

2023

Mineralogía de los Reservorios Shale

Elaborado por:

MSC. ING. EVANNA FUENMAYOR

TEMA IB RESERVORIOS SHALE

MINERALOGÍA DE LOS RESERVORIOS SHALE

Los reservorios tipo Shale oil o gas por presentar muy baja permeabilidad, es decir, baja capacidad de desplazarse en el medio poroso, necesariamente deben ser fracturados hidráulicamente para que puedan producir de forma rentable.

El éxito de esta actividad depende del conocimiento de varios factores, entre ellos, la mineralogía que en conjunto con las propiedades geoquímicas juegan un papel muy importante en la selección de los intervalos candidatos a estimular. Así como también, el estudio de sus propiedades geomecánicas de la roca, el cual será discutido más adelante.

Por ahora nos centraremos en destacar la importancia de caracterizar mineralógicamente un reservorio tipo Shale. Determinar la mineralogía en estos reservorios se ha convertido en algo indispensable, debido a que, la presencia o no de ciertos minerales en la roca van a ofrecer un comportamiento frente a la estimulación hidráulica que puede, bien sea, favorecer o no.

Esto en función a dos propiedades que puede presentar la roca frente a una deformación, que sería la **ductilidad y fragilidad** las cuales responden a la mineralogía de la roca.

La presencia de minerales arcillosos en la roca dará lugar a un comportamiento dúctil, mientras que la presencia de minerales, como cuarzo, carbonatos, entre otros, hará que la formación presente un comportamiento frágil frente a la fractura hidráulica.



PREGUNTA

*¿Cuáles de los dos comportamientos nos convendría para realizar una fractura?
¿Qué la Roca sea Frágil o Dúctil?*

En primer lugar, definamos en su forma más sencilla el concepto de fragilidad y ductilidad.

- **Ductilidad** de un material se define como la cantidad de deformación plástica máxima que es capaz soportar un material antes de romperse (ver figura 1).
- **Fragilidad** es la habilidad que tiene un material a fracturarse con escasa deformación. La fragilidad es una medida de la energía contenida hasta el momento previo a la ruptura (ver figura 30). Está directamente relacionada con el sistema de esfuerzo de la roca, litología, textura, temperaturas, tensiones, tipos de fluidos, diagénesis y contenido de materia orgánica.

La fragilidad o ductilidad de un material está directamente relacionada con el sistema de esfuerzos de la roca, litología, textura, temperatura, tensiones, tipos de fluidos, diagénesis y contenido de materia orgánica.

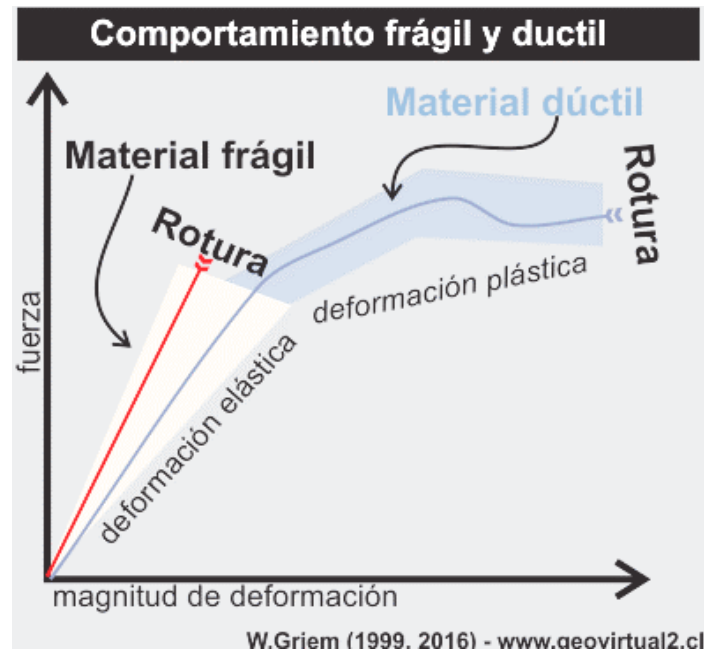


Figura 1. Deformación elástica y plástica

Cuando una roca exhibe una respuesta elástica mayor que la plástica entonces se considera frágil. Si, por el contrario, predomina la respuesta plástica, por ende, absorbe mucha más energía antes de romperse, entonces la roca es considerada dúctil.

