



# Impacto de la caracterización mineralógica en la evaluación de yacimientos de baja resistividad, ejemplo de una cuenca antearco (forearc), Cuenca de Tumbes, *Offshore* Perú.

**Jose G. Betancourt**

*Pacific Exploration & Production*

**Armando Fragoso**

*Pacific Exploration & Production*

**Franklin G. Yoris**

*Pacific Exploration & Production*

**Adrian Perarnau**

*Pacific Exploration & Production*

Copyright 2008, ACGGP.

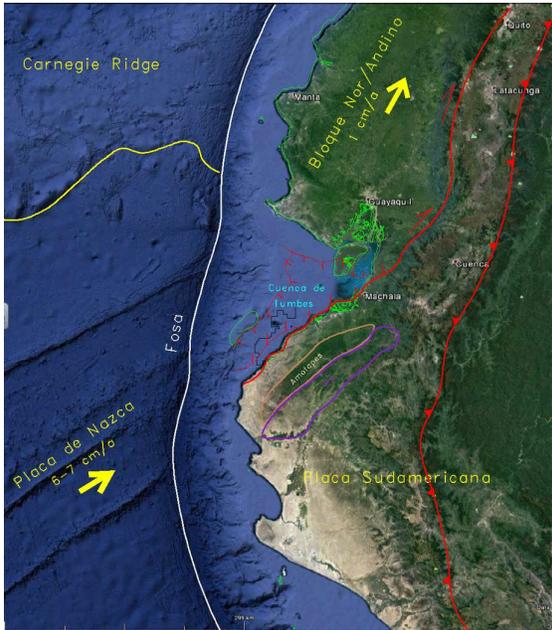
This paper was selected for presentation by an ACGGP Technical Committee following review of information contained in an abstract by the author(s).

## Resumen

La sedimentación en la Cuenca de Tumbes tipo antearco (Perú) está asociada a la actividad tectónica que genera la subsidencia de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana. Esta cuenca corresponde a un evento transtensional Neógeno caracterizada por un relleno clástico dominado por fragmentos líticos provenientes del arco magmático y del prisma de acreción, incluyendo rocas metamórficas paleozoicas y granitos triásicos. Cuando el Sistema Petrolífero en la región, demuestra ser tan prolífico como en el caso de Talara, el siguiente problema es identificar los intervalos con gas y/o petróleo en medio de una litología y mineralogía complejas, como las que pueden caracterizar una cuenca antearco; algunos minerales de arcilla pueden llegar a ser los principales responsables de “pays” de baja resistividad, los cuales pueden estar distribuidos en la formación como matriz detrítica, capas delgadas o laminares. Adicionalmente, en este caso de estudio las rocas siliciclásticas son poco cuarzosas, con abundantes fragmentos líticos y contenido muy variado de arcillas; estas composiciones influyen de manera diversa en la respuesta de los registros de pozo convencionales, con mediciones de resistividad profunda que varían entre los 2-7 ohm.m; de aquí la intención de evaluar el impacto que tienen los componentes no cuarzosos y la matriz arcillosa en la identificación de intervalos petrolíferos. Este trabajo presenta un ejemplo de cómo el escalamiento núcleo-perfil, a través de análisis petrográficos, DRX, SEM y GR Espectral, permitió tener mayor certidumbre en la definición de las arenas netas petrolíferas y su relación con la productividad de los pozos.

## 1 Introducción

La Cuenca de Tumbes se ubica en el *offshore* al noroeste de Perú en el límite con Ecuador. El origen de la cuenca es un tipo particular de “pull-apart” el cual básicamente es el resultado del acoplamiento de la placa de Nazca que subduce con dirección oblicua a la Suramericana a una tasa de 6-7 cm/año, lo que genera que la corteza oceánica genere un canal de subducción (“superficie de Benioff”) de bajo ángulo en un rango de 10° a 15°. Este bajo ángulo no permite que la corteza oceánica entre en contacto con el manto y por lo tanto hay una ausencia del arco volcánico en esta zona, por tal razón se le denomina “*Peru flat slab*” (**Figura 1**). Adicionalmente a la subducción oblicua se tiene la convergencia del Carnegie Ridge lo que genera que el Bloque Nor-Andino migre hacia el NNE a una tasa de 1 cm/año a lo largo de un sistema principal de fallas transformantes asociadas con el *megashear* transcontinental Dolores-Guayaquil. Como consecuencia de la deriva del Bloque Nor-Andino se originó una extensión paralela a la fosa controlada a los lados por sistemas de fallas de despegue que penetraron la corteza continental hasta el canal de subducción y sumado a una posible reactivación de la sutura ofiolítica Cretácica: fueron los elementos tectónicos principales que controlaron la evolución de la Cuenca de Tumbes por lo menos en los últimos 2 millones de años hasta nuestros días (**Witt & Bourgois, 2010; Bourgois, 2013**).

