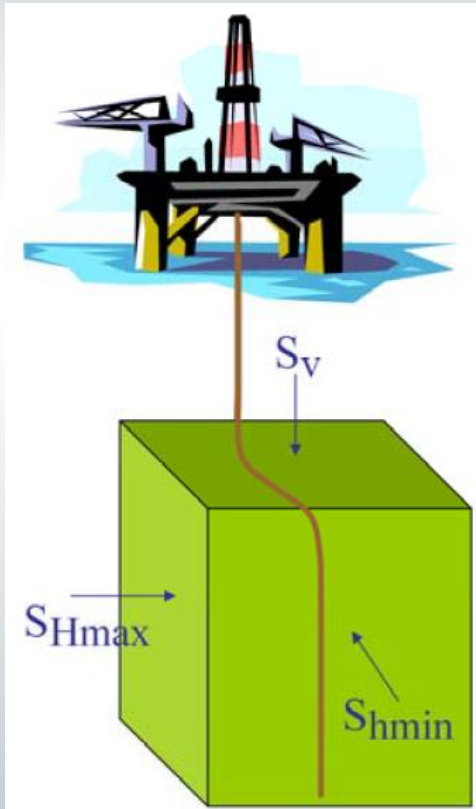


En una condición de sobrepresión, los esfuerzos horizontales se acercan al esfuerzo de sobrecarga. La diferencia entre los tres esfuerzos se hace muy pequeña.

Realización de un modelo geomecánico 1D

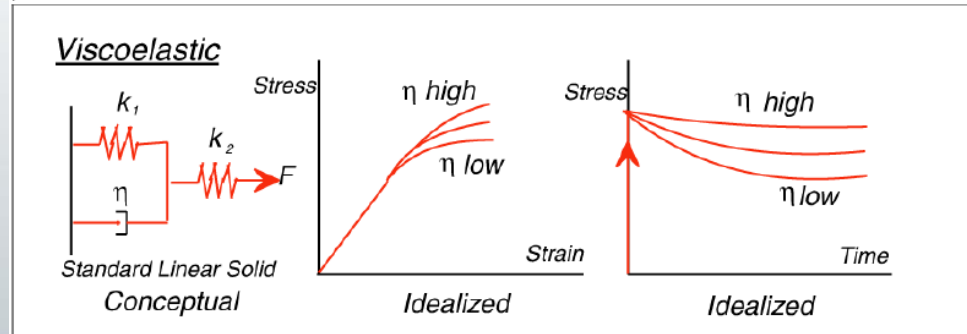
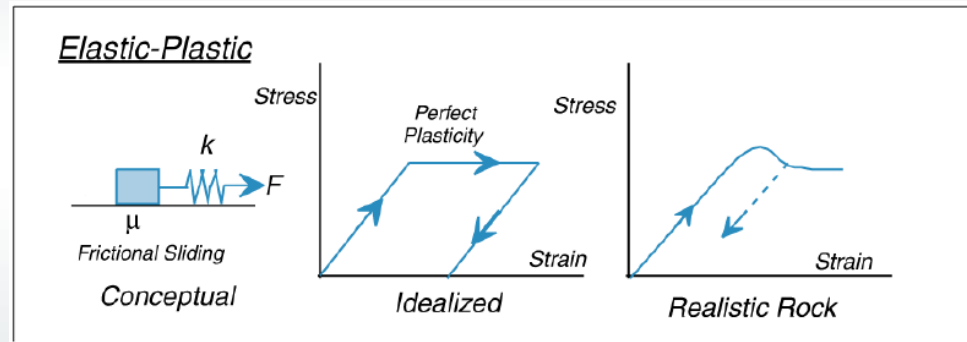
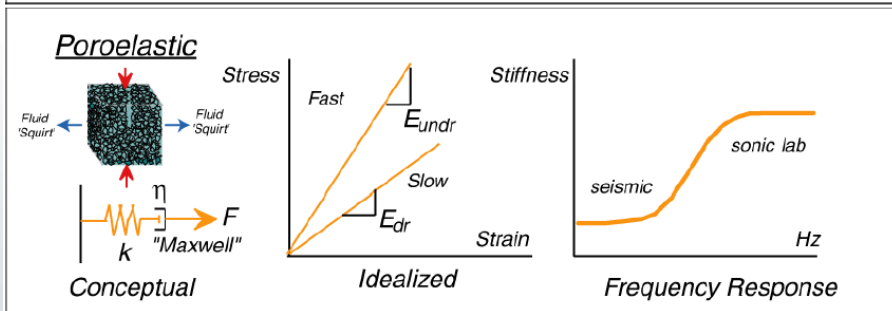
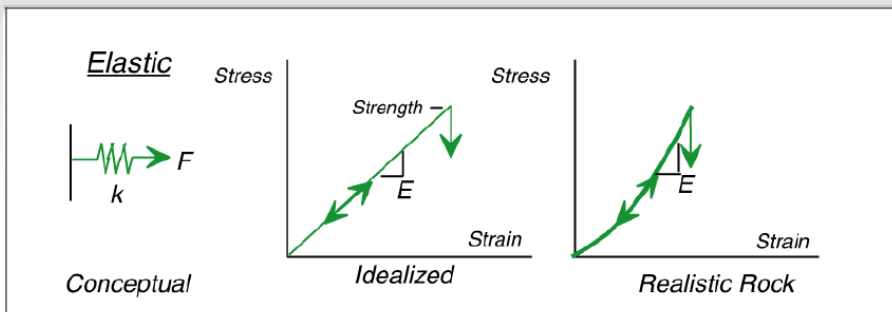
Realización de un modelo geomecánico 1D

¿Qué lo compone?



Realización de un modelo geomecánico 1D

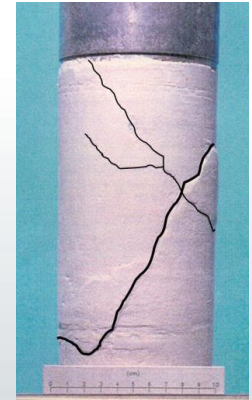
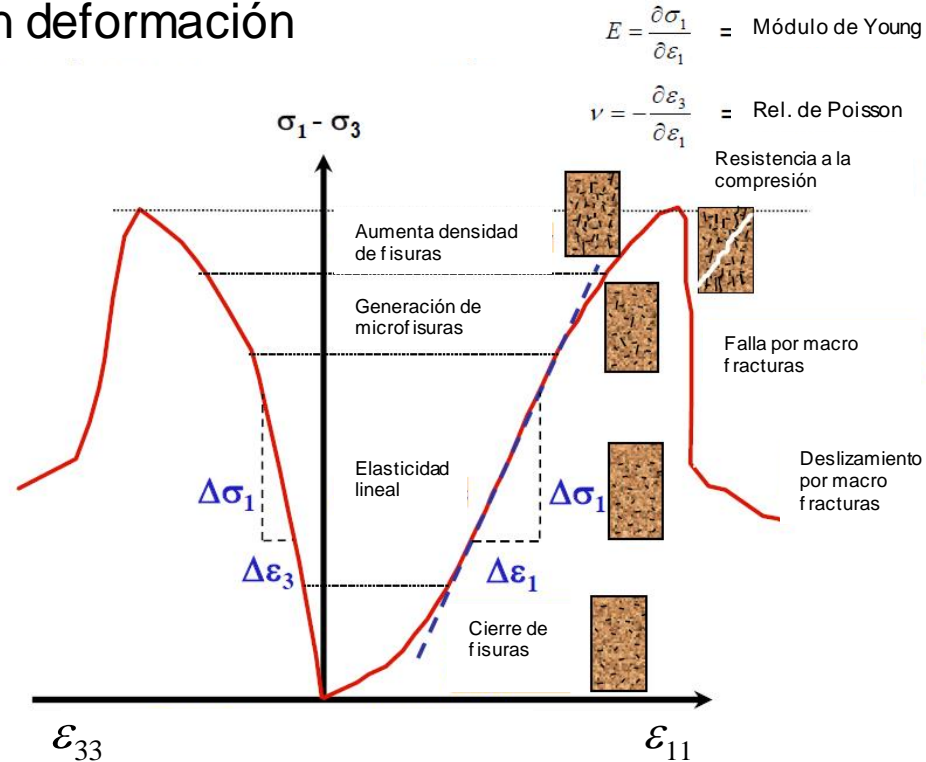
Propiedades mecánicas



Realización de un modelo geomecánico 1D

Propiedades mecánicas estáticas

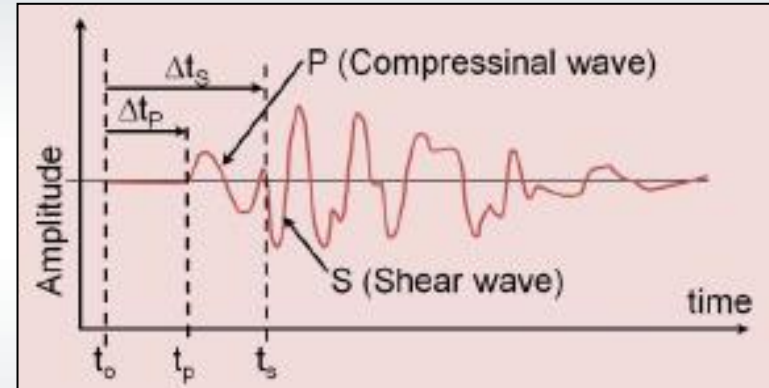
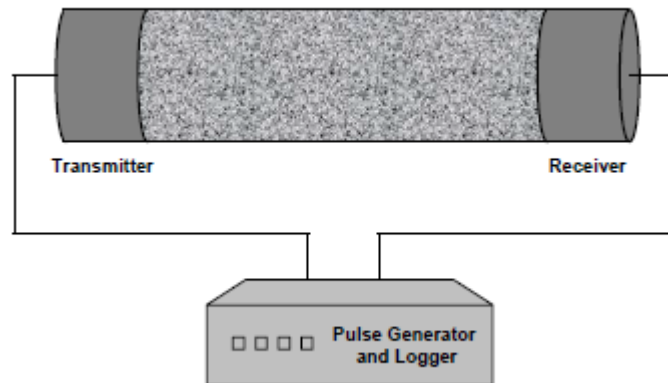
Curva típica tensión deformación



Realización de un modelo geomecánico 1D

Propiedades mecánicas dinámicas

Asume un material elástico, isotrópico y homogéneo.



$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

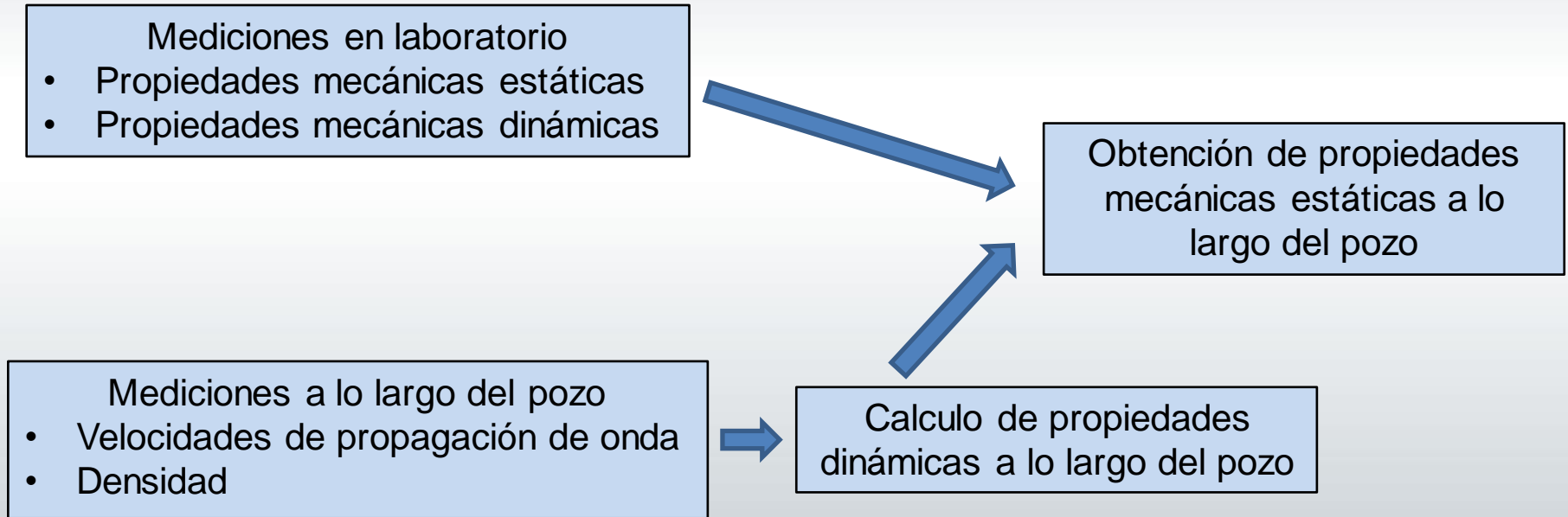
$$K = \rho V_p^2 - \frac{4\rho V_s^2}{3}$$

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)}$$

$$G = \rho V_s^2$$

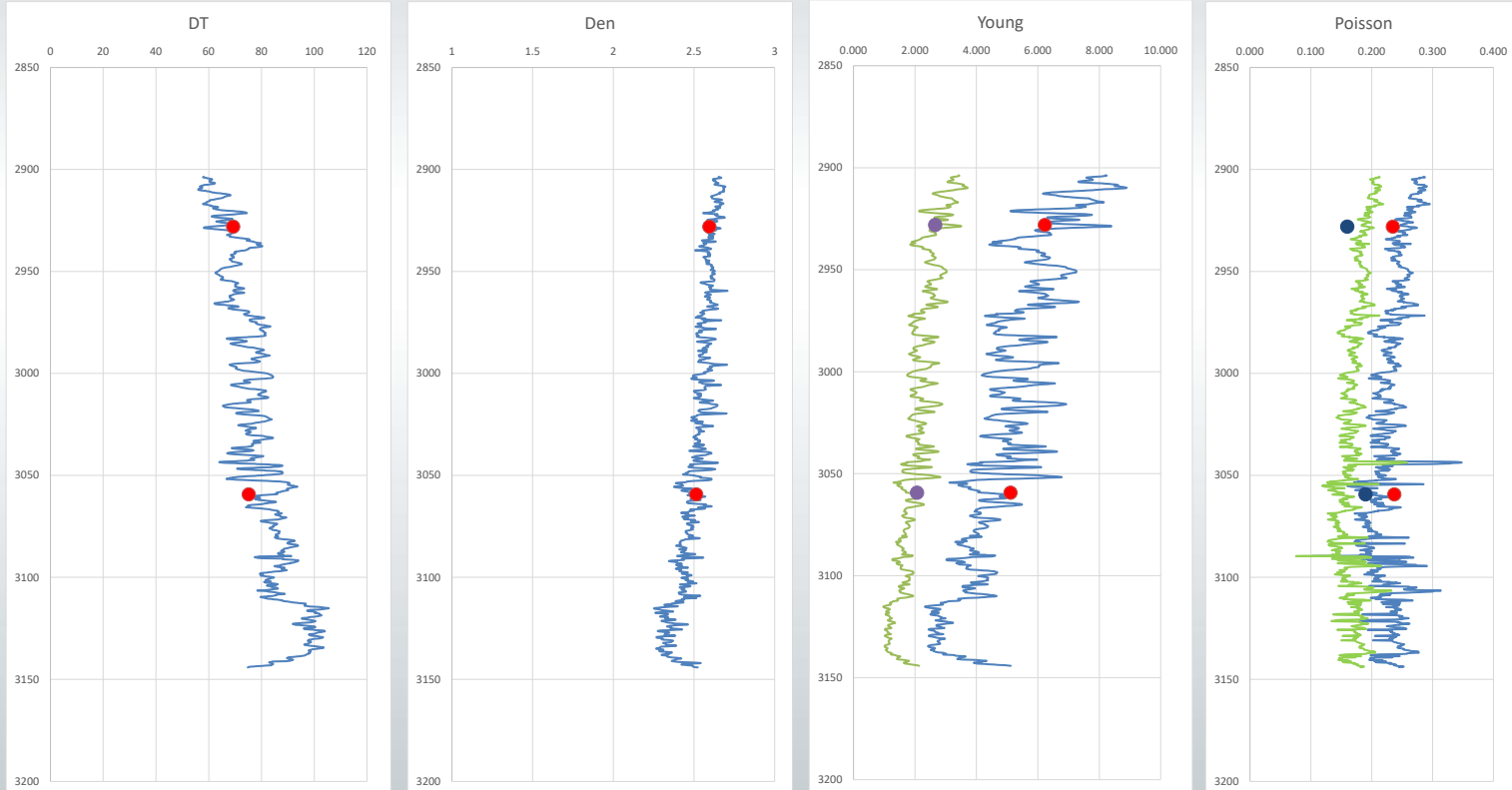
Realización de un modelo geomecánico 1D

Propiedades mecánicas



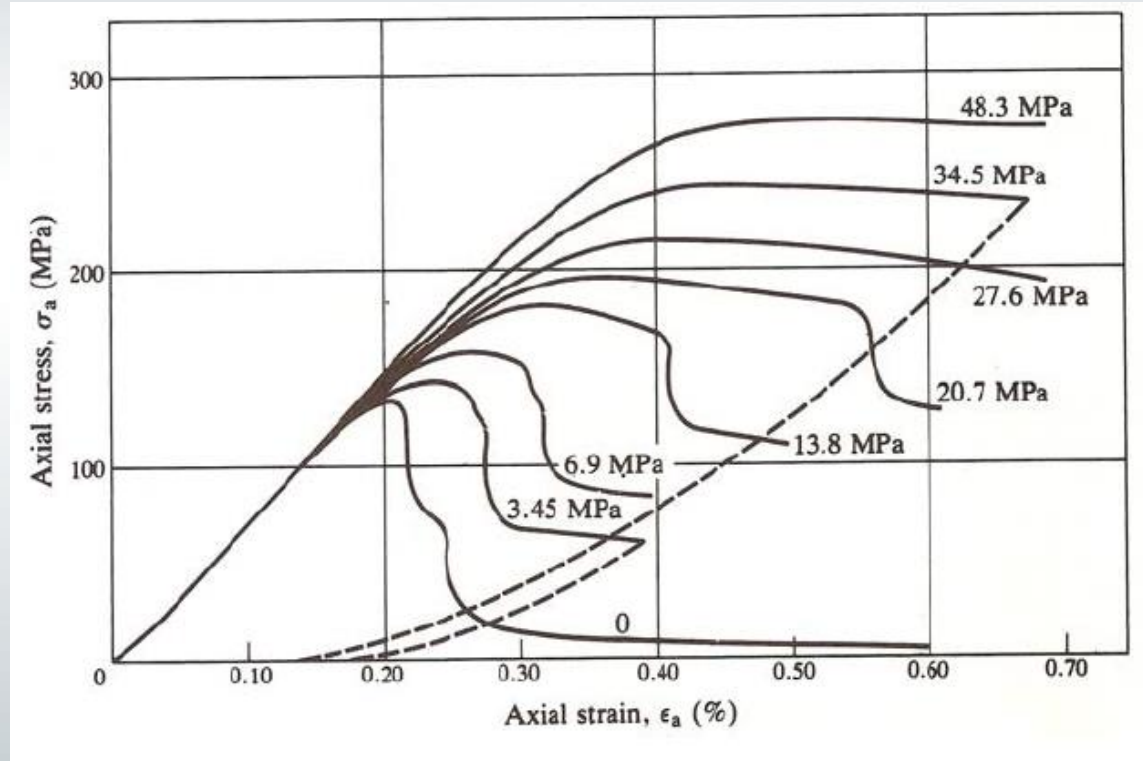
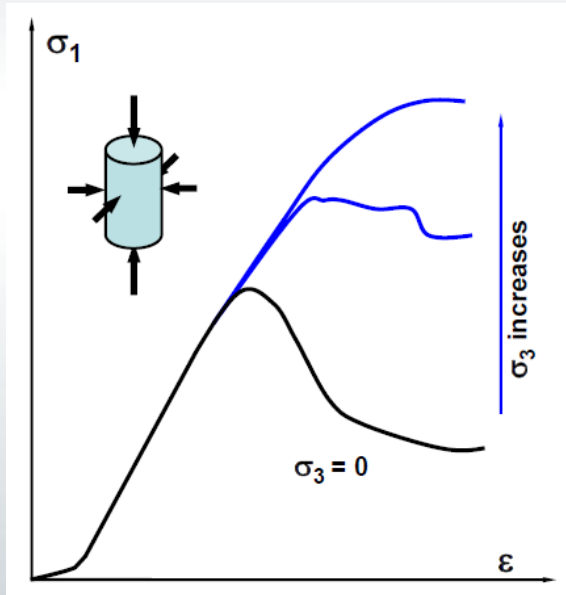
Realización de un modelo geomecánico 1D