A medida que aumenta el contenido de minerales como cuarzo, dolomita y calcita en una roca, esta será más frágil respecto a otra con alto contenido de minerales arcillosos y materia orgánica.

En base a estas premisas es que se ha considerado para una Formación tipo Shale un valor máximo de contenido de minerales arcillosos (Cutoff) menor o igual a 40% y no es conveniente que se sobrepase.

Los reservorios tipo Shale se componen principalmente de minerales arcillosos, tales como:

- Caolinita
- Clorita (Fe, Mg)
- Esmectica: montmorillonita (Mg, Fe, Ca, Na).
- Micas: illita (k) y glauconita
- Entre otros

Y otros componentes no arcillosos, entre los cuales se pueden mencionar:

- Feldespatos (aluminosilicatos)
- Moscovita (biotita)
- Carbonatos
- Pirita, hematita y yeso
- Materia orgánica o bitúmenes

El índice de fragilidad (brittleness) es una relación que vincula el esfuerzo compresivo (σ_c) respecto del esfuerzo tensional (σ_t) (Coates y Parsons, 1966; Aubertin y Gill, 1998; Ribacchi, 2000), de manera tal que el índice de fragilidad es igual a σ_c/σ_t .

Dado que los tensores tensionales y compresivos se miden sólo en el laboratorio, resulta problemático extender este concepto a escala de reservorios (Perez, 2013). Cuanto mayor es el índice más frágil es la roca. Por su parte, también es posible el índice de fragilidad de la roca en función del contenido mineralógico, como se mencionó anteriormente.

Para eso se utilizan diferentes modelos, a saber:

Jarvie et al. (2007) proponen: $BI = Qz / (Qz + Ca + Arc + Dolo + COT)$

Donde:

Qz= es contenido fraccional de cuarzo

Ca= contenido de caliza

Arc= contenido de arcilla en peso de la muestra

Dol=contenido de dolomita

COT= contenido de carbón orgánico total

En ambos casos, se asume que en la medida que aumenta el contenido de cuarzo/dolomita/calcita en una roca, ésta será más frágil respecto de otra con alto contenido de minerales arcillosos y materia orgánica.

No obstante, es necesario recordar que el cuarzo en la naturaleza aparece de diferentes manera (biogénico, detrítico, diagenético) y mediante las técnicas comunes en los laboratorios no es posible diferenciarlos entre sí; dependiendo de su génesis, la respuesta mecánica puede ser diferente (Slatt, 2011).

De lo anteriormente planteado, se deduce que la presencia de minerales no arcillosos en los reservorios tipo Shale favorece a que la formación presente un comportamiento frágil, lo que permitirá que la roca se fracture con mayor facilidad.

Es importante mencionar que la mineralogía de la roca sólo será uno de los parámetros a considerar para la selección de los intervalos a estimular mediante fractura hidráulica. Un buen diseño de fractura toma en cuenta tanto la composición mineralógica de la formación como sus propiedades geomecánicas para lograr resultados más acertados en la producción de estos reservorios.



PREGUNTA

Ahora bien ¿Cómo conocemos la mineralogía de una roca?

Existen métodos directos e indirectos a través de los cuales se puede conocer la mineralogía de una Formación. Entre los métodos directos mayormente utilizados se encuentran los siguientes:

- Difracción de rayos X (DRX)
- Fluorescencia de rayos X (FRX)
- Secciones delgadas o petrográficos
- Microscopia de barrido electrónico (MBE)
- Otros

Mientras que, entre los registros eléctricos (*métodos Indirectos*) que proporcionan datos mineralógicos, se encuentran los perfiles mencionados en el tema anterior, como los son: Espectroscopia de Rayos Gamma y el Gamma Ray Spectral.