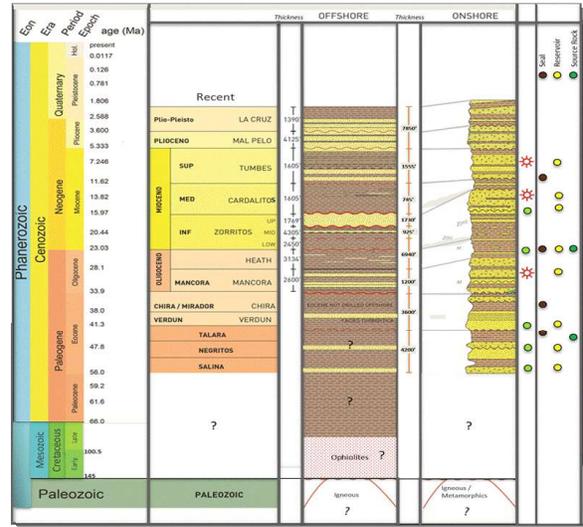


**Figura-1.** Ubicación del área de estudio de la Cuenca del Tumbes, *Offshore* Perú.

## 2 Marco Estratigráfico

La Columna Estratigráfica de la Cuenca de Tumbes (**Figura 2**) está representada por sedimentos depositados desde el Oligoceno hasta el Cuaternario. En la Cuenca de Zorritos que corresponde a la parte *onshore* de Perú aflora basamento metamórfico de edad Paleozoico en lo que se denomina como el Macizo de Amotape, las series metamórficas de este afloramiento muestran una variación de los grados de metamorfismo que incluyen series metamórficas de altas presiones-bajas temperaturas lo cual se puede asociar con engrosamiento de la corteza y posteriormente exhumación durante el Jurásico Tardío - Cretácico Temprano (**Bosch et al., 2002**). Debajo de los sedimentos del Oligoceno se encuentran rocas sedimentarias del Eoceno y Cretácico descansando discordantemente sobre el Basamento. Estas rocas aflorando en *onshore* provenientes de los prismas de acreción fueron las que aportaron sedimentos principalmente dominados por fragmentos líticos con características mineralógicas complejas a la Cuenca de Tumbes.

A partir de la primera campaña de perforación *offshore* en la década de los '70, los pozos exploratorios proporcionaron información de la columna litológica y sus correspondientes estudios bioestratigráficos permitieron establecer la edad de las secuencias depositadas y definir los límites formacionales en la Cuenca de Tumbes. Adicionalmente la adquisición de información sísmica 2D y en años recientes sísmica 3D, ha permitido definir los principales rasgos estratigráficos en el área a partir de la respuesta de los reflectores sísmicos.



**Figura-2.** Columna Estratigráfica Cuenca de Tumbes

## 3 Análisis Petrográfico

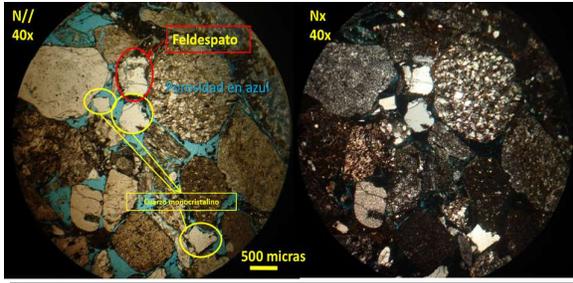
Una de las primeras actividades encaminadas a definir las características de la composición mineralógica presente en las secuencias depositadas en la Cuenca de Tumbes consistió en la recuperación de muestras representativas de la columna litológica. Se realizó un trabajo de campo en el año 2014 con el objetivo de describir los afloramientos cercanos a la costa de Perú y recuperar muestras para elaborar secciones delgadas (**Figura 4**).



**Figura-4.** Recuperación de muestras en afloramientos de la Costa de Perú.

A continuación se muestran algunas descripciones petrográficas de las muestras recolectadas en campo. En la **Figura 5** observamos la sección delgada **No 1** vista al microscopio (40x) con nicóles cruzados y paralelos, en la que se observa una arenisca de grano muy grueso limpia, pero con más del 90 % de fragmentos de volcánicas, feldespatos, limolitas y areniscas de grano fino retrabajadas. Menos del 10 % es de cuarzo monocristalino. Esta litología, si es la representativa de las mejores arenas de Zorritos, implicaría que tiene lecturas en el registro de Rayos Gamma mucho mayores a los de una arenisca cuarzosa y muy posiblemente una

resistividad menor, especialmente si está saturada con agua salada. Podría pasar por una arenisca muy sucia o incluso por una “limolita”, incluso descartada como candidata a reservorio.



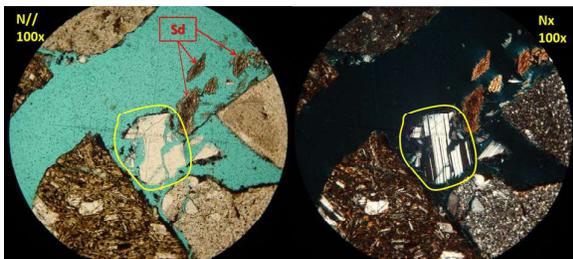
**Figura-5.** Fotomicrografía 1 del microscopio óptico (40x) de la Sección Delgada No. 1 de la Formación Zorritos Superior.

La descripción petrográfica de la sección delgada No 2 (**Figura 6**) muestra una arenisca de grano muy grueso, limpia, pero con más del 90 % de fragmentos de volcánicas, feldespatos, limolitas y areniscas de grano fino retrabajadas. Menos del 10 % es de cuarzo monocristalino. En rojo se resalta un fragmento de lava andesítica, muy probablemente con parches sideríticos de alteración previa a la actual. Contiene opacos de piritita subhedral y euhedral. Porosidad en azul.