Propiedades elásticas



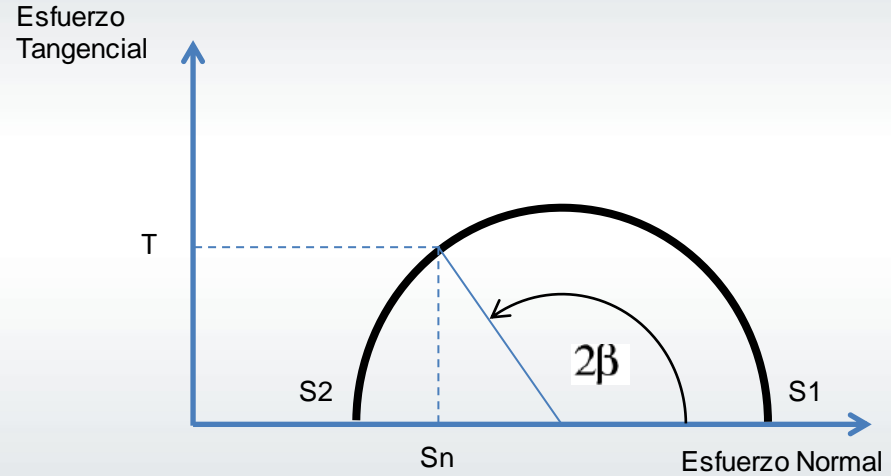
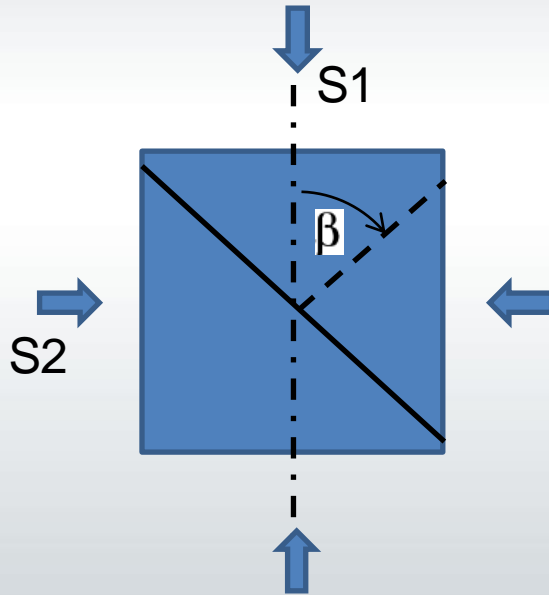
Realización de un modelo geomecánico 1D

Esfuerzo máximo a rotura



Realización de un modelo geomecánico 1D

Circulo de Mohr



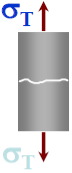
$$\tau = 0.5 (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta$$

$$\sigma_n = 0.5 (\sigma_1 + \sigma_3) + 0.5 (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta$$

Realización de un modelo geomecánico 1D

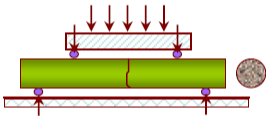
Propiedades mecánicas

Tracción directa $\sigma_T \uparrow$



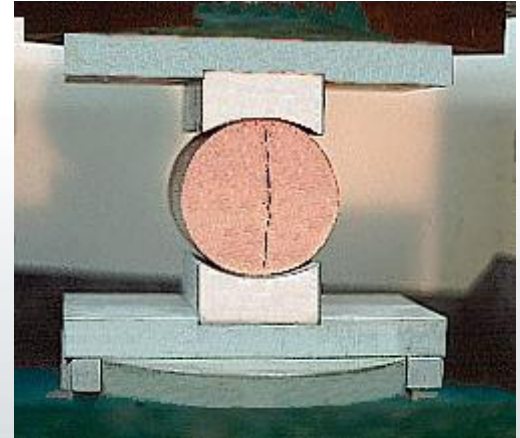
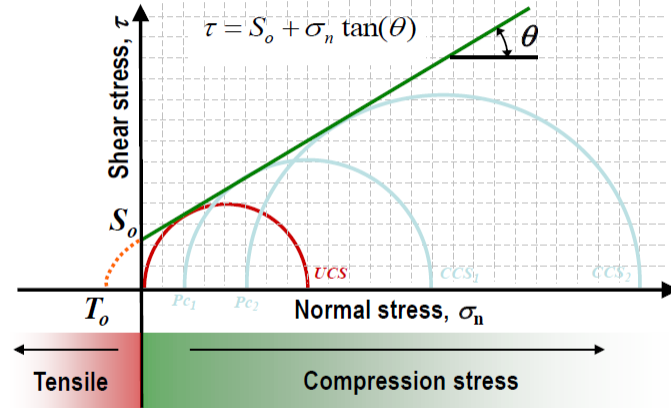
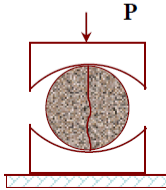
$$T_o = \sigma_{Tmax}$$

Flexión



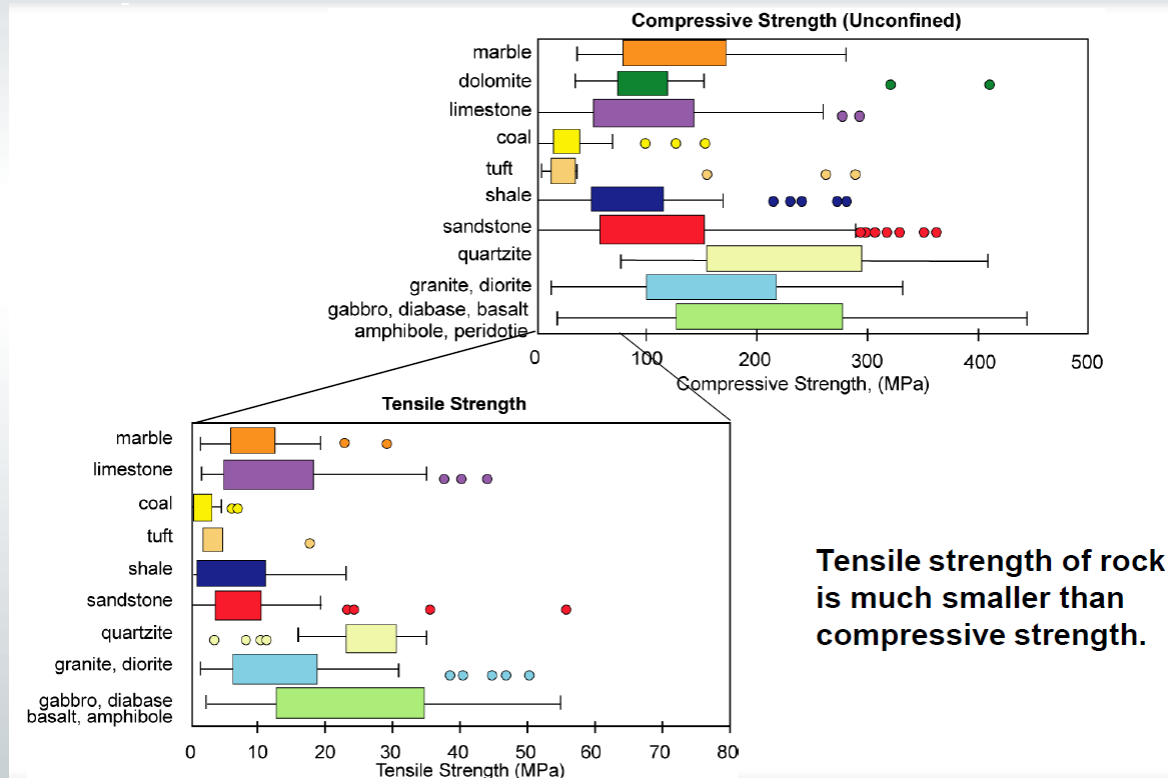
Brazilian test

$$T_o = \frac{2P_{max}}{\pi d}$$



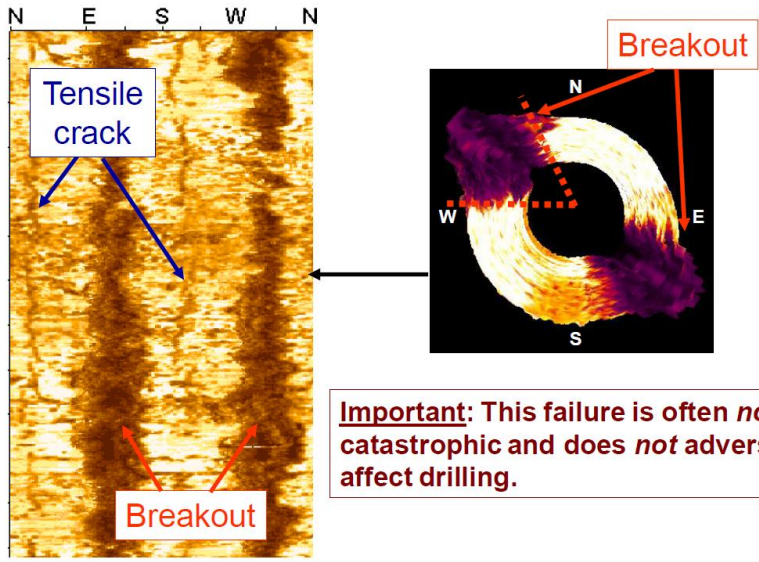
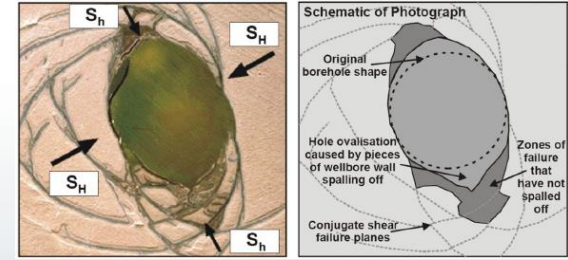
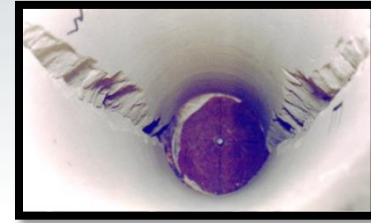
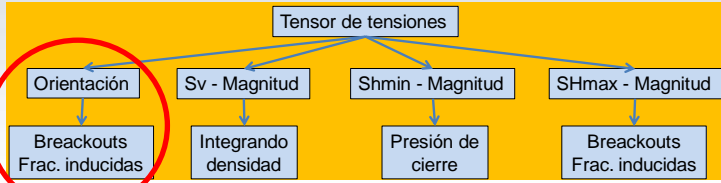
Realización de un modelo geomecánico 1D

Propiedades mecánicas

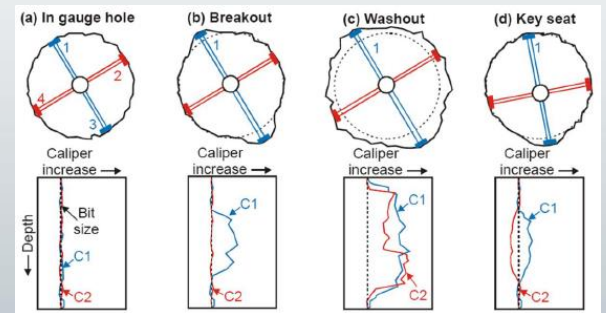


Realización de un modelo geomecánico 1D

Orientación de esfuerzos

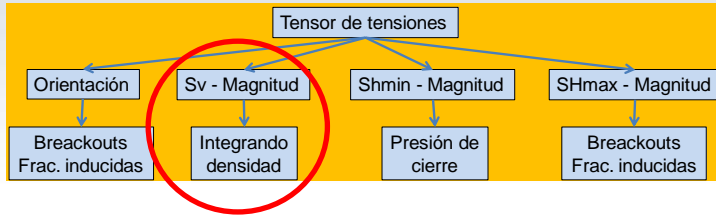


Important: This failure is often *not* catastrophic and does *not* adversely affect drilling.



Realización de un modelo geomecánico 1D

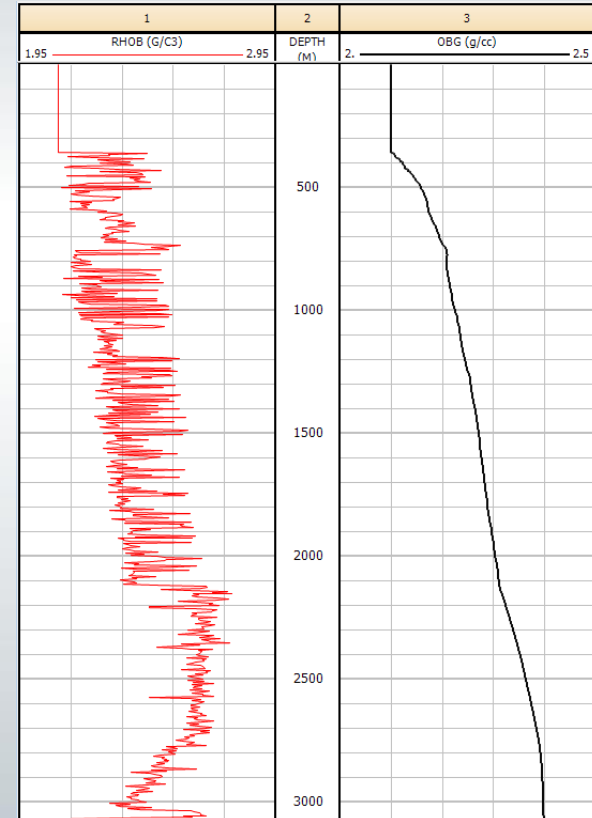
Esfuerzo de sobrecarga



$$\sigma_v = \int_0^{\text{Prof}} \rho_b g dz = 0.433 \sum \rho_b \Delta z$$

$\rho_b = \text{densidad [g / cc]}$

$\Delta z = \text{espesor [pie]}$



Realización de un modelo geomecánico 1D

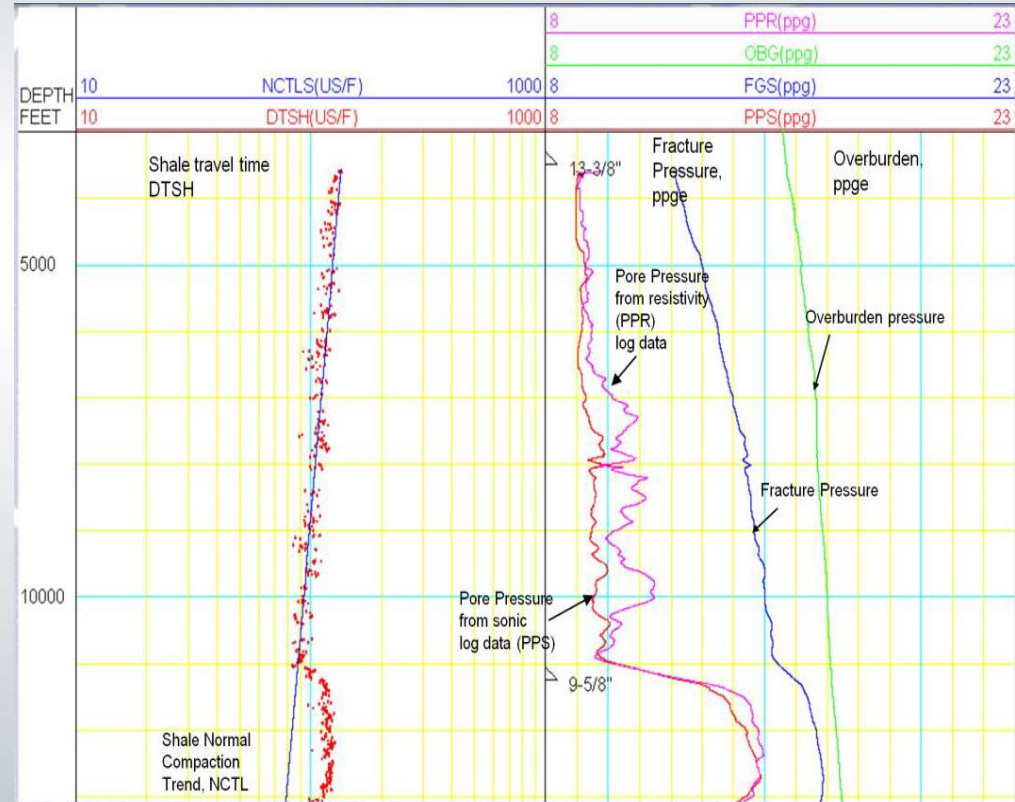
Presion poral

El método asume que la variación de la velocidad (resistividad o densidad) son debidas a variaciones en la presión poral. Se pueden hacer correcciones por efectos de otras variables:

- Litología
- Fluidos
- Anisotropía
- Temperatura

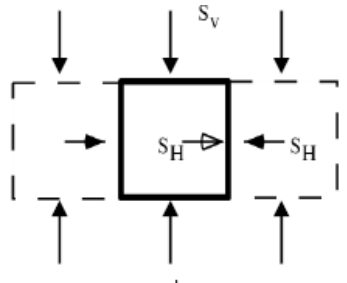
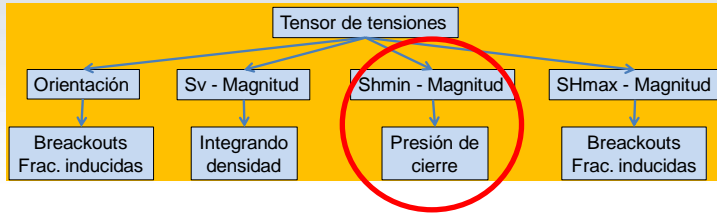
$$P = S_v - (S_v - P_{hidr}) \cdot \left(\frac{R_{log}}{R_n} \right)^{1.2}$$

$$P = S_v - (S_v - P_{hidr}) \cdot \left(\frac{\Delta T_n}{\Delta T_{log}} \right)^{3.0}$$



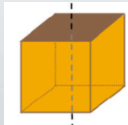
Realización de un modelo geomecánico 1D

Magnitud de Shmin

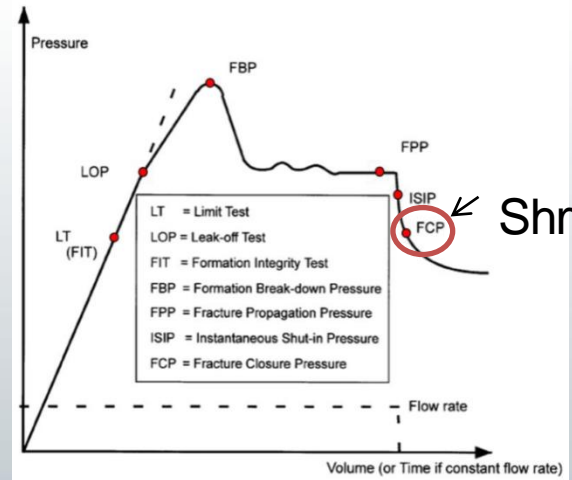
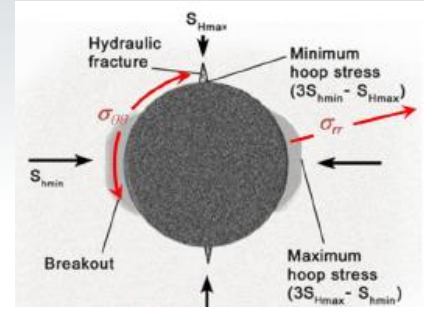
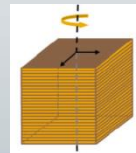


- Considera material elástico lineal, homogéneo e isotrópico desde que se comenzó a aplicar el S_v hasta la actualidad
- $S_h = S_H$
- S_v aplicado en forma instantánea

$$\sigma_{h\min} = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P) + \alpha P + [\epsilon_x + \nu \epsilon_y] \frac{E}{1-\nu^2}$$



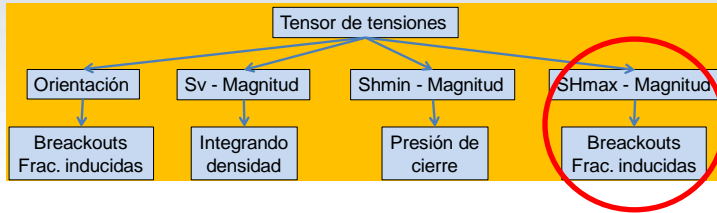
$$\sigma_{h\min} = \frac{\nu_V}{1-\nu_H} (\sigma_{vert} - \alpha_{vert} P_{por}) + \alpha_{hor} P_{por} + \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_y + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \epsilon_x$$



Shmin

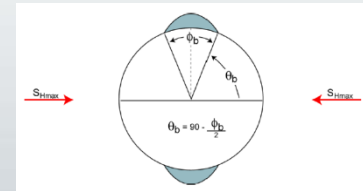
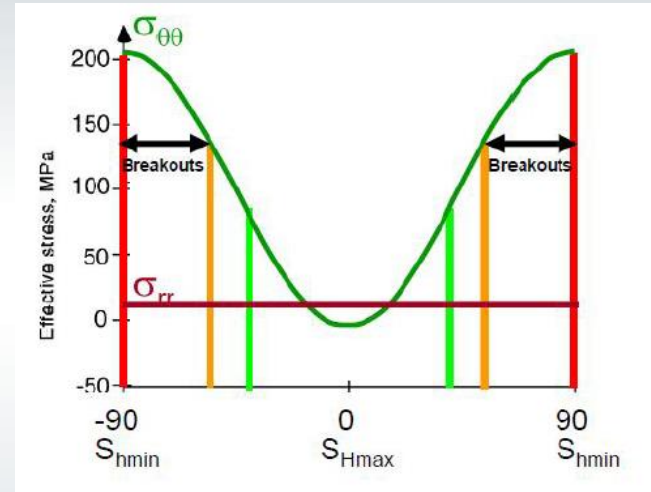
Realización de un modelo geomecánico 1D

Magnitud de SHmax



$$\sigma_{Hmax} = \beta \cdot \sigma_{hmin}$$

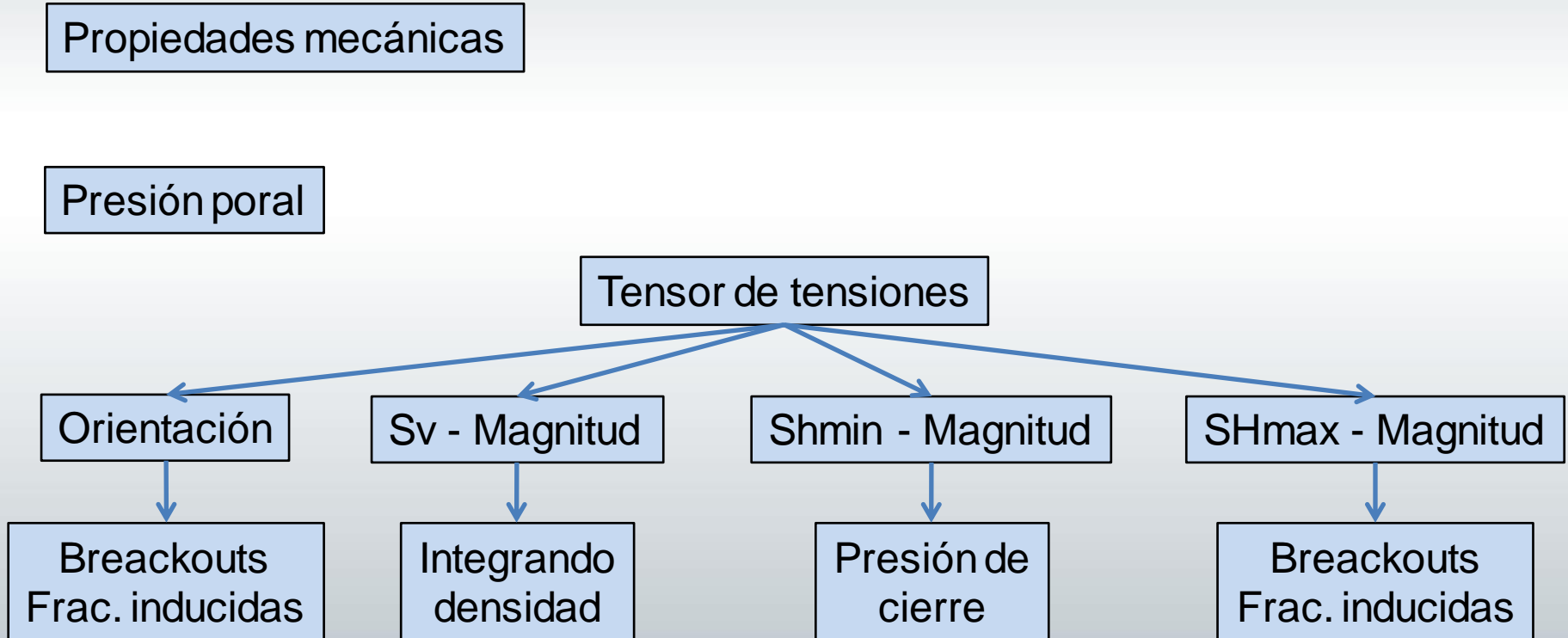
$$\sigma_{Hmax} = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P) + \alpha P + [\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x] \frac{E}{1-\nu^2}$$



$$S_{Hmax} = \frac{(C_{eff} + P_p + P_{Mud} + \sigma^{\Delta T}) - S_{hmin} (1 + 2 \cos 2\theta_b)}{1 - 2 \cos 2\theta_b}$$

Realización de un modelo geomecánico 1D

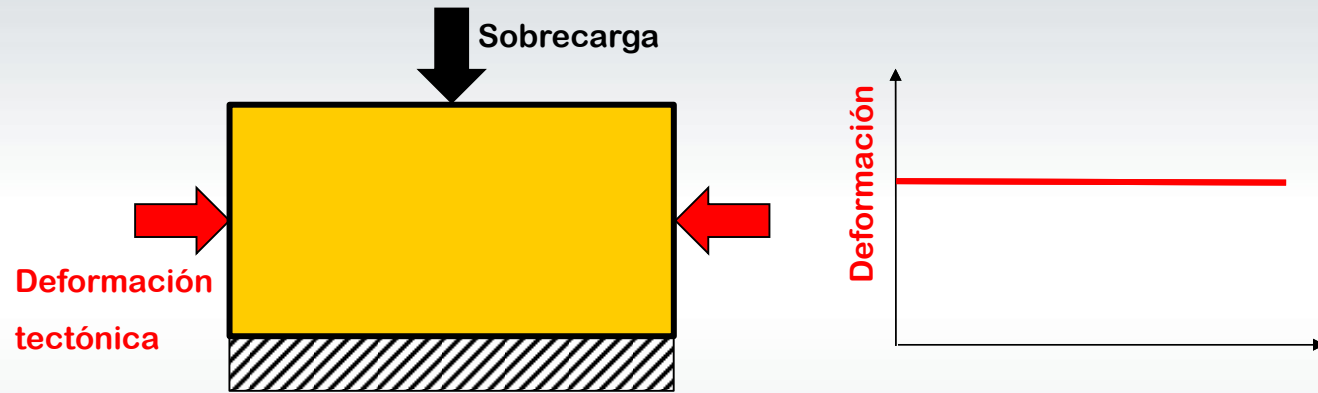
En resumen



Realización de un modelo geomecánico 3D

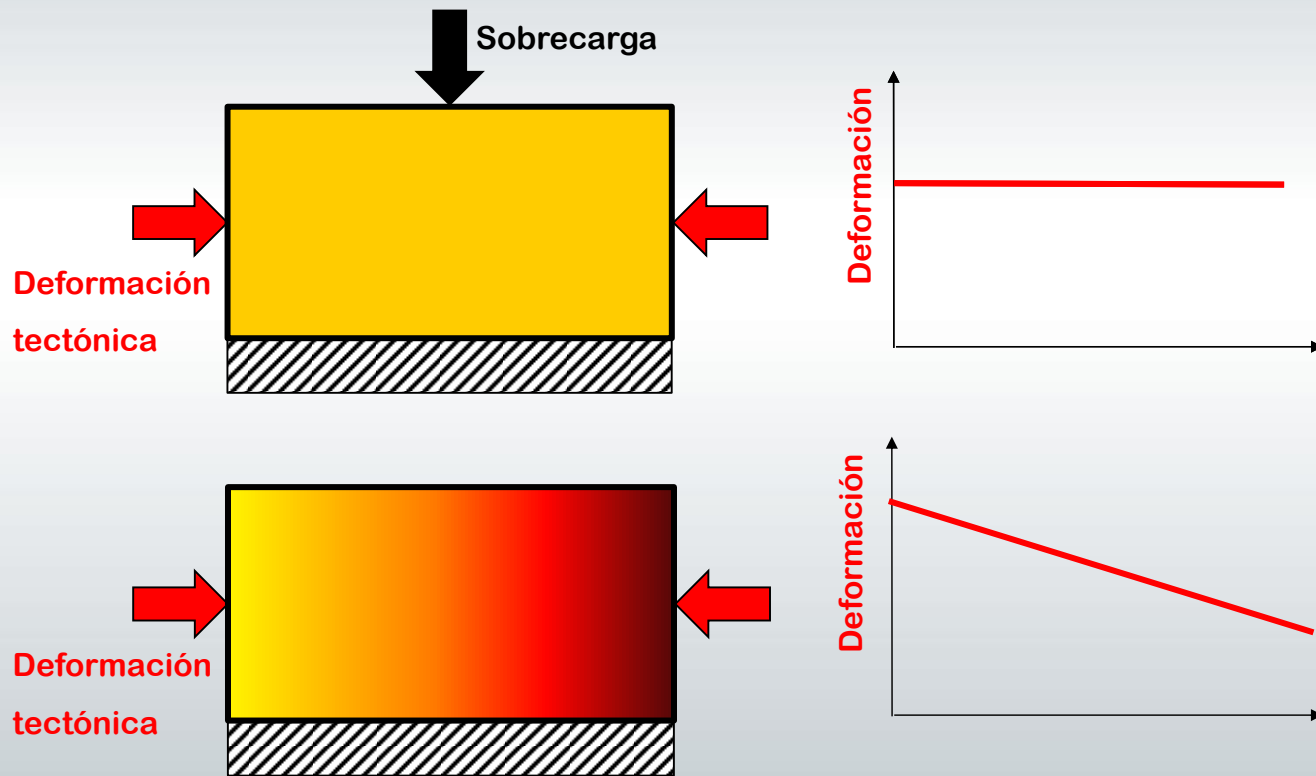
Realización de un modelo geomecánico 3D

Diferencias respecto al modelo 1D



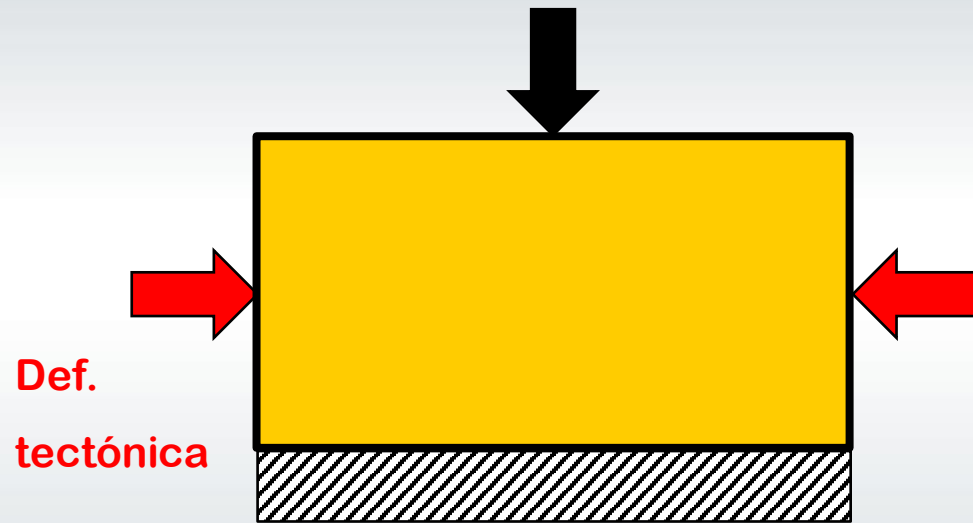
Realización de un modelo geomecánico 3D

Diferencias respecto al modelo 1D



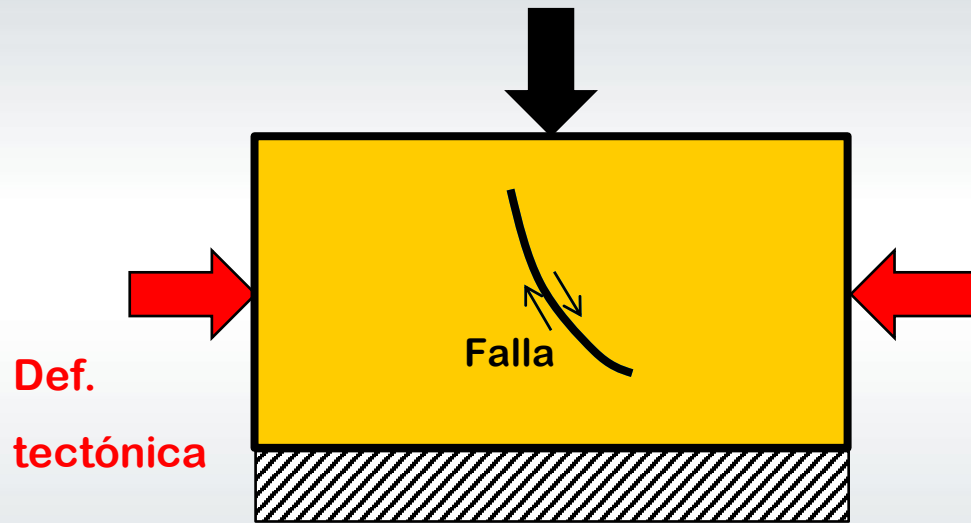
Realización de un modelo geomecánico 3D

Diferencias respecto al modelo 1D



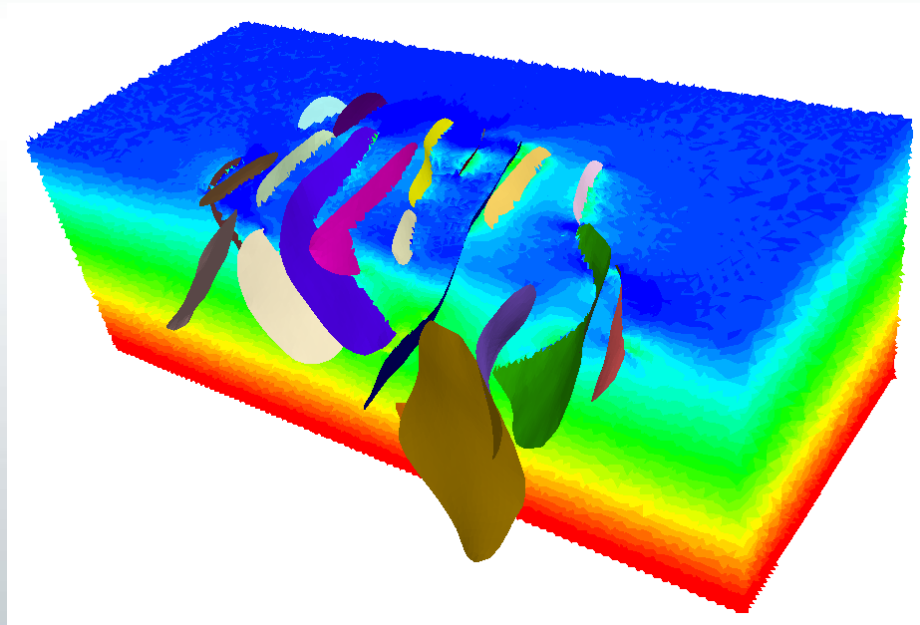
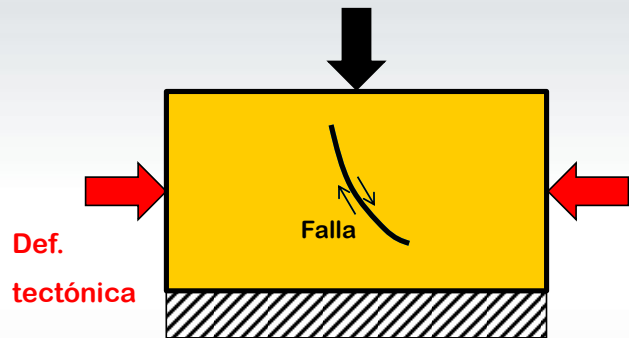
Realización de un modelo geomecánico 3D