A continuación se explicaran algunos de los ensayos que se realizan en el laboratorio para determinar la mineralogía de una formación.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX o XRD, siglas en inglés)

Está basada en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación.

Los Rayos X tienen longitudes de onda de Angstroms, del mismo orden que las distancias interatómicas de los componentes de las redes cristalinas. Al ser irradiados sobre la muestra a analizar, los rayos X se difractan con ángulos que dependen de las distancias interatómicas.

El método analítico del Polvo cristalino o de Debye-Scherrer consiste en irradiar con Rayos X sobre una muestra formada por multitud de cristales colocados al azar en todas las direcciones posibles. Para ello, es aplicable la Ley de Bragg: $n\lambda = 2d \cdot \sin\theta$, en la que "d" es la distancia entre los planos interatómicos que producen la difracción (figura 2).

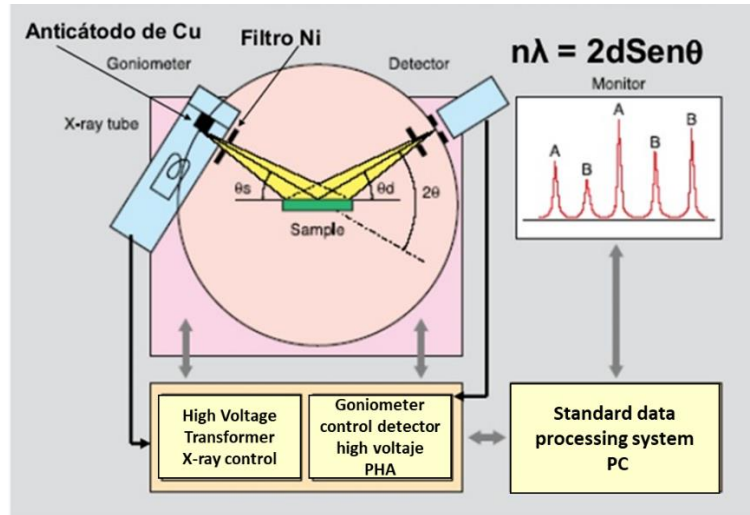


Figura 2. Configuración de un difractómetro de Rayos X.

El método de difracción de rayos X en general y en particular de polvo cristalino es el único método analítico capaz de suministrar información cualitativa y cuantitativa sobre los compuestos cristalinos presentes en un sólido, basándose en el hecho de que cada sustancia cristalina presenta un diagrama de difracción único (ver ejemplo en la figura 3).

Así, pueden compararse un diagrama de una muestra desconocida y el de una muestra patrón y determinar su identidad y composición química.

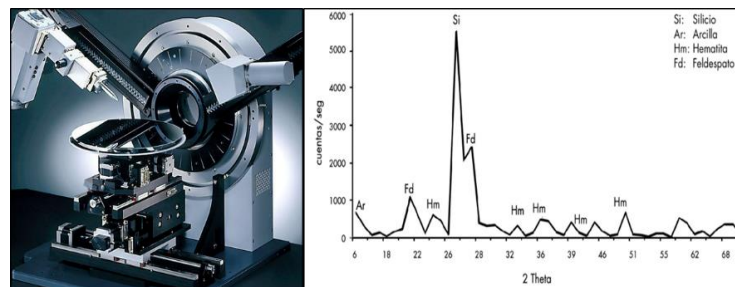


Figura 3. Ejemplo de un Difractograma.

Para llevar a cabo el ensayo, la muestra de roca se muele manualmente en mortero de ágata hasta obtener un polvo fino y homogéneo, hasta alcanzar un tamaño pasante malla 200 ASTM, equivalente a $74 \mu\text{m}$ (ver figura 4). El material resultante es distribuido uniformemente en un porta muestras de vidrio hasta obtener una superficie lisa donde la mayoría de los cristales estén orientados azarosamente para ser expuestos a la mayor cantidad de Rayos X posibles.