**Figura-6.** Fotomicrografía 2 del microscopio óptico (100x) de la sección delgada No. 2 de la Formación Zorritos Superior.

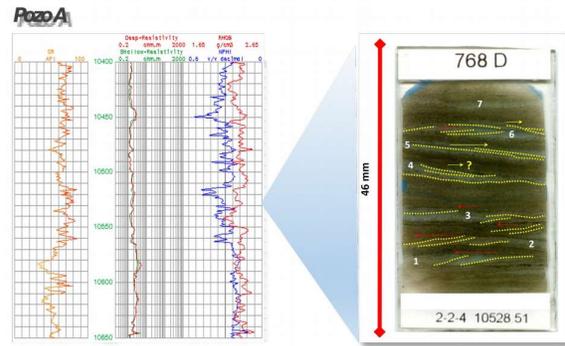
La descripción petrográfica de la sección delgada No 3 (**Figura 7**) muestra un fragmento de andesina al lado de fragmentos volcánicos retrabajados y una serie de cristales de siderita-ankerita (Sd). Porosidad en azul.



**Figura-7.** Fotomicrografía 3 del microscopio óptico (100x) de la sección delgada No. 3 de la Formación Zorritos Superior.

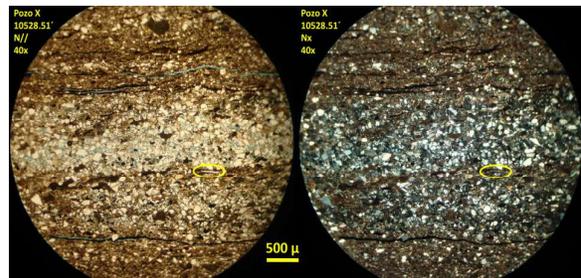
Para la descripción petrográfica de las secuencias

depositadas en la Cuenca de Tumbes se utilizó la información de núcleos cortados en el Pozo A, el cual alcanza hasta el Miembro Medio de la Formación Zorritos. En la **Figura 8** se muestra la sección delgada No 4 la cual fue obtenida a una profundidad de 10528 pies dentro de la Formación Zorritos y esta se describe como un lodo heterolítico, mostrando siete laminaciones principales de limo arenoso y arena limosa, que oscilan entre 1.3 y 3.3 mm de espesor. Estos eventos constituyen un 40 % del espesor total. Aparentemente indican bidireccionalidad de corrientes, lo que apunta a un posible régimen influenciado por mareas, donde el sedimento principal es de origen continental (ausencia notoria de microfósiles marinos).



**Figura-8.** Sección Delgada No. 4 (10528.51' MD) de la Formación Zorritos

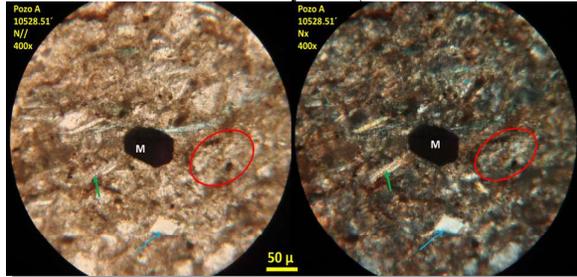
La **Figura 9** describe la petrografía de la sección delgada No 4 (10528.51' MD) en la que se puede apreciar que la granulometría principal es de limo grueso y arena muy fina; abundan las escamas de sericita, con grosores de 10 micras y longitudes hasta de 250 micras (elipses amarillas) e incluso 500 micras en otra zona de la muestra. Estas escamas todavía mantienen la extinción de arce moteado típica de la muscovita, por lo que su transporte ha sido muy rápido y el proceso de illitización no se ha iniciado. Dentro de estas láminas limo-arenosas, la porosidad puede llegar al 10-15 %.



**Figura-9.** Fotomicrografía 1 del microscopio óptico (40x) de la sección delgada No. 4 de la Formación Zorritos.

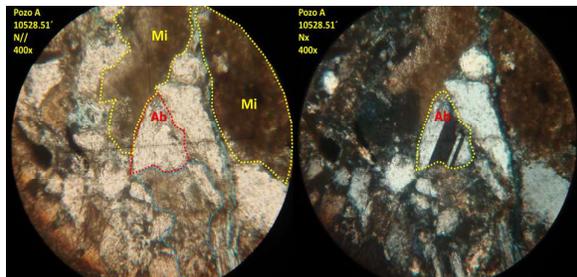
La **Figura 10** describe la petrografía una porción de la sección delgada No 4 (10528.51' MD) en la cual muestra un detalle centrado en el cristal opaco de magnetita (M). Cerca de un 25 % de la masa que lo rodea es espículas de sericita parcialmente illitizada (flecha verde) y granos

de feldespato alterados (ej: elipse roja); hay cristales lípidos de feldespato potásico, muy difíciles de diferenciar del cuarzo, si no fuera por su contorno euhédrico y relaciones angulares (el del ejemplo, presenta el ángulo Beta del Feldespato, de  $114-116^\circ$  (ángulo entre el clivaje  $\{001\}$  y las caras  $\{100\}$ , su diámetro es de 55 micras. Algunos fragmentos alterados tienen diámetro de arena muy fina (100 micras).