Diferencias respecto al modelo 1D



Realización de un modelo geomecánico 3D

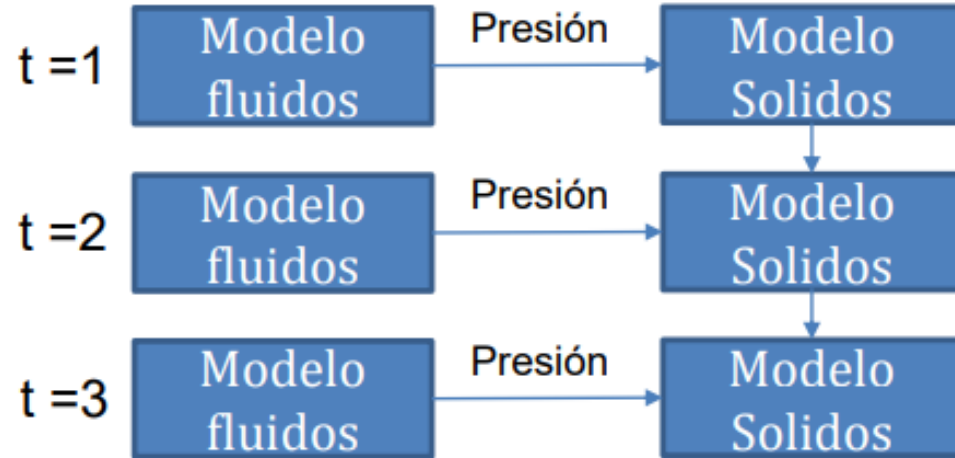
Diferencias respecto al modelo 1D



Modelo geomecánico 4D

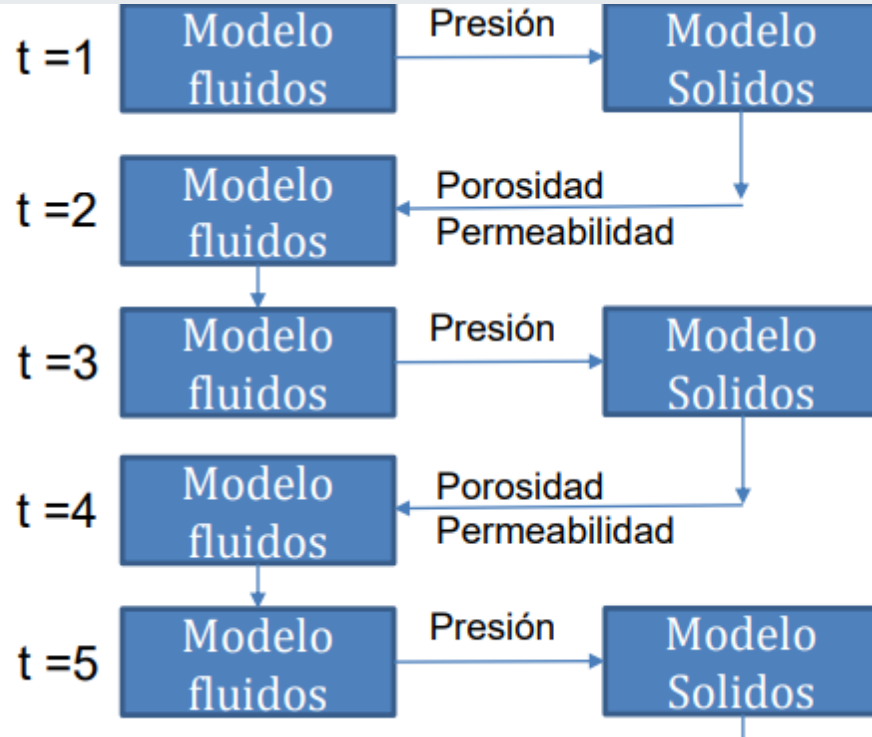
Realización de un modelo geomecánico 4D

- Acoplamiento 1D



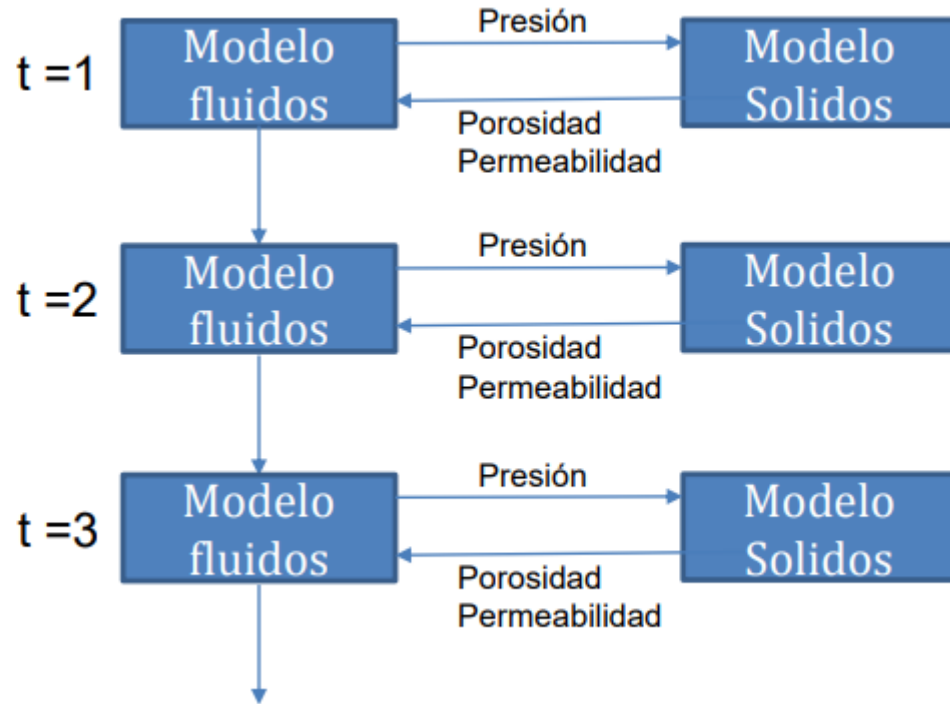
Realización de un modelo geomecánico 4D

- Acoplamiento 2D
 - Porosidad
 - Permeabilidad



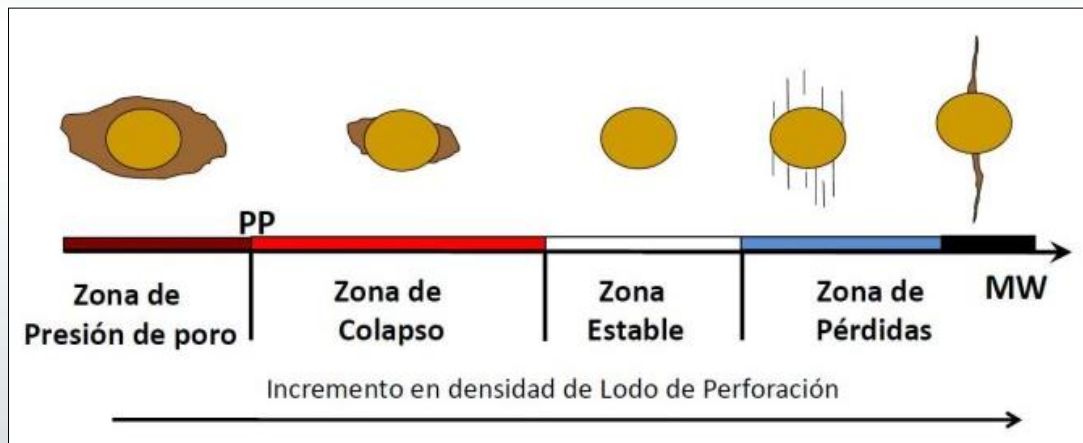
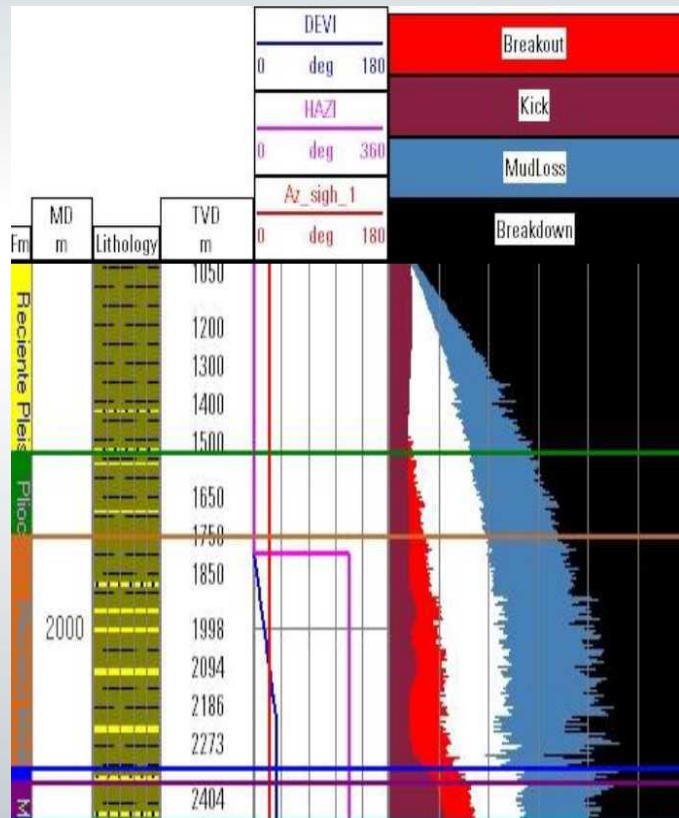
Realización de un modelo geomecánico 4D

- Acoplamiento 2D
 - Porosidad
 - Permeabilidad



Estabilidad de perforación

Estabilidad de perforación



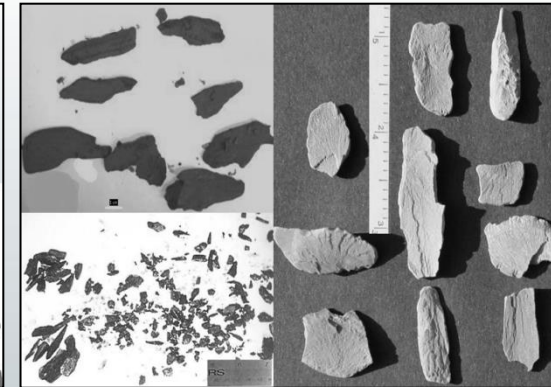
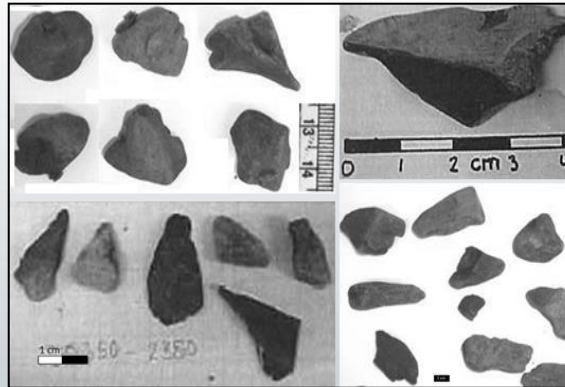
Derrumbes o cavings

¿Que es un derrumbe?

Los derrumbes (*cavings*), son todos aquellos fragmentos de rocas, que no son cortados por el trépano.

Los derrumbes presentan formas variadas y sus dimensiones oscilan desde unos pocos milímetros hasta el orden de los centímetros.

Usualmente provienen de lutitas (*shale*).



Diferentes tipos de derrumbes

Fracturas naturales

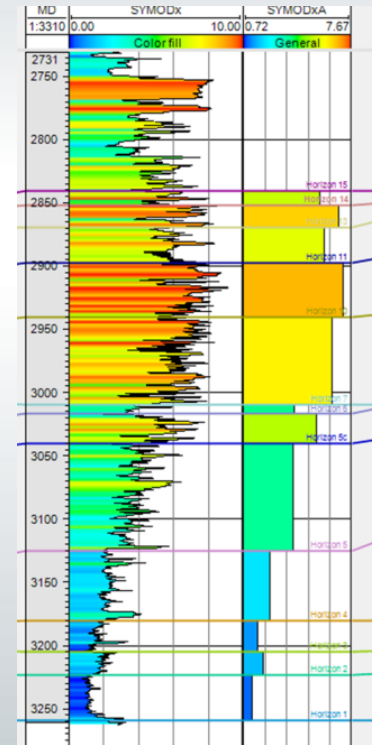
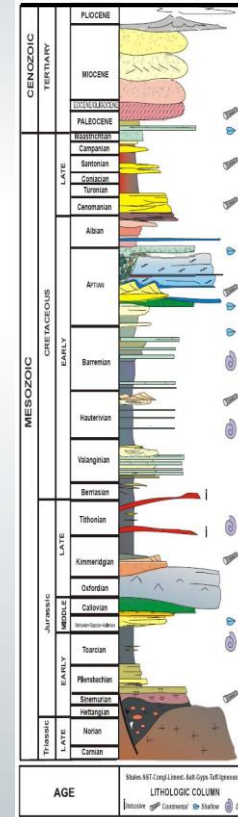
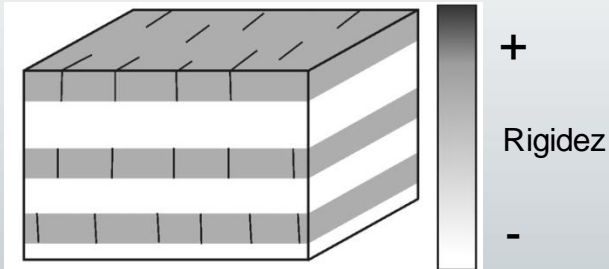
Estratigrafía mecánica y de fracturas naturales

Estratigrafía mecánica

Estratigrafía mecánica es la subdivisión de la columna de roca en intervalos discretos basada en las propiedades mecánicas de dichos intervalos.

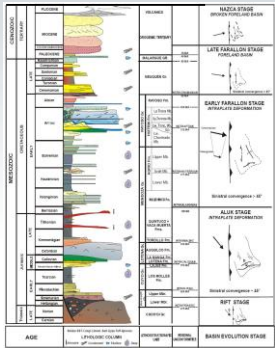
El crecimiento de las fracturas está influenciada por:

- Propiedades mecánicas
- Espesor de las unidades
- Propiedades de las interfaces entre unidades