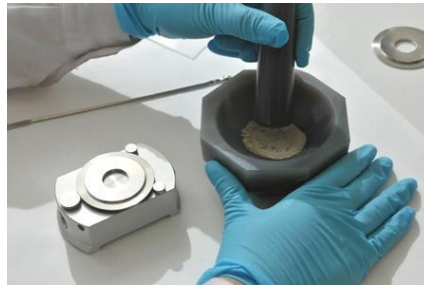


Figura 4. Molienda de la muestra en un mortero Ágata (derecha) para colocarla en la porta muestra (izquierda).

Los análisis de DRX provee información relacionada con:

- Abundancia relativa de los minerales;
- Porcentaje de capas de esmectita en arcillas estratificadas illita/esmectita;
- Potenciales problemas de sensibilidad de las arcillas a los fluidos;
- Minerales problemáticos que afectan a la densidad de grano (Ricos en Hierro: Pirita, Clorita, etc);
- Determinación de la manera empírica la densidad de la matriz.

FLUORESCENCIA DE RAYOS (FRX O XRF, siglas en inglés)

Es una técnica de análisis elemental de muestras basado en la fluorescencia, característica emitida por los diferentes elementos sometidos a los rayos X de alta energía o rayos gamma.

Para que se dé el proceso de fluorescencia de rayos X, primero tiene que ocurrir la absorción fotoeléctrica por el elemento. La absorción fotoeléctrica por la muestra sucede cuando un fotón altamente energético proveniente de una radiación de rayos X interactúa con la materia.

Cuando los átomos de la muestra a analizar absorben esta alta energía, un electrón de los más cercanos al núcleo de las capas internas K o L es expulsado del átomo. En este proceso de absorción, parte de la energía del fotón incidente de rayos X es utilizada para romper la energía de enlace del electrón interno del elemento y la energía restante acelera el electrón expulsado.

Después de que el electrón es expulsado, el átomo queda en un estado altamente excitado y por lo tanto muy inestable. Para que se restablezca la estabilidad, los electrones de las capas adyacentes llenaran el espacio vacante al pasar un electrón de otra capa una energía diferente al del electrón saliente hay una diferencia de energía, la cual se emite en forma de radiación de rayos X.

Precisamente, este proceso de emitir rayos X es conocido como fluorescencia de rayos X. El fotón de rayos X emitido tendrá una energía específica igual a la diferencia entre las dos energías de enlace de un electrón de las capas interna y adyacente y esta energía es única para cada elemento (Figura .5).

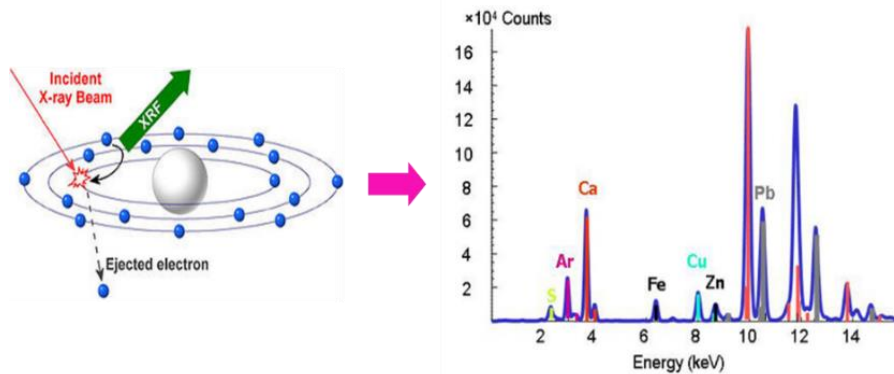


Figura 5. Principio de la Espectroscopia de Fluorescencia.

El espectro de emisión de rayos X característicos es relativamente sencillo y la emisión de rayos X es gobernada por las reglas de selección definidas por la teoría de la mecánica cuántica. Así, la energía de los rayos X emitida es convertida a longitud de onda específica, la cual es única para cada elemento y esto nos permite hacer una clara e inequívoca identificación de los elementos presentes en el material a analizar.