**Figura-10.** Fotomicrografía 2 del microscopio óptico (400x) de la sección delgada No. 4 de la Formación Zorritos.

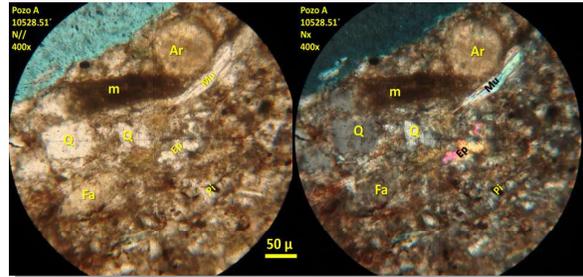
La **Figura 11** describe la petrografía de la otra porción de la sección delgada No 4 (10528.51' MD) la cual muestra un grano de Albita (Ab, ángulo de extinción de maclas de Ley Albita:  $-19^\circ$ ), angular y posiblemente relacionado con un rápido transporte. Cercanas a él se observan manchas de micritización (Mi). También se observan zonas de sericitización de feldespato (líneas azules). Los restantes granos de color de interferencia grisáceo, puede ser una mezcla de cuarzo y feldespatos con poca alteración. Cerca de esta zona se aprecian granos líticos en parte alterados a clorita; también se observan fragmentos de clorita pseudofibrosa como parte de la fracción de limo; estas cloritas se interpretan como de origen hidrotermal y no diagenético.



**Figura-11.** Fotomicrografía 3 del microscopio óptico (400x) de la sección delgada No. 4 de la Formación Zorritos.

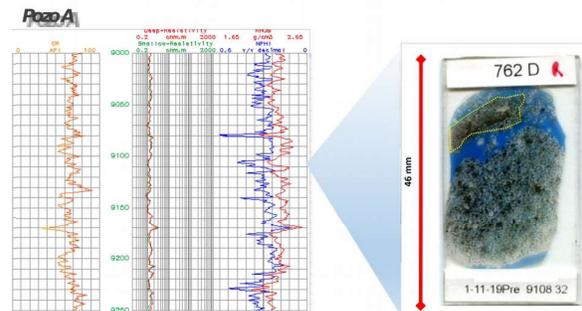
La **Figura 12** muestra la descripción petrográfica de otra porción de la sección delgada No 4 (10528.51' MD) la cual muestra una porción de una lámina de limo arenoso, con fragmentos micritizados (m), aloquímicos carbonáticos redondeados (Ar), placas de muscovita detrítica (Mu), epidoto detrítico (Ep), Pirita (Pi), cuarzo (Q), Feldespato alterado (Fa) y lodo micrítico-arcilloso intersticial (marrón). Mucho de la arcilla en la muestra puede ser pseudomatrix proveniente de la alteración de ceniza volcánica vítrea. De acuerdo con esto, se puede apreciar que menos del 15 % es cuarzo. La composición de las arcillas de estas pelitas en el intervalo 10525.59' –

10528.51' es aparentemente smectítica (LCV, 2014: 17).



**Figura-12.** Fotomicrografía 4 del microscopio óptico (400x) de la sección delgada No. 4 de la Formación Zorritos.

La siguiente zona descrita petrográficamente del Pozo A corresponde a la parte basal de la Formación Cardalitos. Como se observa en la **Figura 13** la sección delgada No 5 (9108.32' MD) muestra una arenisca de grano grueso a muy grueso. Las zonas oscuras incluyen fragmentos líticos alterados y opacos (pirita). La porosidad de esta roca es relativamente buena (hasta 12-15 %). La zona delineada (amarilla) podría representar pseudomatrix a partir de la asimilación de material de colapso de paredes o retrabajo del fondo lodoso en otra parte del “canal”. La proporción de pirita es sensiblemente alta.



**Figura-13.** Sección Delgada No. 5 (9108.32' MD) de la Formación Zorritos

La **Figura 14** muestra la descripción petrográfica de una porción de la sección delgada No 5 (9108.32' MD) que muestra una arenisca de grano grueso (500-1000 micras), con porosidad intersticial 7-12 %. Pirita autigénica (elipses amarillas, dorado en luz reflejada; opaca en luz transmitida) hasta un 15 % por zonas; la porosidad también es variable y es posible que la roca se encuentre un poco expandida por no estar a condiciones de yacimiento. La señal de smectita en DRX en esta profundidad está comprobada por LCV (2014: 21), sin embargo puede ser que el 6 % de arcilla indicado pertenezca más bien a la alteración previa de granos líticos más que a matriz detrítica menor de 30 micras. Podría decirse que la proporción de granos feldespáticos + líticos es mayor que la del cuarzo y con una tendencia de la muestra dentro del campo de Arco Disectado de *Dickinson et al., 1983 (Figura 24)*.

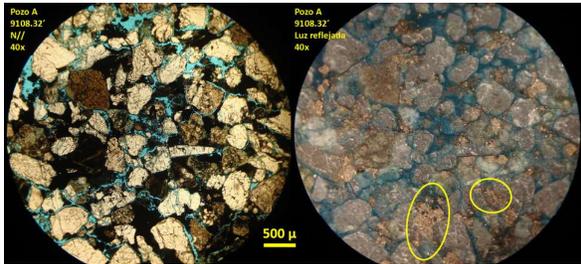


Figura-14. Fotomicrografía 1 del microscopio óptico (40x) de la sección delgada No. 5 de la Formación Cardalitos Basal.