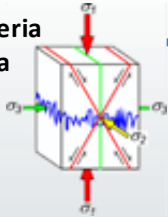


Modelado de fracturas naturales

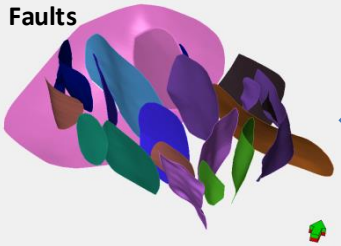
Tectonics events



Failure criteria rock data

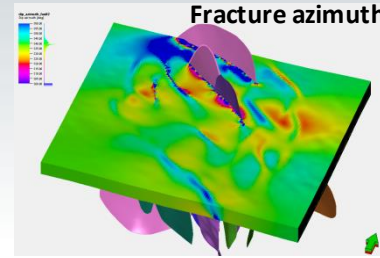


Faults

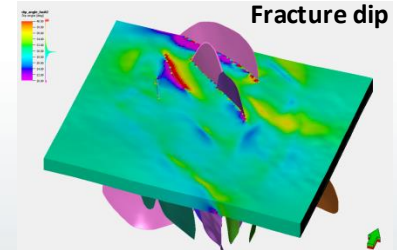


Modelado
numérico
geomecánico

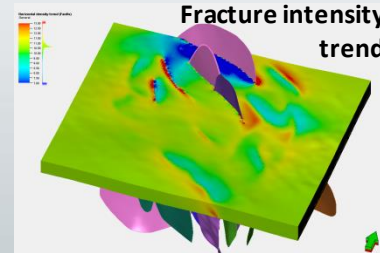
Fracture azimuth



Fracture dip

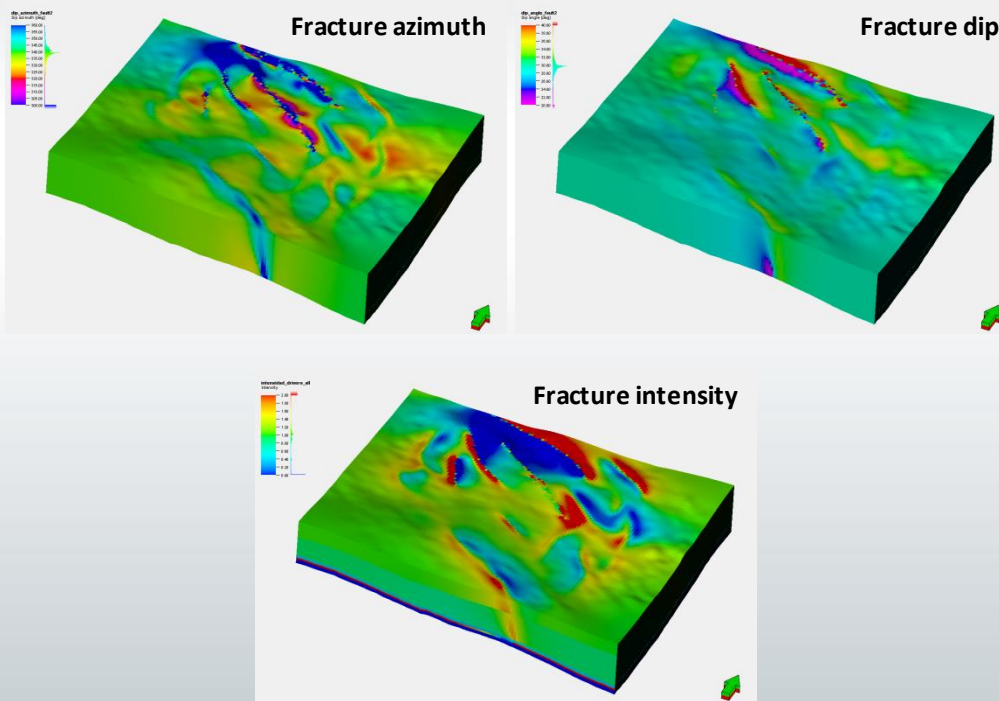


Fracture intensity trend

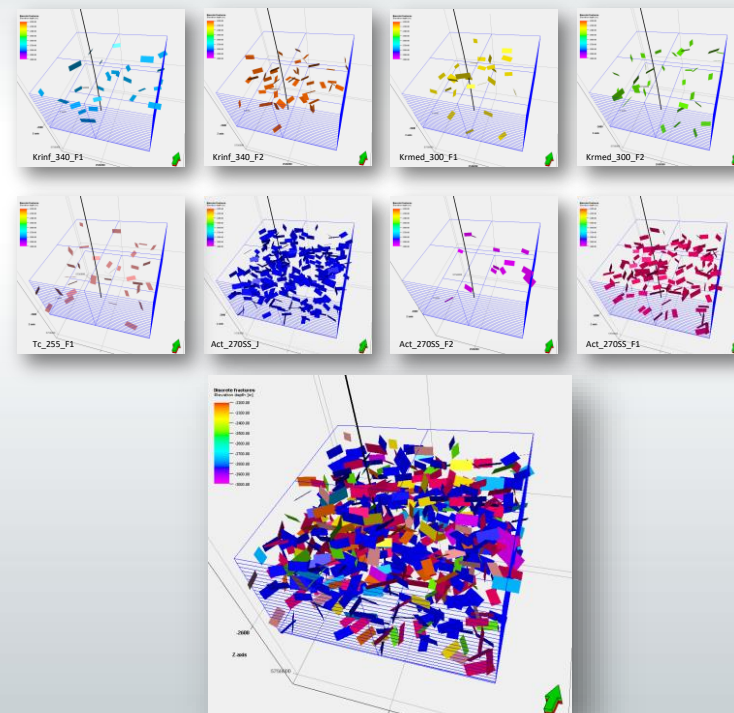


Modelado de fracturas naturales

Grids for each fracture family

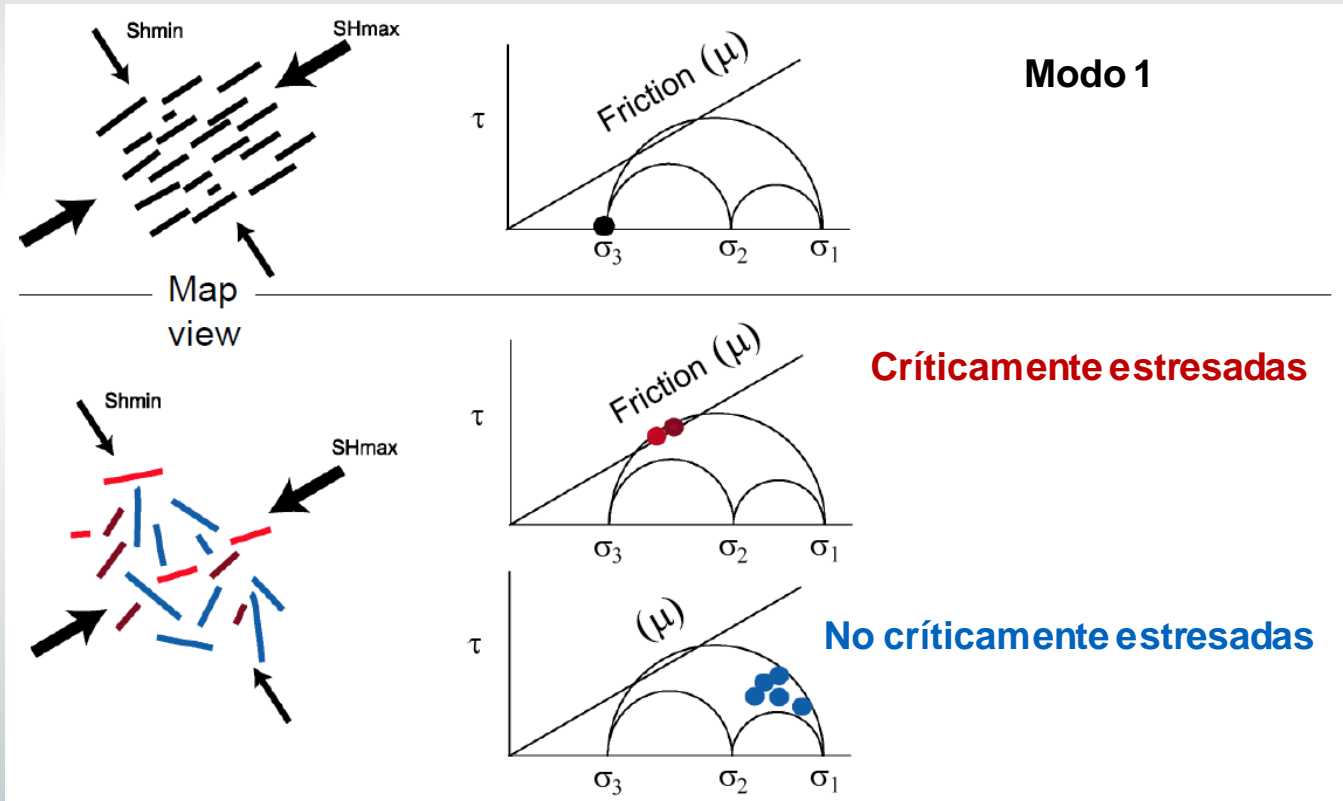


DFN at well scale



Reactivación de fracturas naturales

Fracturas críticamente estresadas



Producción de arena

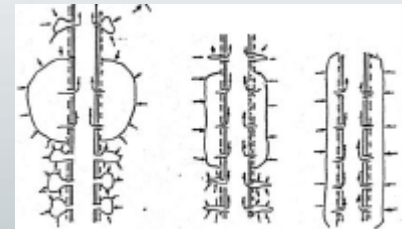
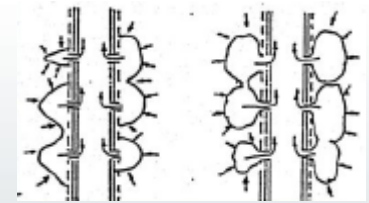
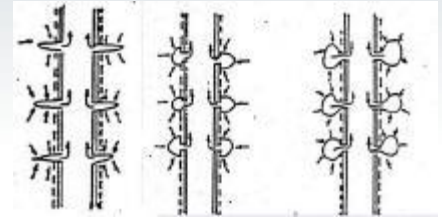
Producción de arena

La producción de arena es:

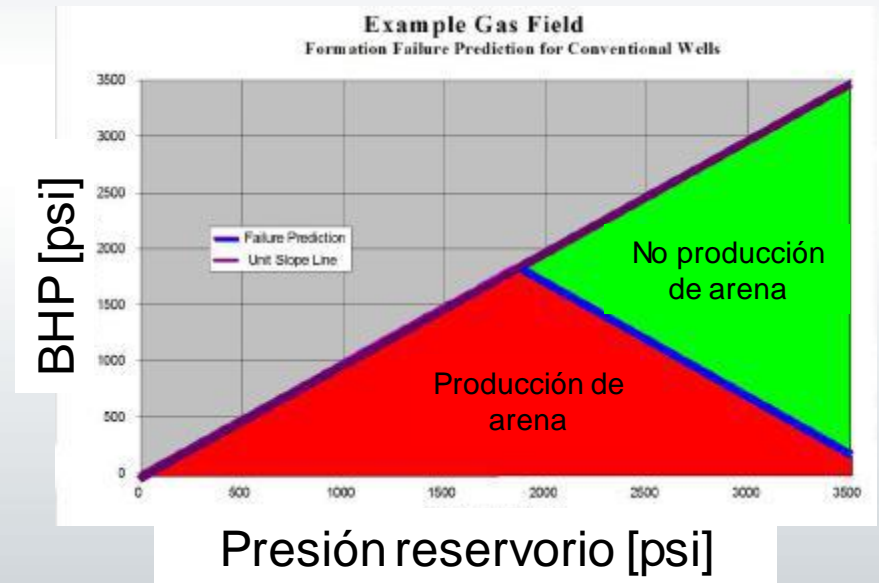
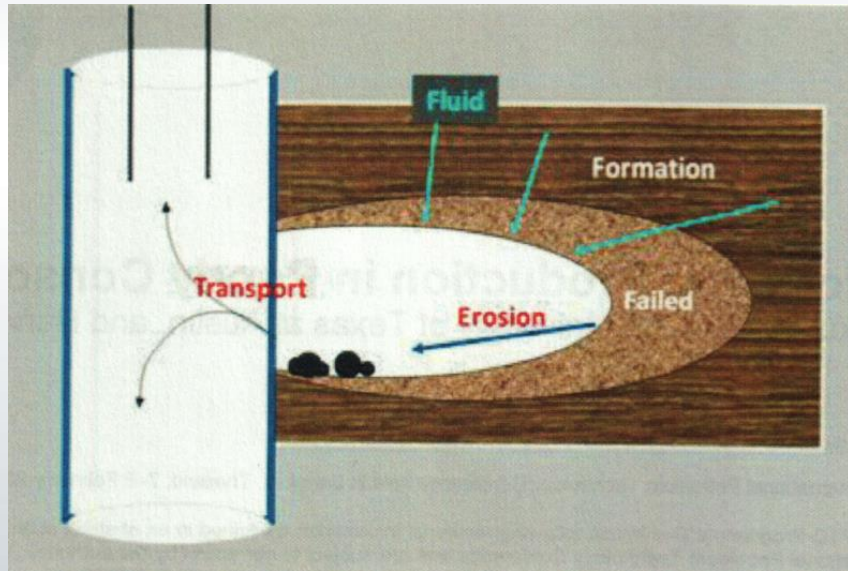
- La formación productiva falla
- Dicha roca fallada fluye hacia adentro del pozo
- Luego es producida hasta la superficie en conjunto con el hidrocarburo e ingresa a las instalaciones de superficie

Los modos de falla de la roca incluyen:

- Falla por corte (alto esfuerzo, baja presión en el pozo, baja resistencia de la roca)
- Falla por tracción y erosión (altos caudales)

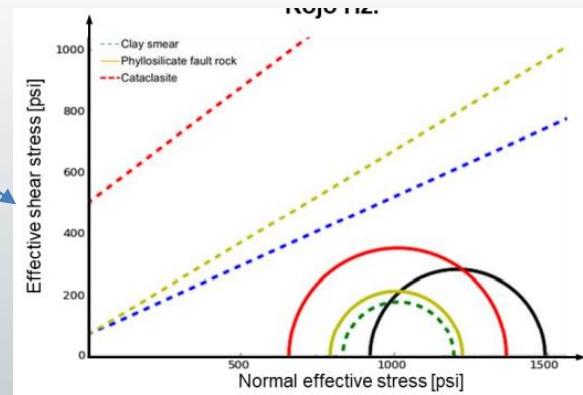
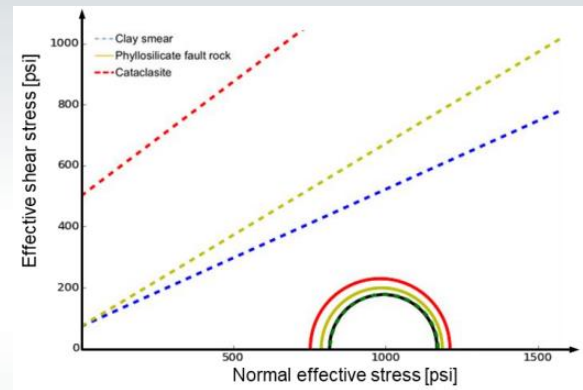
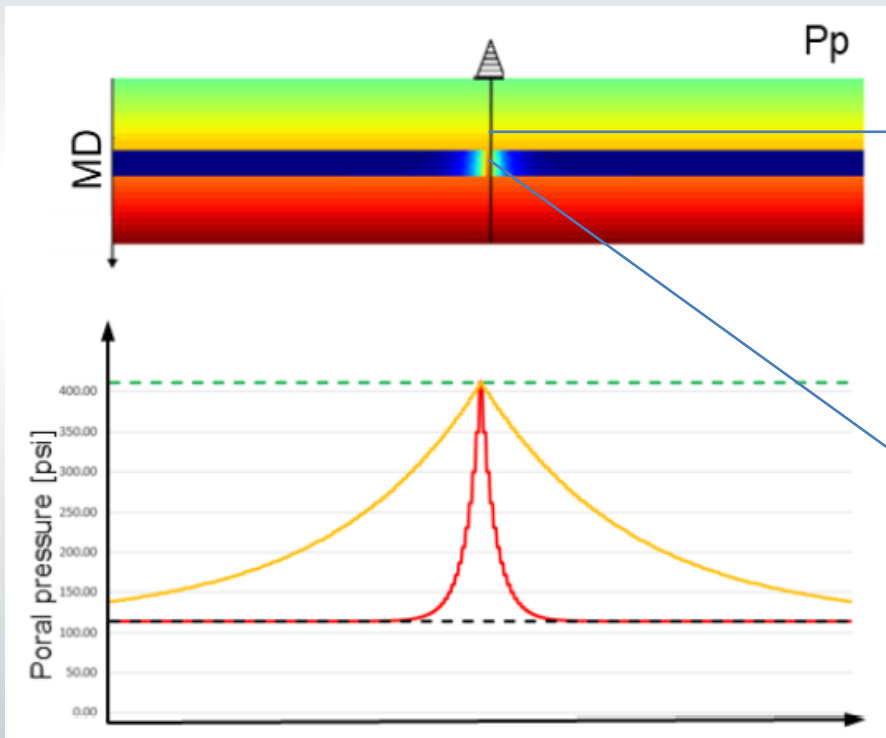


Producción de arena



Almacenamiento subterráneo

Almacenamiento subterráneo



Fractura hidráulica

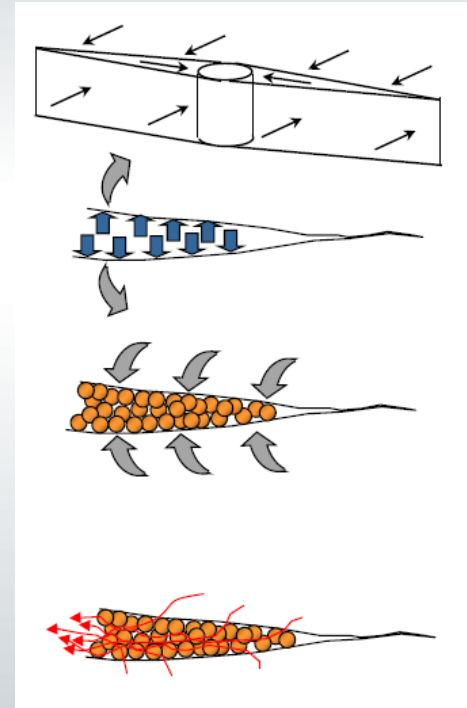
Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

Objetivo: Crear mayor superficie expuesta y un camino de muy alta conductividad hacia el pozo

La roca se fractura bombeando fluido a alta presión y caudal.

La fractura hidráulica se mantiene abierta utilizando un material granular denominado agente de sostén.

El hidrocarburo fluye desde la formación productiva hacia adentro de la fractura hidráulica a través de las paredes de la misma. Luego fluye a través de empaque de agente de sostén hacia el pozo.



Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

Las tensiones presentes y las propiedades mecánicas del subsuelo controlan y afectan fuertemente la fractura:

- En su azimut
- En su orientación (vertical u horizontal)
- En su altura y ancho
- En la presión de tratamiento
- En la conductividad del empaque del agente de sostén

Es también importante conocer la dureza de la formación para elegir el agente de sostén ya que a menos dureza los granos del agente de sostén penetran más fácilmente en la cara de la fractura lo que implica una pérdida de conductividad en el tiempo y por lo tanto producción.

La relación entre los 3 esfuerzos puede ser:

- $\sigma_v > \sigma_{Hmax} > \sigma_{hmin}$ fractura vertical, condición más frecuente.
- $\sigma_{Hmax} > \sigma_v > \sigma_{hmin}$ fractura vertical.
- $\sigma_{Hmax} > \sigma_{hmin} > \sigma_v$ fractura horizontal, condición muy poco frecuente.

Cuanto mayor es el módulo de young de la roca, menor será el ancho de la fractura.

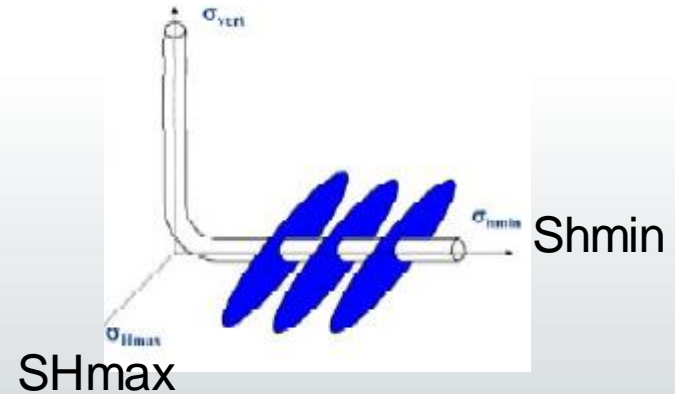
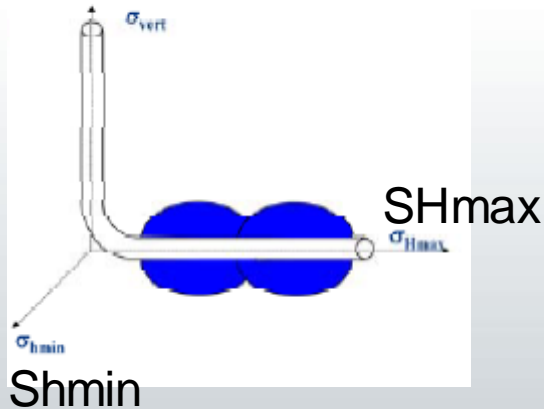
Con formaciones más dura, se necesita mayor presión neta para obtener el ancho deseado.

El contraste de propiedades y esfuerzos entre formaciones adyacentes puede ayudar a contener la fractura.

Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

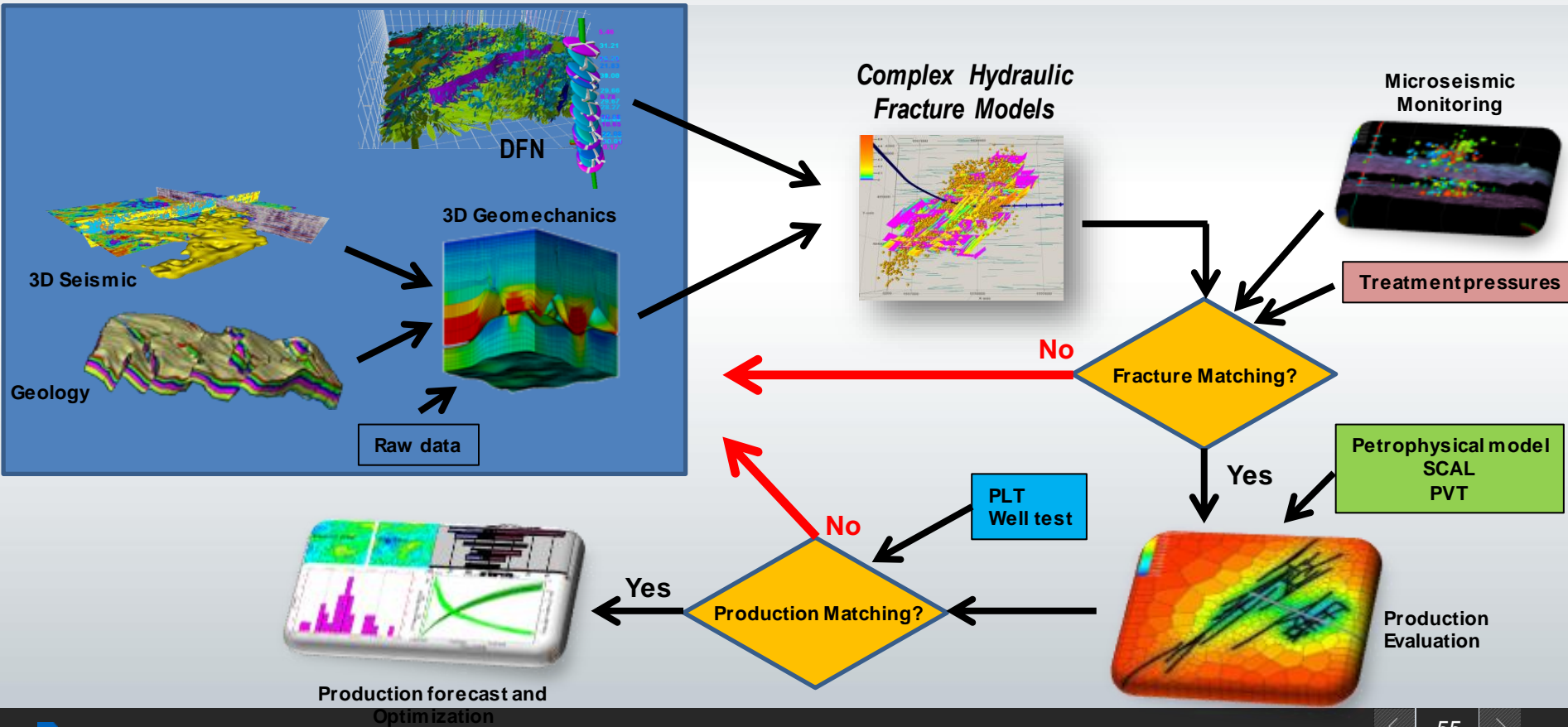
Pozo en la dirección de σ_{Hmax}

Para reservorio de baja permeabilidad vertical y buena permeabilidad horizontal

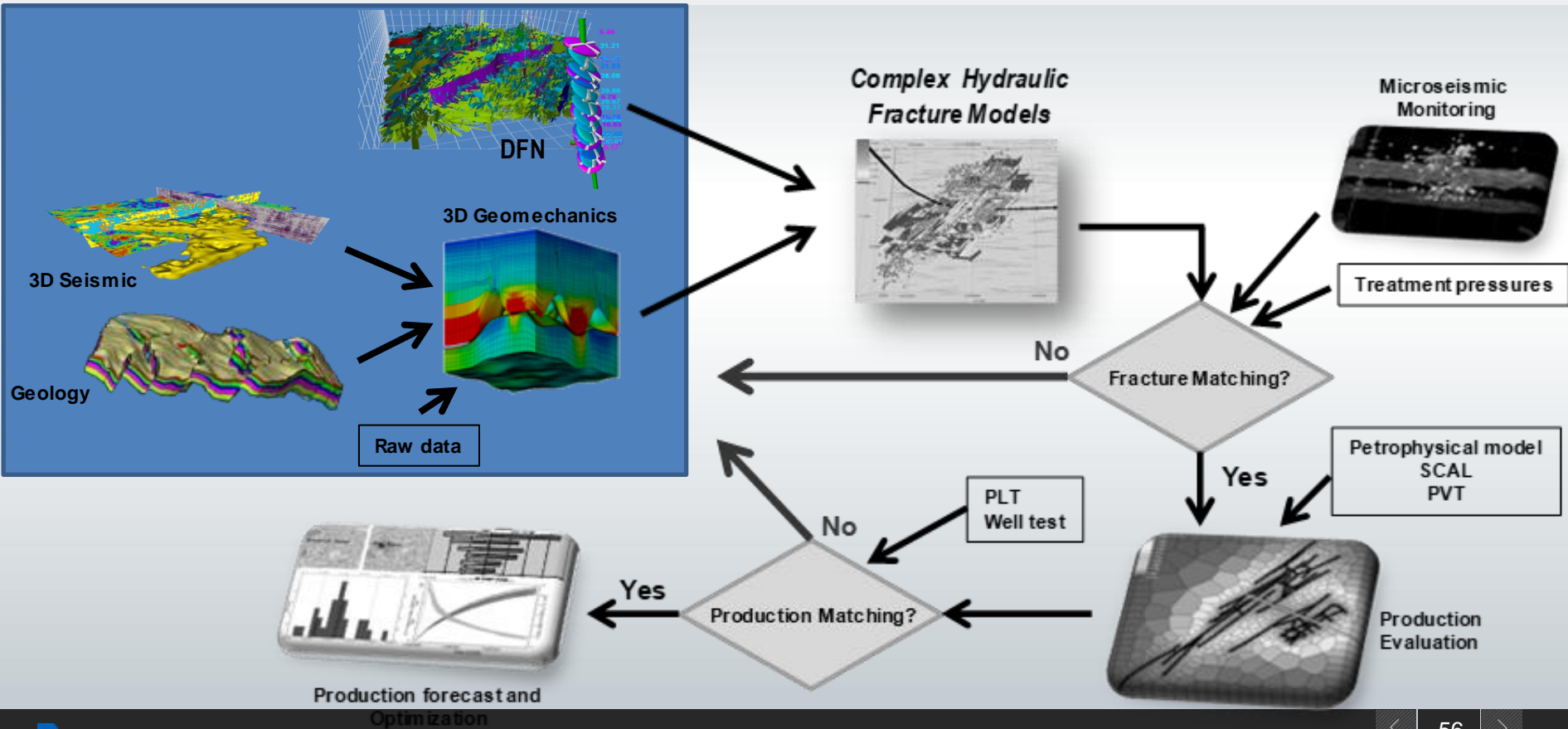


Pozo en la dirección de σ_{Hmin}
Para reservorio de baja permeabilidad

Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

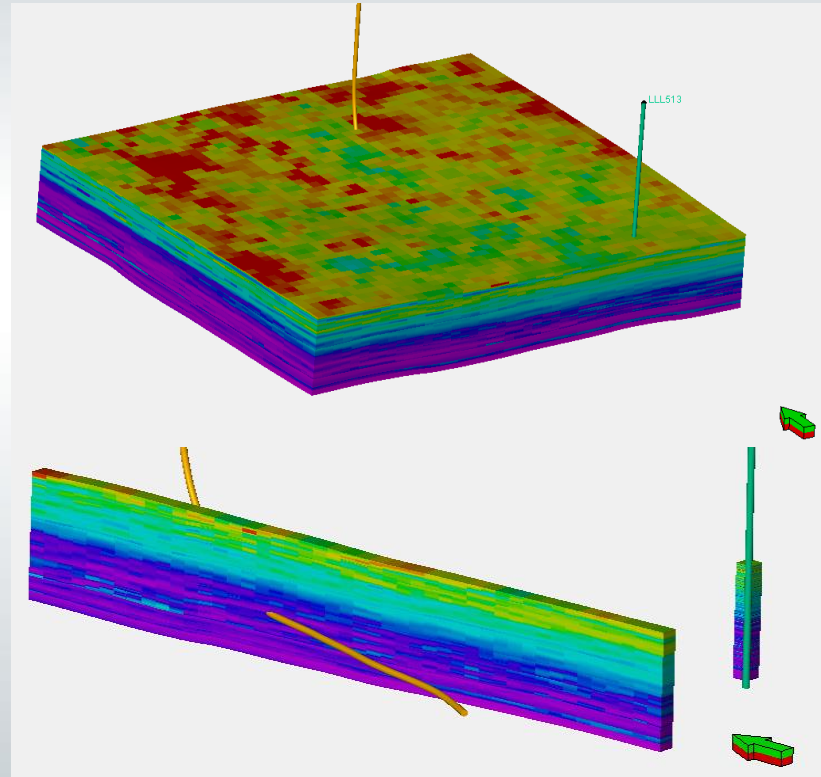


Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico



Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

- Datos:
 - Perfiles en los pozos
 - Cubos de impedancia sísmica
 - Datos de calibración(...)
- El modelo contiene:
 - Propiedades mecánicas
 - Esfuerzos
 - Presión poral

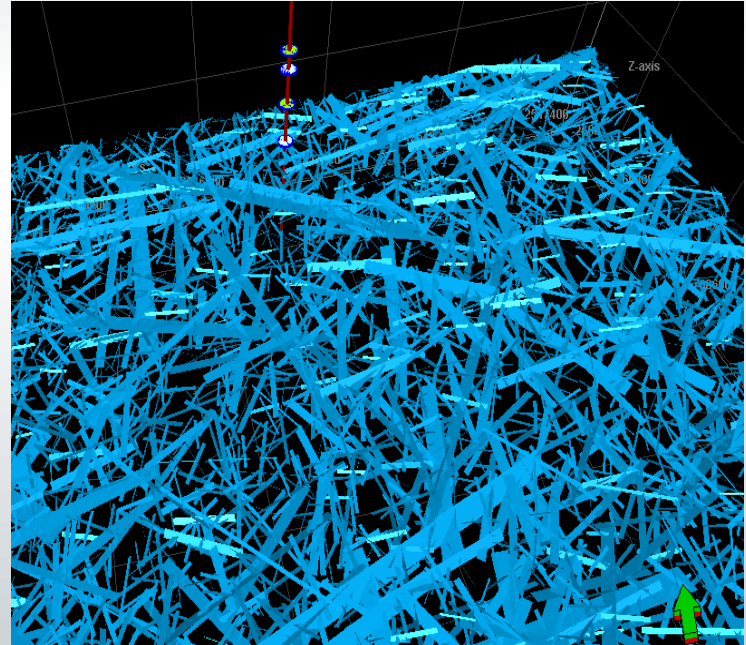


Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

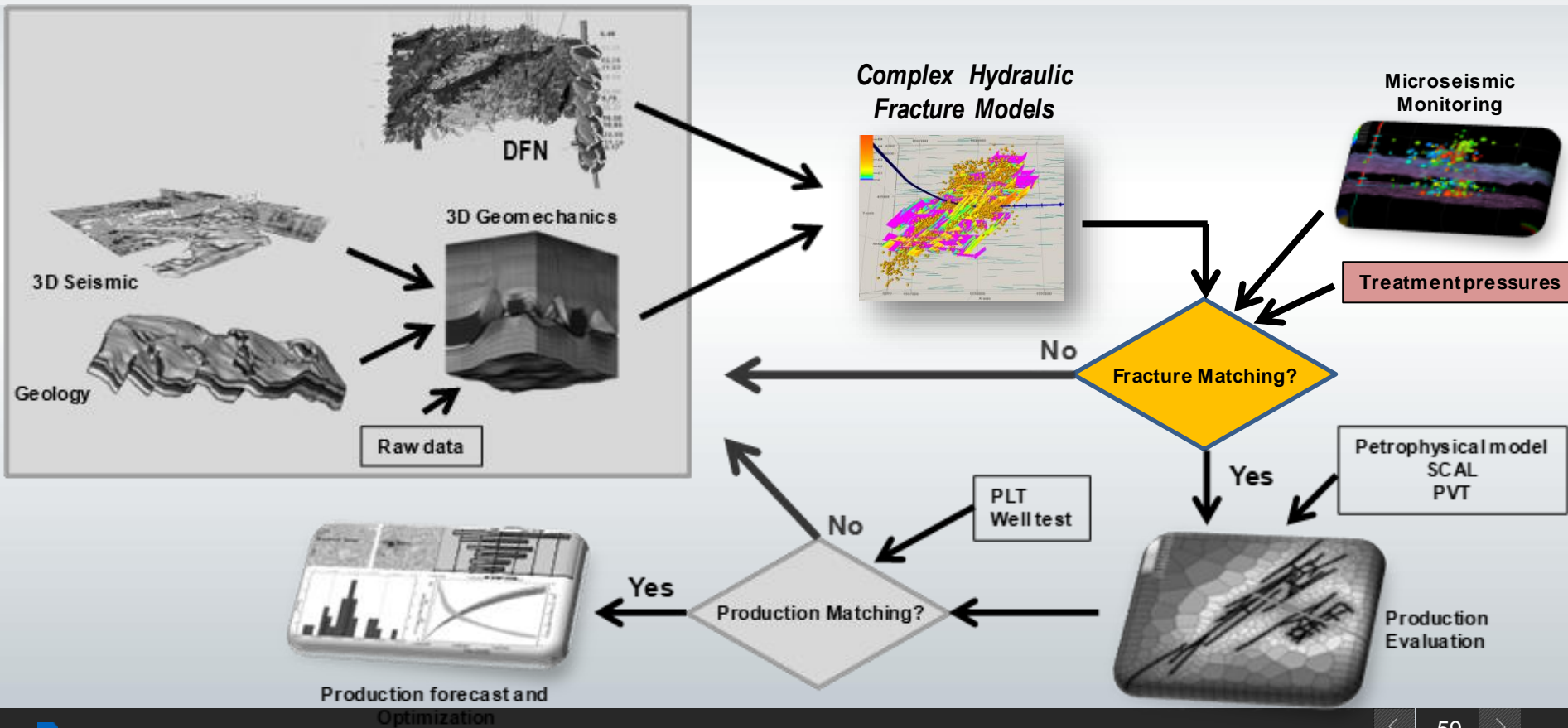
- Datos:
 - Perfiles de imagen
 - Modelo mecánico
- El modelo contiene:
 - Unidades mecánicas
 - Orientación de fracturas
 - Intensidad de fracturas



3D DFN

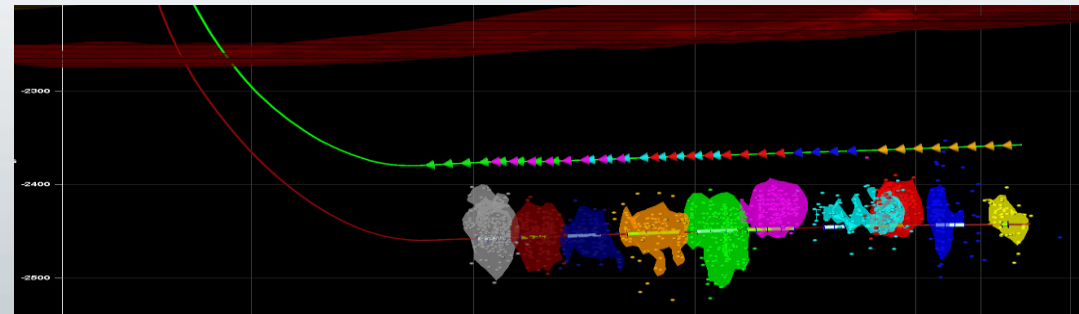
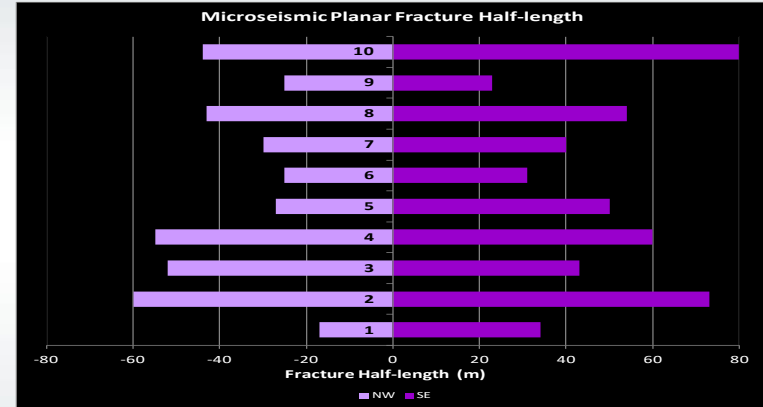
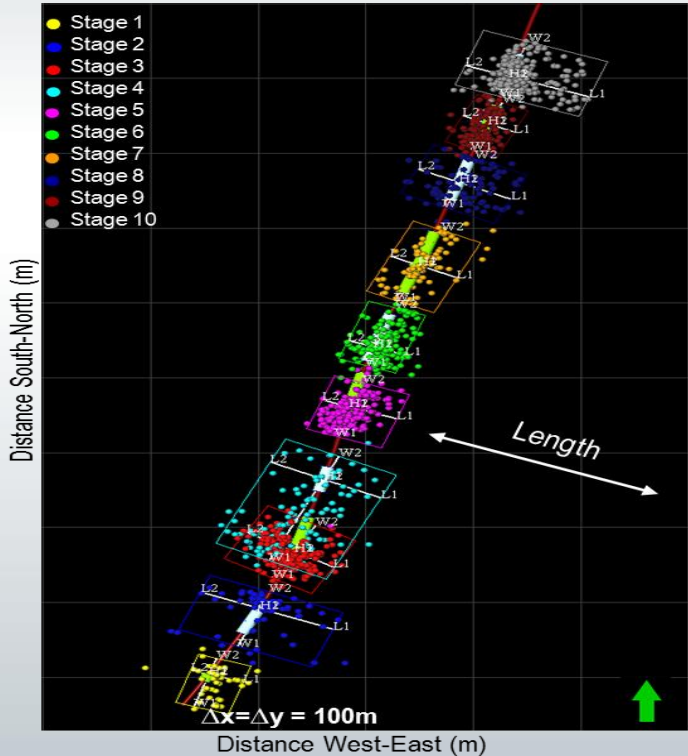


Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico



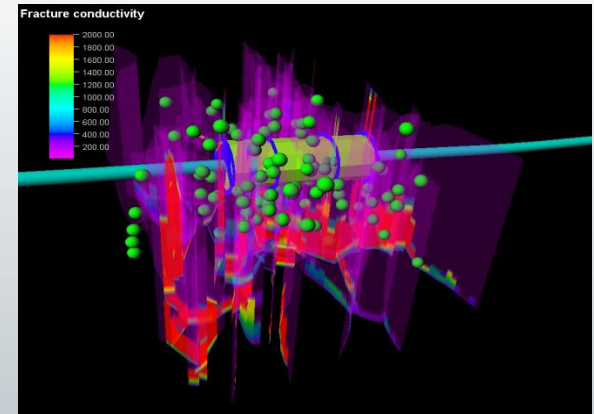
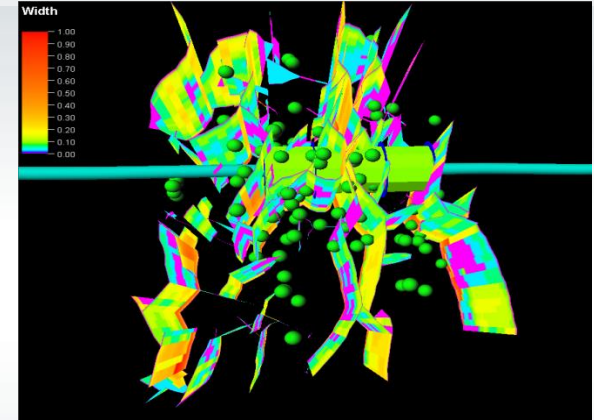
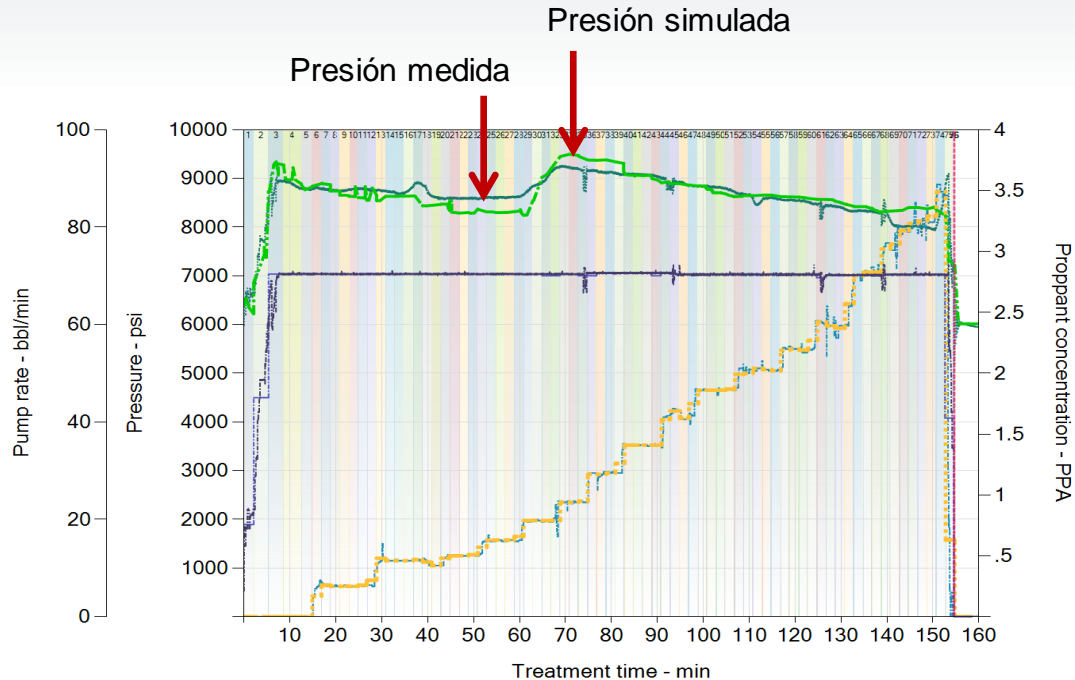
Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

- Geometría de fractura y microsísmica



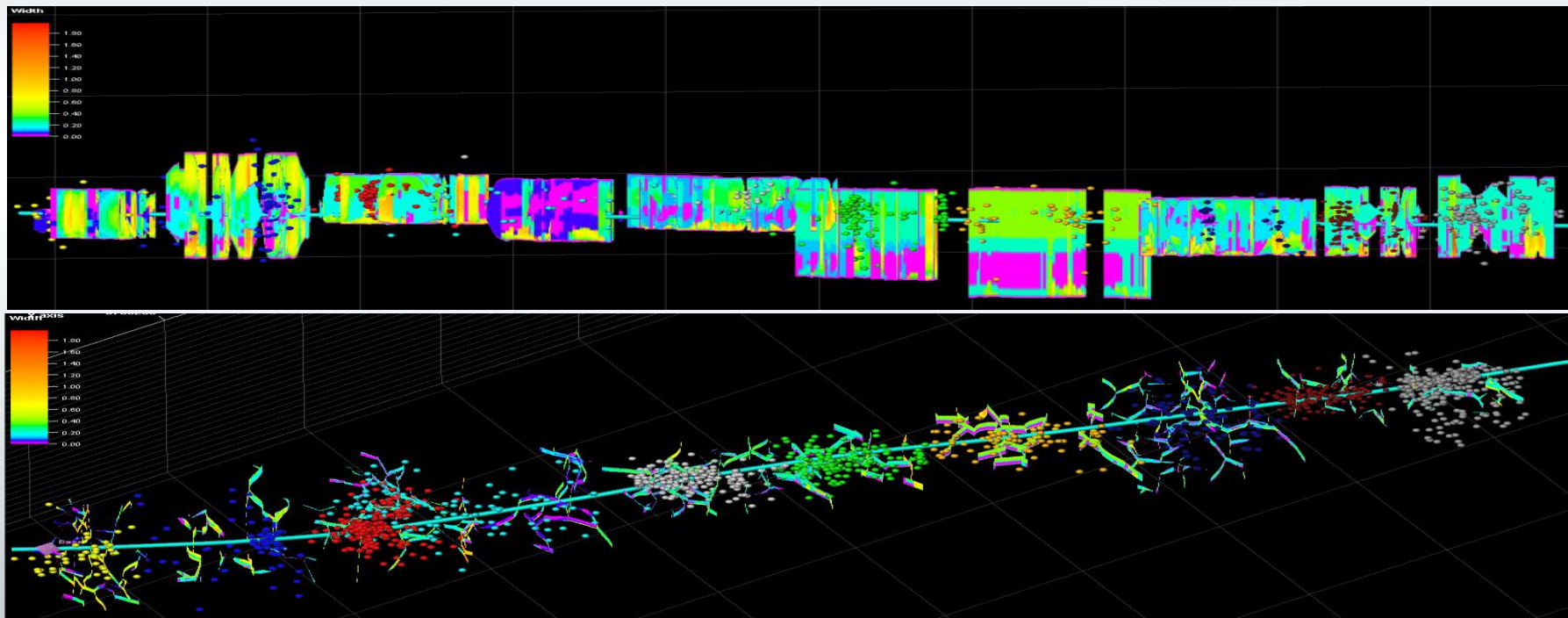
Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

- Geometría de fractura, microsísmica y presiones de bombeo



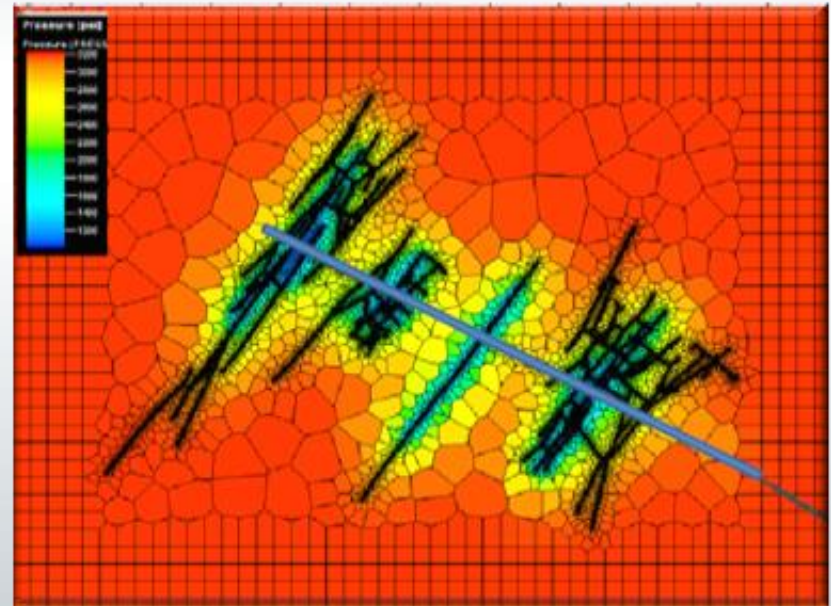
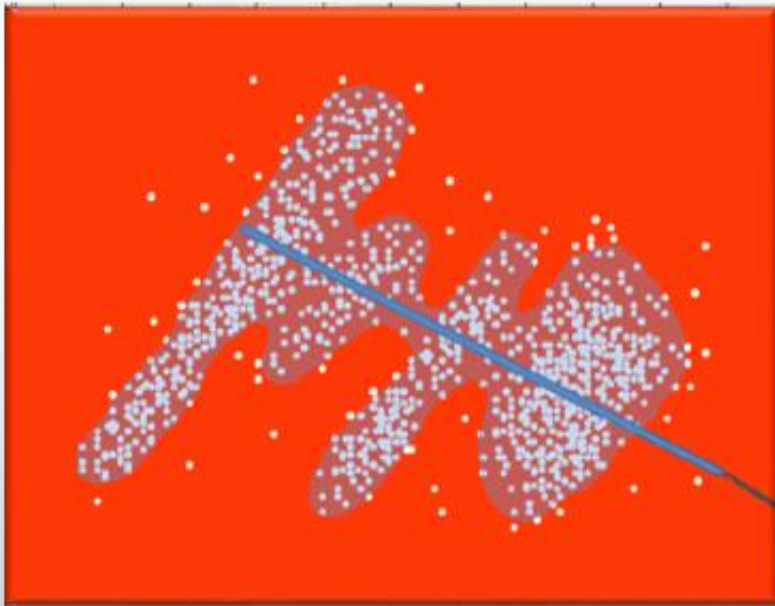
Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

- Geometría de fractura y microsísmica

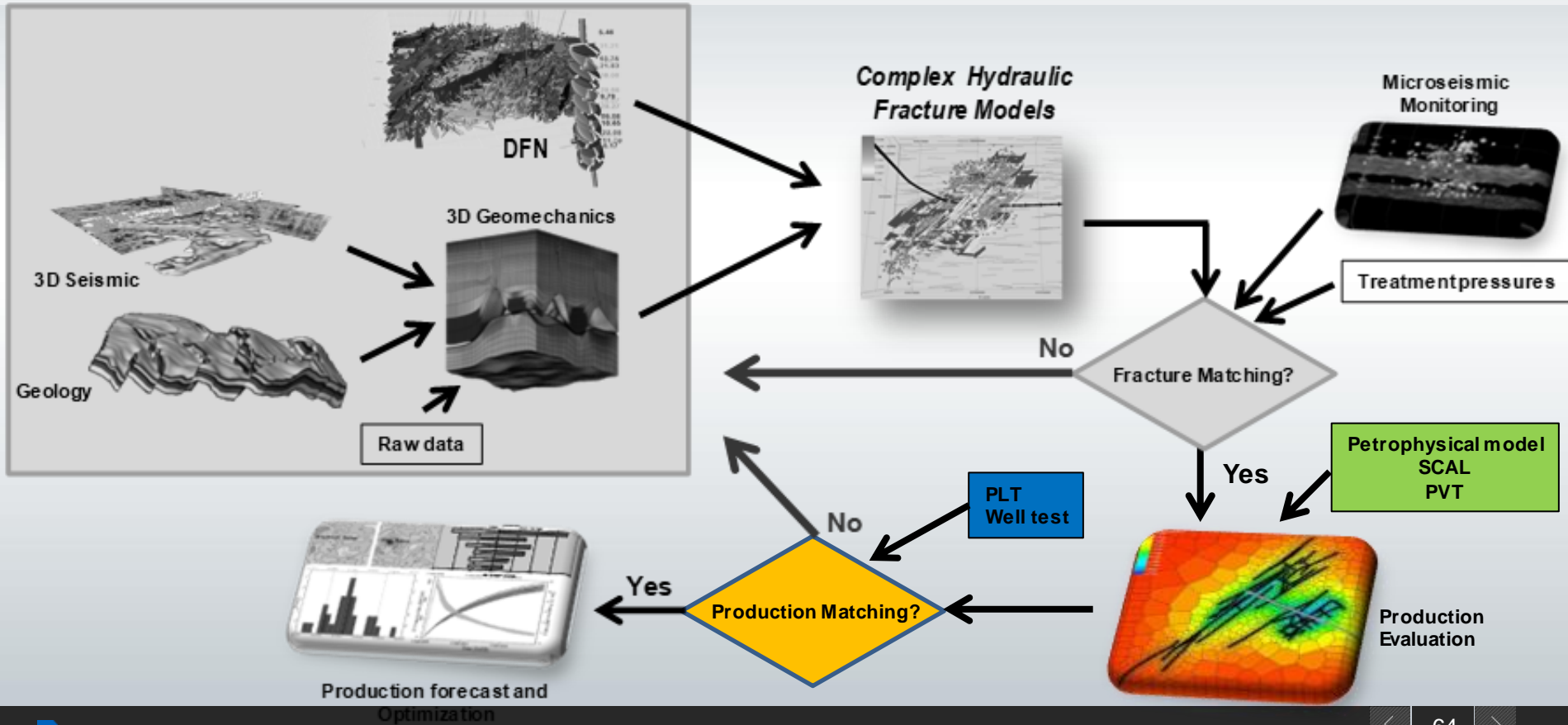


Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

- Geometría de fractura y microsísmica

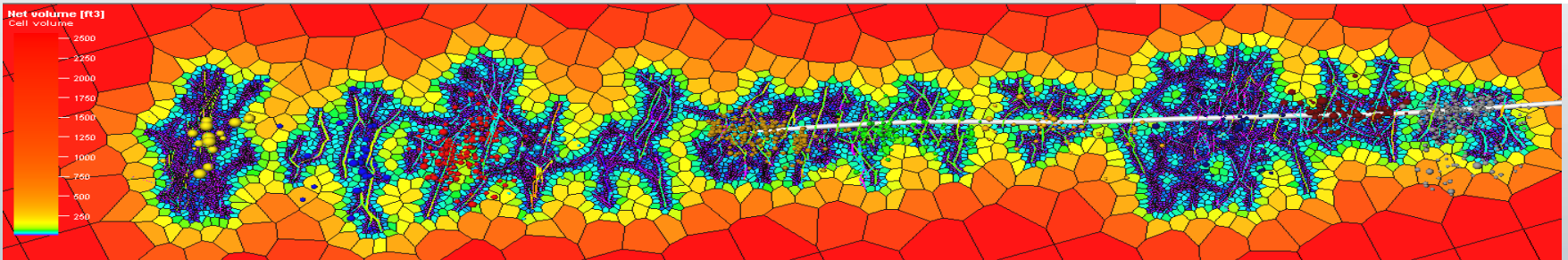
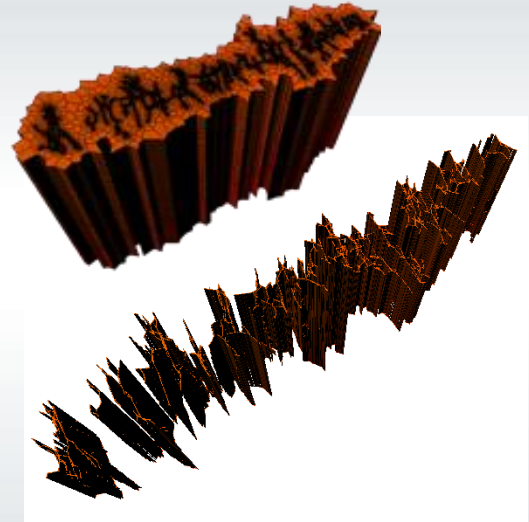


Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico



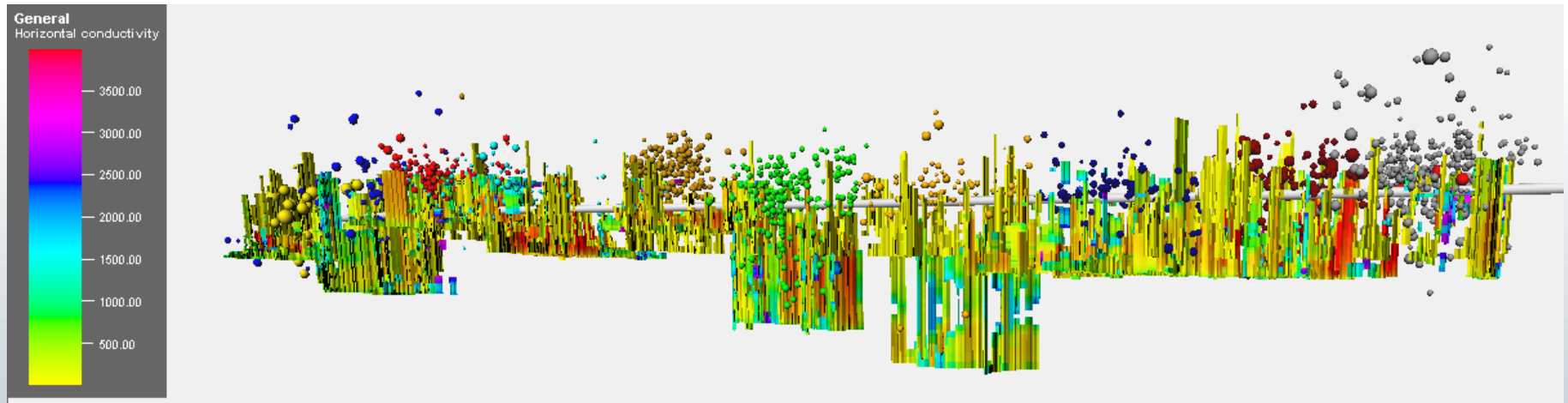
Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

- Simulación de producción
 - Número de celdas: 445.000, 19 capas
 - Grilla no estructurada



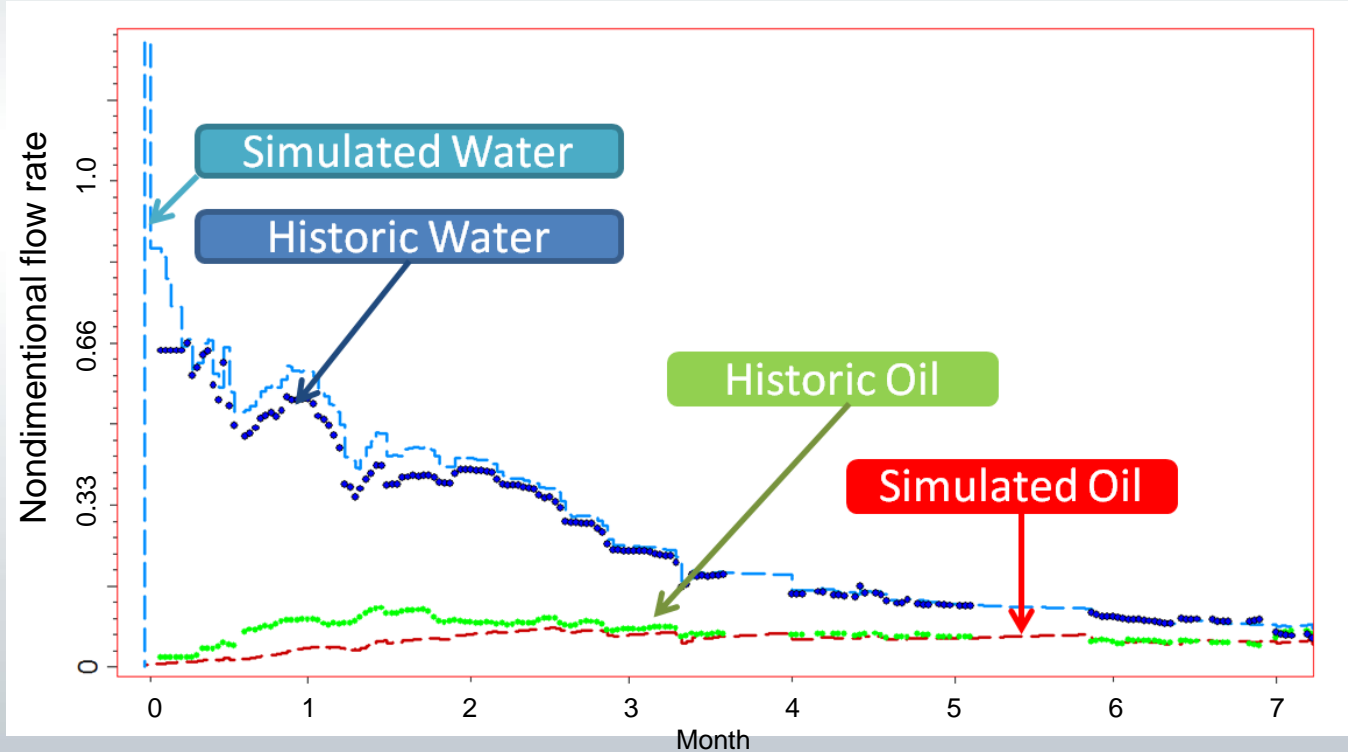
Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