Además de utilizar la energía o longitud de onda de los rayos X emitidos para la identificación de elementos, la intensidad de los rayos X permite el análisis cuantitativo. Las intensidades de los rayos X son directamente proporcionales a la concentración del elemento. En cuanto más intensa es la emisión o fluorescencia en mayor cantidad se encuentra el elemento a cuantificar.

Para la cuantificación elemental en una muestra se requieren de estándares; eso es, un determinado elemento en algún material en concentraciones conocidas. Los estándares se utilizan para hacer una comparación directa con la muestra a analizar. Esto se realiza mediante la comparación con una curva de calibración.

CORTES PETROGRÁFICOS O DELGADOS

Son preparaciones que se realizan en rocas para su estudio con un microscopio petrográfico. Consisten en cortar la roca en rodajas con un espesor de unos 30 μm de manera que se adhieren a láminas de vidrios (portas) mediante resina epoxi, para posteriormente ser recubiertas por otra lámina de vidrio, como se muestra en la figura 6.

El objetivo de preparar una lámina delgada es el de conseguir un grosor de la roca muestreada tan pequeño que permita que la luz la atraviese.

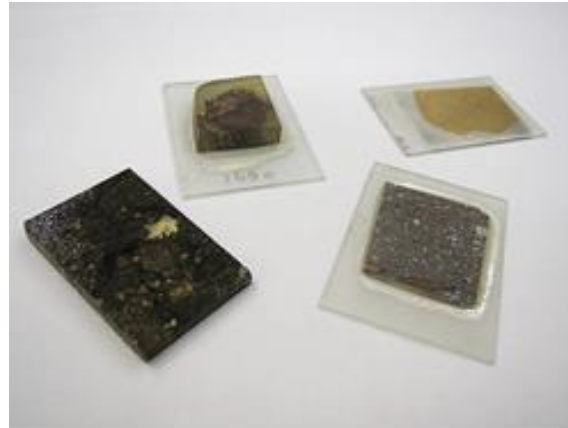


Figura 6. Ejemplos de Cortes Delgados o Petrográficos.

El microscopio petrográfico posee un polarizador que convierte la luz que emite en luz polarizada, un analizador, que es una lente que polariza la luz perpendicularmente al polarizador, y una platina que permite girar la lámina delgada. Las observaciones se pueden realizar con el analizador activado o sin él. Cuando se observa una lámina delgada al microscopio la luz atraviesa el polarizador y una vez polarizada atraviesa la lámina delgada y llega al analizador (si está activado) y luego al observador (Ver Figura 7).

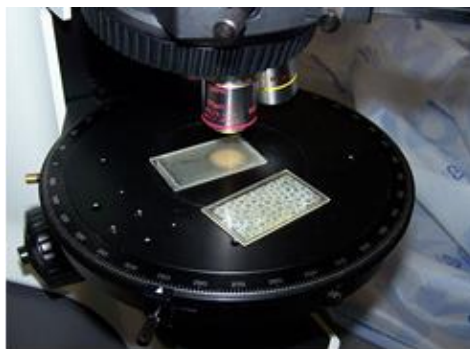


Figura 7. Microscopio Petrográfico.

EL MICROSCOPIO DE BARRIDO ELECTRÓNICO (MEB o SEM, por Scanning Electrón Microscope)

Es una técnica de microscopía electrónica capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando las interacciones electrón-materia. Utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen.

Los MEB poseen una gran profundidad de campo, que permite enfocar a la vez gran parte de la muestra. También producen imágenes de alta resolución, de forma que las características más ínfimas de la muestra pueden ser examinadas con gran amplificación.

La preparación de las muestras es relativamente fácil ya que la mayoría de los MEB sólo requieren que estas sean conductoras. La muestra generalmente se recubre con una capa de carbono o una capa delgada de un metal, como el oro, para darle carácter conductor.