La **Figura 15** describe la petrografía de otra porción de la sección delgada No 5 (9108.32' MD) en la cual se observa un grano policristalino de feldespato alcalino (elipse amarilla), parcialmente alterado a kaolinita (reciente) y sericita (de la fuente); tiene zonas “mirmecquíticas” (flecha azul) que implican una recristalización temprana. La textura tipo “mortero” puede deberse también a un fracturamiento muy temprano, a pesar de que el grano completo está cercano a 1 mm de diámetro, todavía sigue siendo muy pequeño para un cristal típico de una roca plutónica: puede atribuirse a una zona del borde de emplazamiento de un plutón hipoabisal o a un megacristal volcánico de una cámara explosiva. Adyacente, se observa un cristal de epidoto pseudo-fibroso con extinción abigarrada de segundo orden (elipse azul).

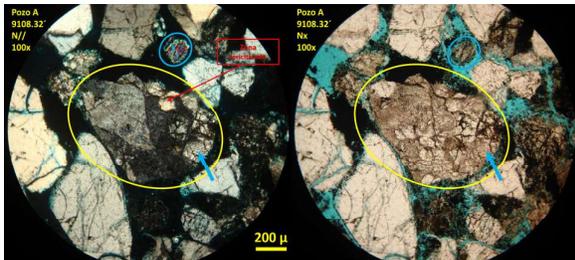


Figura-15. Fotomicrografía 2 del microscopio óptico (100x) de la sección delgada No. 5 de la Formación Cardalitos Basal.

En la **Figura 16** se muestra otra porción de la sección delgada No 5 (9108.32' MD) donde se estima que muchos de los cristales incoloros y sin maclas aparentes, en lugar de cuarzo, sean de feldespato alcalino: este es un ejemplo: tiene birrefringencia de primer orden, baja, pero tiene clivajes que están acentuados por espículas de sericita y bordes subhedrales; la dirección principal de las trazas de clivaje deberían ser las de  $\{010\}$  y las secundarias, las de  $\{001\}$ , el ángulo no es perfecto ( $116^\circ$ ) debido a que no está cortada perpendicularmente a  $\{010\}$ . Se nota una zonación sutil en posición cercana a la máxima extinción. La ausencia de maclado y la zonación sugieren un enfriamiento rápido. El diámetro mayor del cristal es de 1.15 mm .

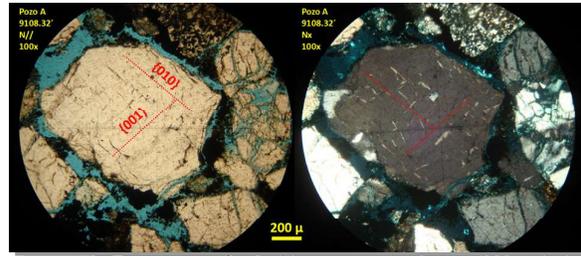


Figura-16. Fotomicrografía 3 del microscopio óptico (100x) de la sección delgada No. 5 de la Formación Cardalitos Basal.

La **Figura 17** describe la petrografía en otra porción de la sección delgada No 5 (9108.32' MD), en esta zona de la muestra se ilustra cómo la composición principal de las areniscas no es la de cuarzo, sino la de fragmentos líticos (en su mayoría alterados). Los fragmentos líticos principalmente proceden de volcánicas afaníticas y posiblemente vidrio recristalizado; es muy posible que la mayoría de los feldespatos observados también procedan de megacristales de estas volcánicas; la proporción lava/ceniza no se puede establecer aún, sin embargo: la participación de ceniza (directa o retrabajada) debería ser la más importante en los fragmentos que estén menos alterados. La proporción líticos:Feldespato es ligeramente mayor y sigue coincidiendo con el campo de “Arco disectado” de Dickinson et al., (1983; Fig 1), en su porción derecha.

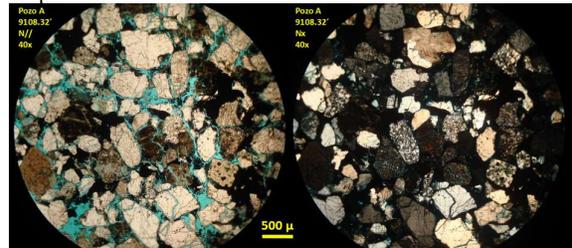


Figura-17. Fotomicrografía 4 del microscopio óptico (40x) de la sección delgada No. 5 de la Formación Cardalitos Basal.

La **Figura 18** describe la petrografía de otra parte de la sección delgada No 5 (9108.32' MD) en donde se observan tres fragmentos líticos de origen volcánico alineados; el inferior de bordes redondeados (contorno triangular tipo esquirla) es el que se muestra más alterado a una arcilla marrón-rojiza (posiblemente smectita nontronítica); los dos superiores son sub-angulares y más translúcidos; ambos parecen ser el mismo tipo de matriz afanítica de origen félsico, algunos micro-fenocristales anhédricos y euhédricos pueden ser de feldespato alcalino (flechas verdes); se considera que son volcánicas sobresaturadas en sílice. Los tres granos tienen tamaño de arena gruesa.