- Distribución de conductividad de fractura



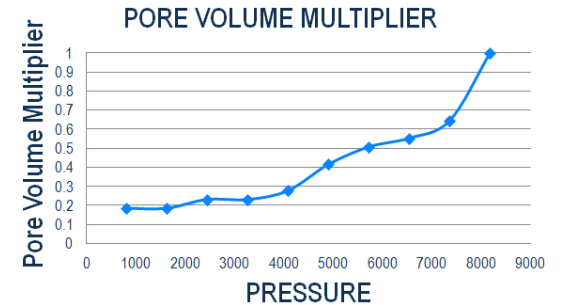
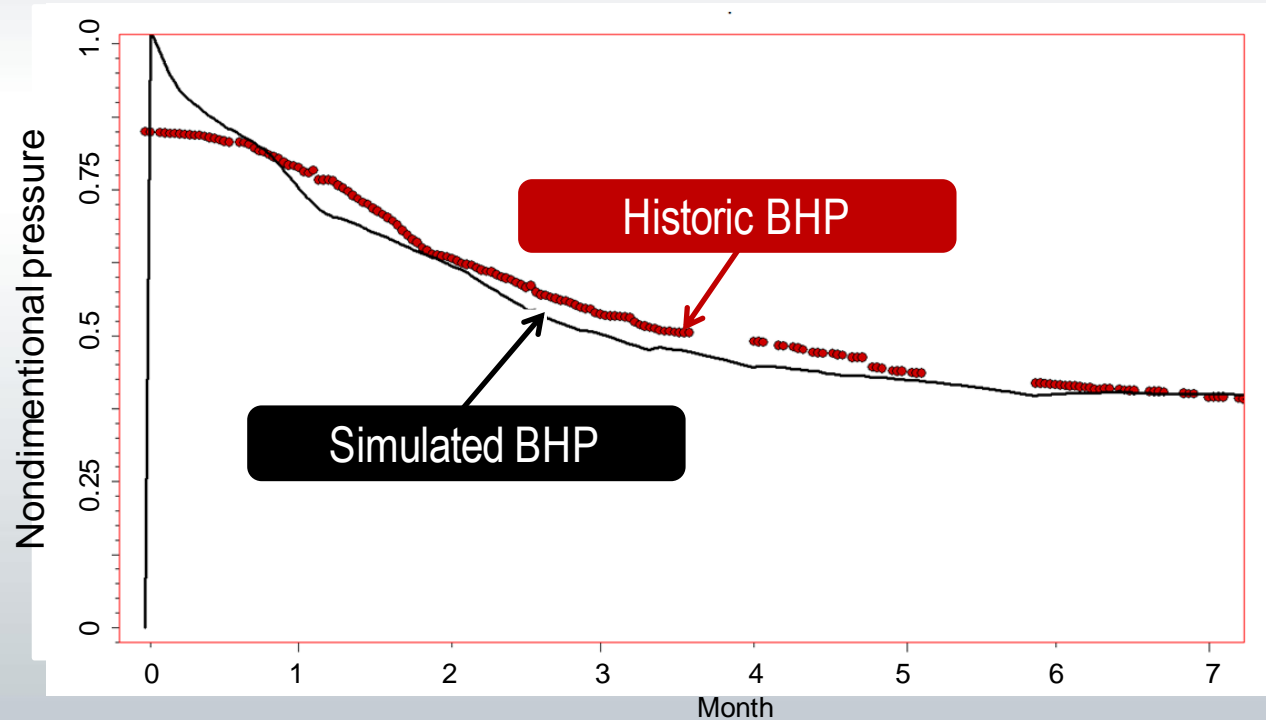
Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

- Calibración de producción



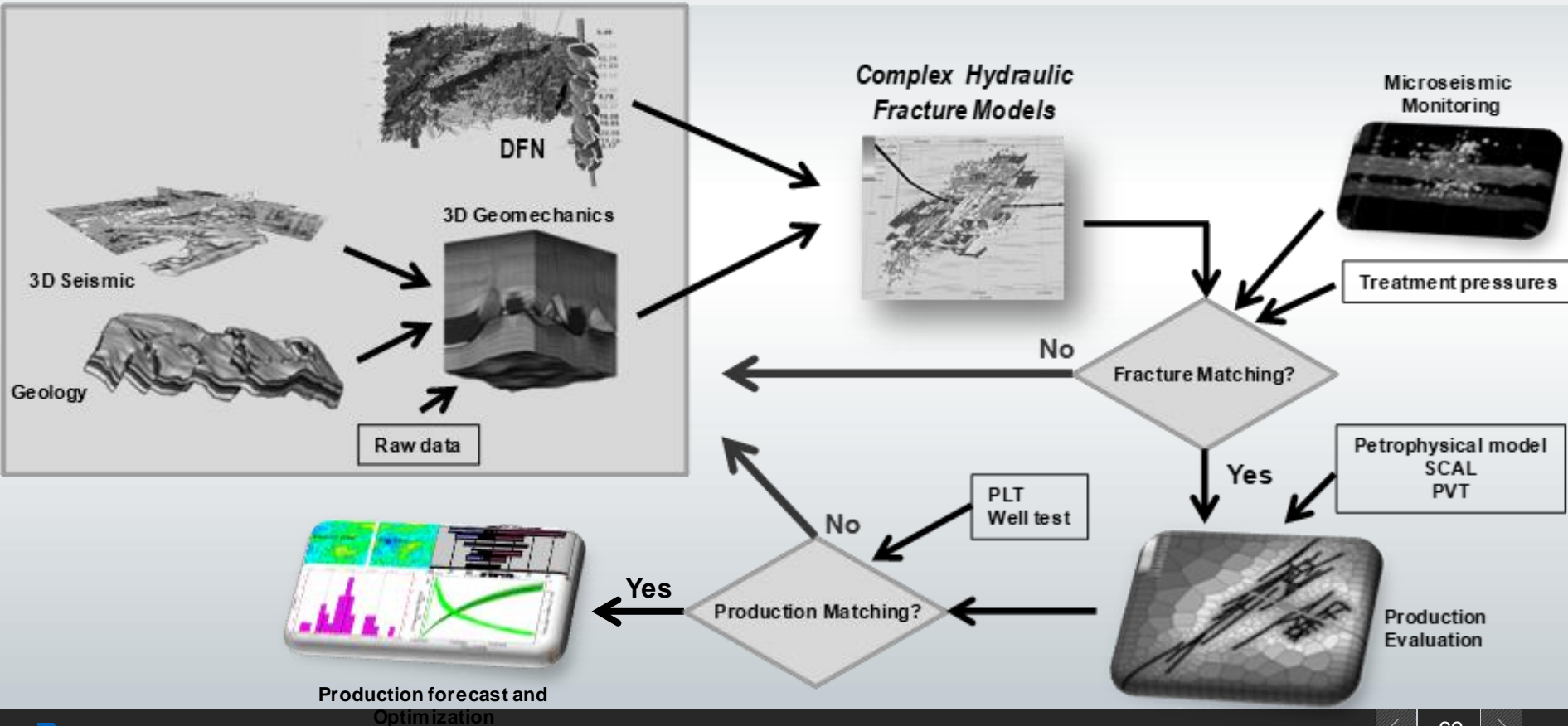
Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

Calibración de presión de fondo



Compactación de la roca necesaria para calibrar

Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico



Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

Influencia de los parámetros en el ajuste post-fractura

DFN

Orientación de esfuerzos

Magnitud de los esfuerzos

Propiedades mecánicas



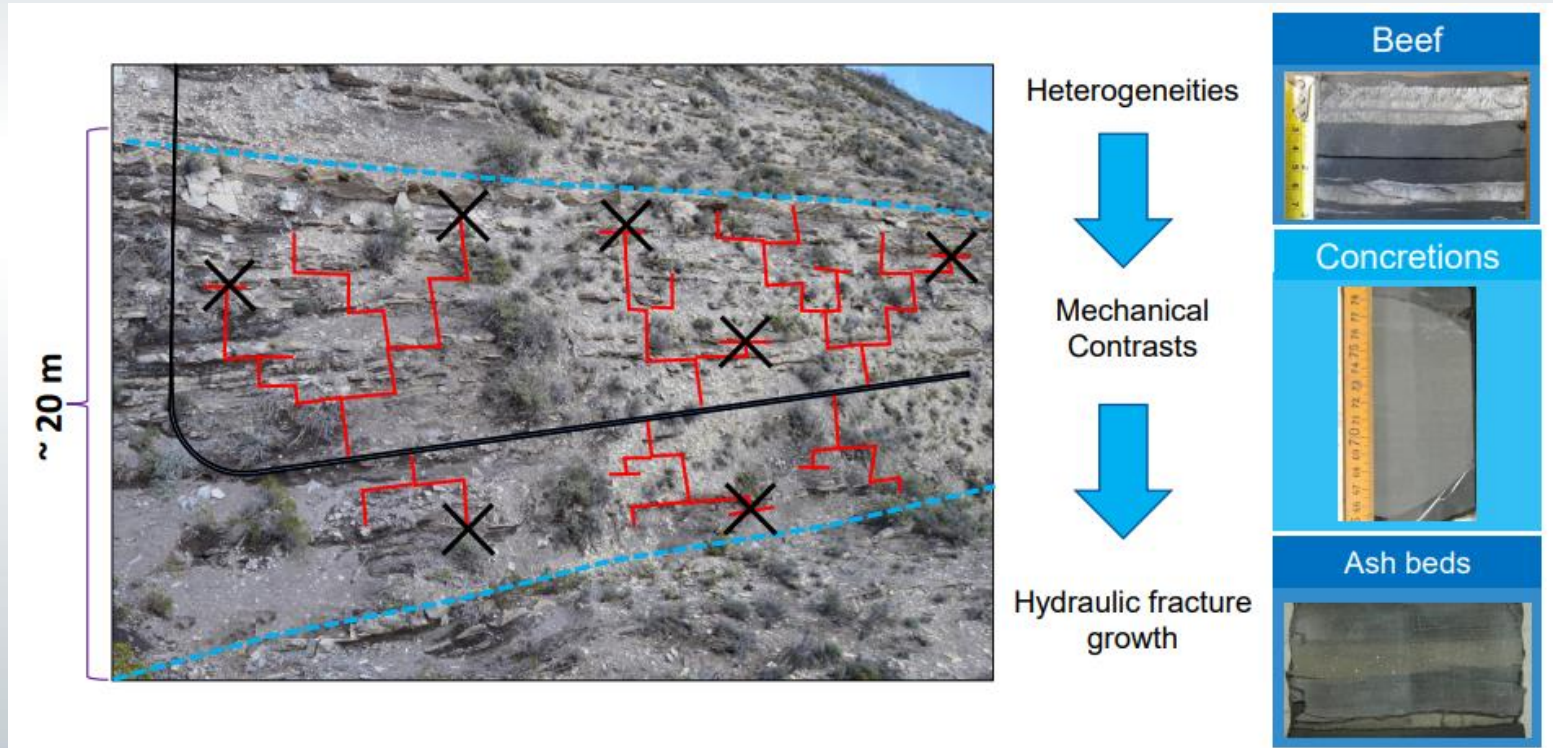
Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

Influencia de los parámetros en el ajuste de producción



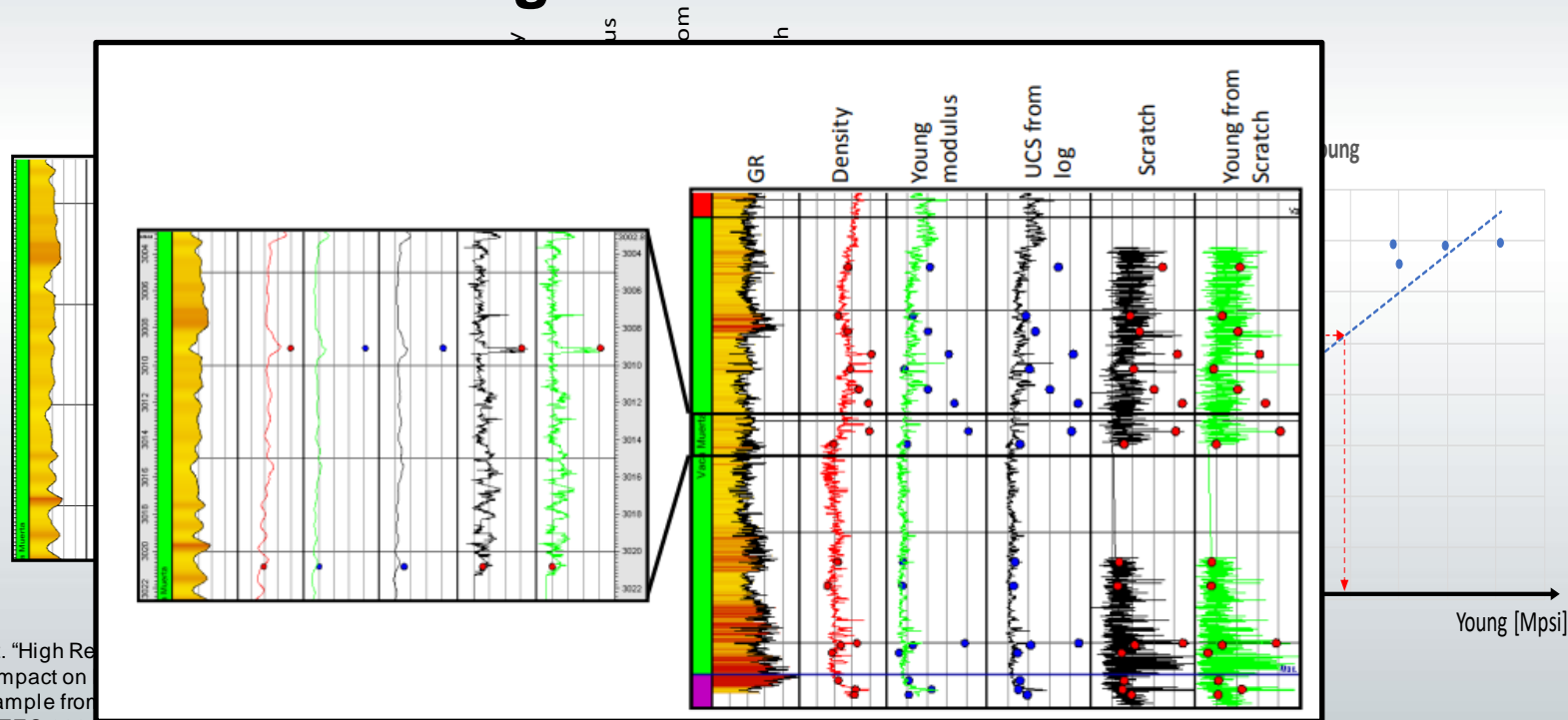
Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

Impacto de la heterogeneidad vertical en la generación de barreras



Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

Resolution of the 1D geomechanical model – Methodology



Hryb D. E. et al. "High Resolution 1D Geomechanical Model and its Impact on Fracture Growth. An Example from Argentina". URTEC-2020-1333-MS

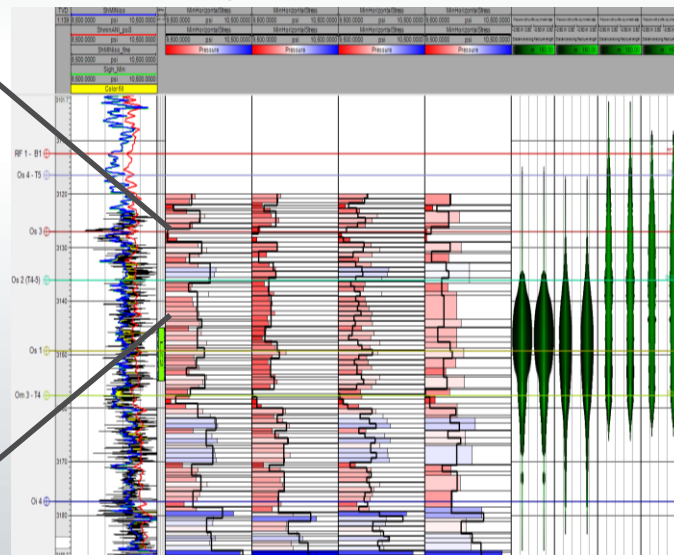
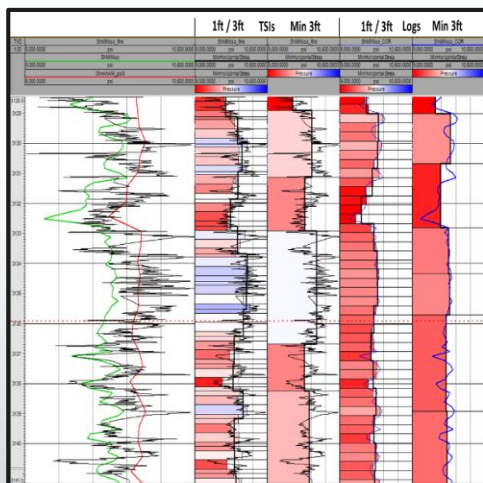
Implicancias de la geomecánica en el fracturamiento hidráulico

Resolution of the 1D geomechanical model – Example

1D geomechanical model

What if?

Impact on Frac Growth



Hydraulic fracture height growth and shapes are affected by thin bed contrasts.

Vertical growth decreases significantly when mechanical contrasts are characterized at centimeter scale.

Static models with high-resolution data provide better agreement between simulation results and calibration data.
Trade-off between resolution, resources, time, and stability is required