Posteriormente, se barre la superficie con electrones acelerados que viajan a través del cañón. Un detector formado por lentes basadas en electroimanes mide la cantidad e intensidad de los electrones que devuelve la muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones mediante imagen digital, tal como se observa en la siguiente figura:

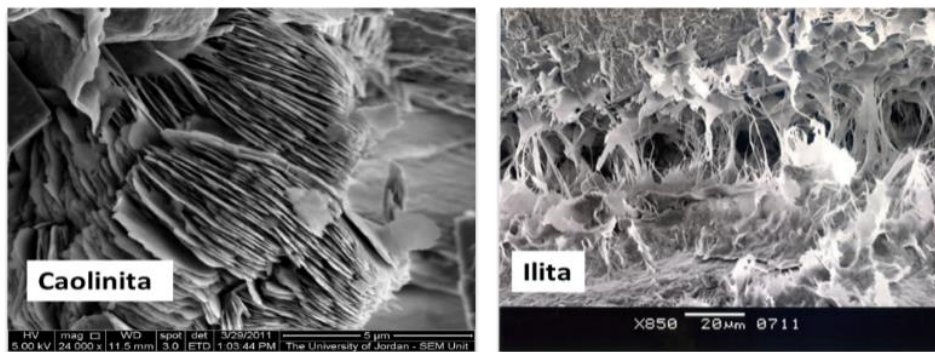


Figura 8. Ejemplos de imágenes MEB, en los cuales se detalla la presencia de arcillas como la caolinita y la illita.

MINERALOGÍA DE ALGUNOS RESERVORIOS SHALE DE ARGENTINA

Veamos algunos ejemplos sobre la caracterización mineralógica de algunas formaciones pertenecientes a las cuencas petrolíferas productivas en Argentina. Dichos resultados se encuentran fundamentados en ensayos como los descritos anteriormente.

Ejemplo #1: Se muestran los valores promedios para las distintas formaciones tipo Shale de la cuenca Neuquina, basado en un análisis composicional (diagrama ternario) basado en el contenido de cuarzo, carbonatos y arcillas. Dicho análisis fue el resultado de una interpretación realizada a diferentes cortes petrográficos adquiridos en las diversas formaciones.

De los resultados, se pueden realizar las siguientes conclusiones:

- Las Formaciones: Los Monos, Cacheuta, Pozo D129 y Palermo Aike presentan una composición mineralógica con un contenido mayor de minerales no arcillosos (cuarzos y carbonatos) con respecto a los minerales arcillosos. Pero en ciertas zonas presentan un contenido de minerales arcillosos que pueden superar el 40% (línea punteada color naranja).

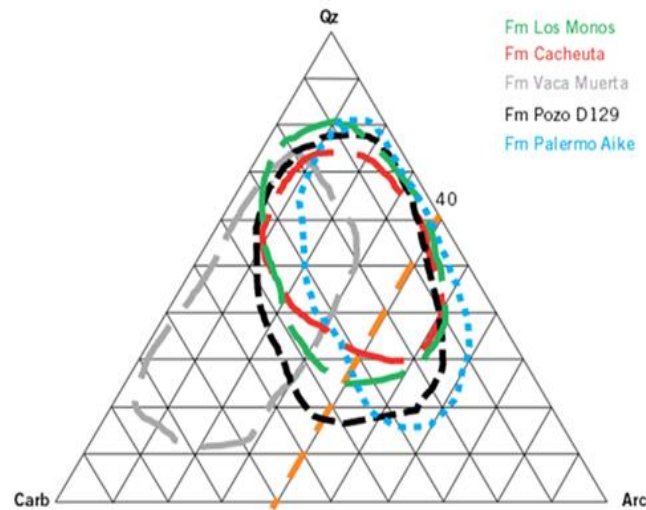


Figura 9. Diagrama Ternario para distintas formaciones objetivos como Reservorios No Convencionales de tipo Shale.
 Fuente: Askenazi et al; 2013.