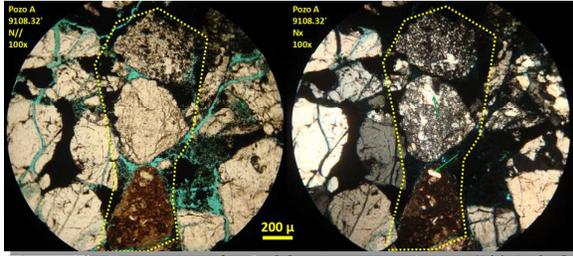


Figura-18. Fotomicrografía 5 del microscopio óptico (100x) de la sección delgada No. 5 de la Formación Cardalitos Basal.

La **Figura 19** describe la petrografía de otra zona de la sección delgada No 5 (9108.32' MD) en donde se muestra una masa de clorita (cf. “leptoclorita”, Trögger, 1971: 110, 115, 118) microfibrosa (elipse amarilla), de origen hidrotermal/volcánico. Es característica la absorción del color de interferencia por el color natural y los colores anómalos de interferencia. Puede ser un fragmento de amígdala o un pseudomorfo de máfico, transportado con poco retrabajo, debido a la consistencia microfibrosa del mineral. Este fragmento se aprecia rodeado por granos de cuarzo policristalino (elipses azules) y monocristalino

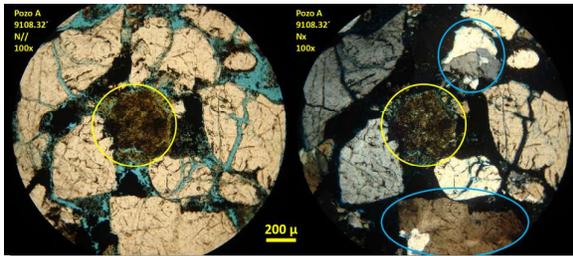


Figura-19. Fotomicrografía 6 del microscopio óptico (100x) de la sección delgada No. 5 de la Formación Cardalitos Basal.

La **Figura 20** describe la petrografía de otra zona de la sección delgada No 5 (9108.32' MD) en la que se pueden reconocer otros tres fragmentos líticos principales. Los tres son de diámetro “arena gruesa” (0.5 – 1.0 mm), y en este caso sólo los dos superiores, tienen alteración arcillosa a smectita-nontronita y el inferior, es más translúcido; igualmente “plagado” pirita intracrystalina de 5-10 micras (dispersa). Los granos más alterados, tienen la pirita más bien concentrada en microfracturas. La proporción líticos+feldespatos sigue siendo mayor que la de cuarzo monocristalino.

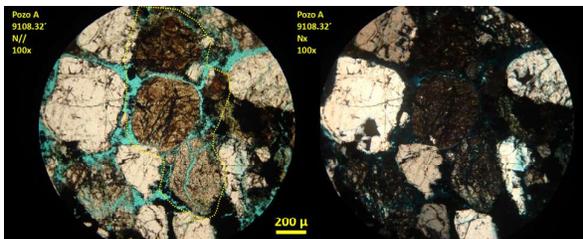


Figura-20. Fotomicrografía 7 del microscopio óptico (100x) de la sección delgada No. 5 de la Formación Cardalitos Basal.

La **Figura 21** describe la petrografía en otra zona de la sección delgada No 5 (9108.32' MD) donde se muestra

un fragmento de feldespato completamente sericitizado (contorno rojo). El grano tiene 430 micras de diámetro mayor. Todo lo opaco que se ve en la imagen a N//, es pirita autigénica (Elipse amarilla). Nótese que estos cristales (la mayoría entre 20 y 10 micras) no invaden el interior del grano. Esto se traduce en que el fenómeno de sericitización es un proceso anterior al de formación de la pirita (de hecho, la sericitización es en la roca ígnea original y la pirita es en la diagénesis de la arenisca).

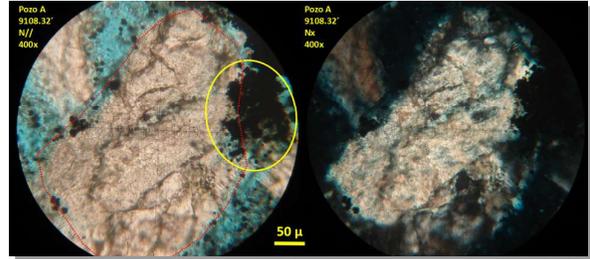


Figura-21. Fotomicrografía 8 del microscopio óptico (400x) de la sección delgada No. 5 de la Formación Cardalitos Basal.

La **Figura 22** muestra la sección delgada No 6 del Pozo A en la profundidad de 9099.95' MD perteneciente a la Formación Cardalitos Basal. En esta sección delgada se describe una arenisca lítica de grano grueso (500-1000 micras). La gran mayoría de los granos oscuros son fragmentos de volcánicas (cenizas) alterados a arcilla smectítica (marrón-rojizo) e illítica (verdosos).

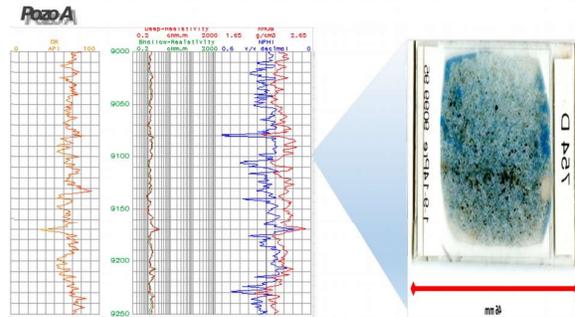
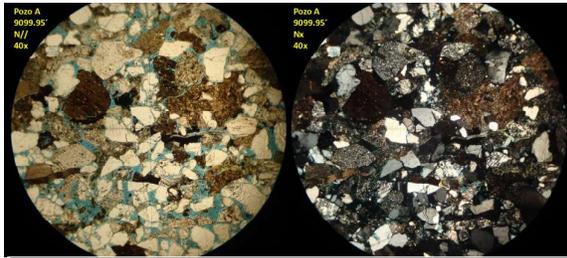


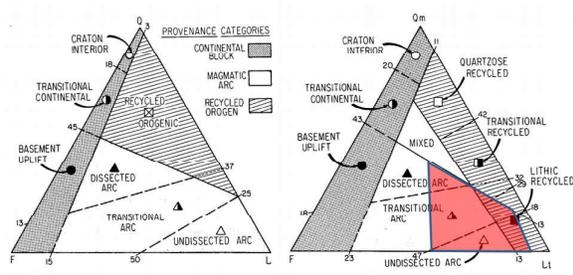
Figura-22. Sección Delgada No. 6 (9099.95' MD) de la Formación Cardalitos Basal

La **Figura 23** describe una parte de la sección delgada No. 6 (9099.95' MD) en donde se puede apreciar cómo la cantidad de feldespatos + fragmentos líticos puede llegar a ser el 80 % de la muestra (12 % cuarzo monocristalino y un 8 % de porosidad). La mitad de ellos se encuentra alterada a minerales de arcilla marrón-rojizo (smectíticos-cf. “nontroníticos” y cloríticos). La cantidad de líticos es tan grande que podría caer en las zonas de Arco Transicional o Lítico Reciclado de un arco no disectado (Dickinson *et al.*, 1983).



**Figura-23.** Fotomicrografía 1 (40x) de la sección delgada No. 6 (9095' MD) de la Formación Cardalitos Basal.

Las areniscas de grano grueso observadas en las secciones delgadas del Pozo A, muestran una clara tendencia de Arco: especialmente en las zonas de Arco Transicional y No Disectado (**Figura 24**). Lo importante de ello deriva en que: siendo la mayoría de los granos provenientes de volcánicas félsicas (la mayoría ceniza, con evidencia originalmente afanítica y la mayoría alterados a smectitas y clorita) y de feldespatos alcalinos con y sin alteración tipo sericitica (hidrotermal) o meteórica (arcillas), la interpretación de los registros de rayos gamma y resistividad, entre otros, debe hacerse con una óptica muy diferente a la tradicional de secuencias con arenas cuarzosas.



**Figura-24.** Diagrama QFL (izquierda) y QmFLt (derecha) para areniscas terrígenas mostrando subdivisiones propuestas de acuerdo al tipo de proveniencia inferido, modificado de Dickinson y Suezek (1979). Los símbolos geométricos en varios campos composicionales (triángulos abiertos, triángulos rellenos, triángulos rellenos a la mitad, círculos y cuadrados) indican el tipo de proveniencia inferida en los diagramas QFL/QmFLt. (Dickinson et al., 1983).

#### 4 Caracterización de arcillas

Los minerales de arcilla están constituidos por agregados de silicatos de aluminio hidratados, procedentes (en parte) de la alteración de aluminosilicatos y capaces de ser transportadas en forma coloidal en la naturaleza. Granulométricamente, el “tamaño arcilla” de partícula es inferior a 0,0039 mm. Se caracteriza por adquirir plasticidad al ser mezclada con agua y dureza al calentarla por encima de 800 °C.

Tipos de Arcillas de acuerdo a su mineralogía

“Caolinita”  $Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$ : Es una arcilla que se encuentra con mayor frecuencia en las areniscas. Comúnmente se encuentran relleno los poros aunque a veces pueden delinearlos La Caolinita causa problemas

de migración de finos. Se dispersa en agua dulce y causa taponamiento producto de los diferenciales de presión que ocurren durante la vida productiva del pozo.

“Clorita”  $(Mg, Fe^{++}, Fe^{+++}, Al)_{5-6} [(Al, Fe^{+++})_x Si_{4-x} O_{10}] (OH)_8$ : es un grupo muy importante y suele presentarse como sobrecrecimientos toptáxicos sobre cuarzo, con hábitos muy particulares, reconocibles en microscopía electrónica (SEM). La Clorita presenta una Capacidad de Intercambio Catiónico (CEC) hasta cuatro veces mayor que la Caolinita y es inestable en tratamientos de yacimiento con ácido Clorhídrico (HCl), causando precipitados de cloruro de hierro (FeCl), los cuales taponan las gargantas porales.

“Illita”  $(K, H_3O^+) (Al, Mg, Fe)_2 [(Si, Al)_4 O_{10}] (OH)_2 \cdot H_2O$ : su origen es muy variado y el hábito microscópico (SEM) puede ser desde escamoso hasta filamentosos. La Illita puede causar problemas de migración de finos y presenta intercambio de iones, con hinchamiento. Su contenido de Potasio (K), puede causar precipitación de flúor-silicatos cuando se emplea tratamiento con ácido fluorhídrico. Debido a su hábito fibroso, presenta alta capilaridad por lo que tiende a adsorber moléculas de agua, que sumadas a su contenido de agua estructural, induce estimaciones de porosidad falsas.