- La Fm. Vaca Muerta presenta menor contenido de minerales arcillosos, inclusive no supera el 40% (Fig. 9). Estos resultados nos muestra a su vez que por la mineralogía que presenta la Fm. Vaca Muerta esta tendrá un comportamiento frágil (deformación elástica) frente a la fractura hidráulica.
- Por otro lado, del diagrama se puede extraer que la Fm Vaca Muerta, es una combinación de pelitas con componentes carbonaticos, es decir, margas.

Ejemplo #2: Diagrama composicional elaborado a partir de los resultados de difracción de rayos x realizados sobre testigos de corona. Este trabajo muestra una comparación entre dos intervalos denominado SEI (sección enriquecida inferior) y SES (sección enriquecida superior) ambas de la Formación Vaca Muerta.

En el siguiente diagrama composicional basado en el contenido de Sílice, Carbonatos y Arcillas, se observa como ambas secciones SEI y SES (puntos rojos y azules) presentan una mineralogía con mayor contenido de minerales no arcillosos (sílice y carbonatos). Exceptuando sólo dos puntos (uno rojo y azul) considerados “facies fangolitas limosas calcáreas”, los cuales presentan un mayor contenido de arcillas. Asimismo, vemos como ambas secciones se encuentran mayoritariamente bajo un dominio frágil.

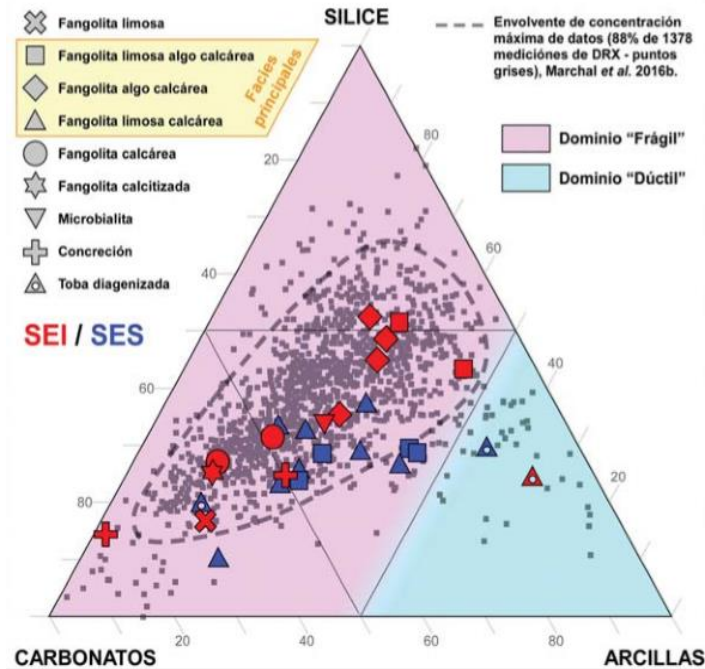


Figura 10. Diagrama Ternario de los DRX realizados SEI y SES, discriminando los análisis por facies
Fuente: Estudio comparativo de testigos de coronas de las dos secciones enriquecidas de la Formación Vaca Muerta en la zona de Shale Gas, Noroeste del engolfamiento Neuquino. Arturo de Barrio et al; 2017.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Coates, D. y R.Parson, 1966."Experimental criteria for classification of rock substances". Intenacion Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,3, 181 -189.
2. Jarvie, D., R. Hill, T. Rubble y R. Pollastro, 2007. "Unconventional shale-gas systems: the mississippian Barnett Shale of North- Central Texas as one model for thermogenic shale gas assessment". AAPG Bulletin, 91, 475 – 499.
3. Perez, R. 2013. Brottleness estimation from seismic measurement in unconventional reservoirs application to the Barnett shale. University of Oklahoma, 172 pp.
4. Slatt, R. (2011). Important Geological Properties of Unconvetional Resource Shales. The Journal of the Oklahoma City Geological Society, Vol: 63, N°3,224-242.