“Smectita” (Grupo de la Montmorillonita)  $(Na, Ca/2)_{0.33} (Al, Fe)_{2-3} [(Si, Al)_4 O_{10}] (OH)_2 \cdot n H_2O$ : Su origen en los sedimentos es muy variado; en general, se forman a partir de la alteración meteórica o autigénica de fragmentos líticos lábiles, especialmente los de origen volcánico. Se caracterizan por su CEC (Capacidad de Intercambio Catiónico o *Cation Exchange Capacity*) más alto que el resto de los minerales de arcilla y por su capacidad de hincharse por la adición de agua a su estructura. Su hábito característico es escamoso desordenado (SEM) y el estar formando intercrecimientos muy variados con Illita (variedades I/S). A medida que aumenta el % de Illita en las estructuras I/S, disminuyen las propiedades de hinchamiento que caracterizan a la Smectita “pura”, por lo que se debe tener un conocimiento preciso del tipo de arcilla que existe en el yacimiento en todo momento.

#### 5 Efectos de la arcilla en “pays” de baja resistividad

La presencia de altos contenidos de minerales de arcilla en las arenas-yacimiento es la principal responsable de los “pays” de baja resistividad. Estas pueden estar distribuidas como interestratificaciones pelíticas, fases de matriz detrítica o como parte discreta dentro de fragmentos líticos transportados. Otras causas atribuibles a la baja resistividad en estos “pays”, están relacionadas directamente con el tamaño de grano, fragmentos de rocas ígneas y metamórficas, así como también a la presencia de otros minerales conductivos tales como la pirita.

Sumarizando lo anterior: la presencia de arcilla afectará en mayor o menor grado la resistividad dependiendo de:

- La proporción de arcilla con respecto al volumen de roca
- Las propiedades físicas de la arcilla
- La manera como la arcilla se ha distribuido en la formación.

Desde que las arcillas tengan agua incorporada, son normalmente buenas conductoras eléctricas y su efecto se suma a la conductividad producida por la solución contenida en los espacios porosos. En consecuencia:

*Mayor Arcillosidad => Mayor Conductividad ó Menor Resistividad de la roca.*

Una “arena arcillosa” puede contener una alta saturación de petróleo o gas y aún mostrar resistividades muy bajas por efecto de la conductividad de la arcilla. En otras palabras el índice de resistividad y de producción de una arena arcillosa, puede llegar a ser muy bajo.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) (expresada en miliequivalente por 100 gramos de arcilla seca), mide la capacidad de una arcilla para liberar cationes. Arcillas con un alto CEC, tendrán mayor impacto en la reducción de la resistividad que aquellas con un bajo CIC. Por ejemplo la montmorillonita tiene un CEC de 80 a 150 meq/100g y la caolinita es solo de 3-15 meq/100g.

Muchas herramientas de registro no tienen la resolución vertical para resolver valores de resistividad en capas delgadas de arenas y lutitas, en vez de esto, las herramientas dan una medida de resistividad promedio sobre la secuencia de capas.

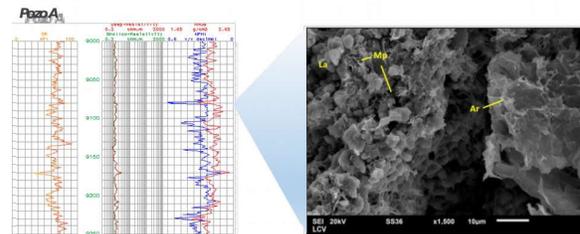
El reto de interpretar arenas de baja resistividad, depende de extraer la medida correcta de la resistividad de la formación, estimando la arcillosidad y luego derivando la saturación de agua, obtenida de algunas modificaciones de la ley de Archie.

## 6 “Pays” de baja resistividad en la Formación Zorritos – Cuenca de Tumbes

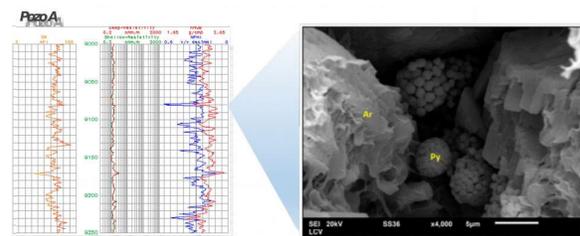
La Formación Zorritos en la Cuenca de Tumbes al oeste de Perú, es una de las mayores productoras de gas y crudo liviano del país, la mayoría de esta producción viene de arenas delgadas que son productoras con lecturas en perfiles de pozos con valores de resistividad muy bajos, de 2 a 6 ohm.m. Estas arenas producen hidrocarburo liviano entre los 300 y 400 bopd. Tomando lo anteriormente descrito, se realizó un modelo integrado donde se incluyeron perfiles de pozos, datos de núcleo y datos de producción que permitieron detectar arenas con hidrocarburos en zonas que habían sido enmascaradas

por el efecto mineralógico en las lecturas de los perfiles de resistividad.

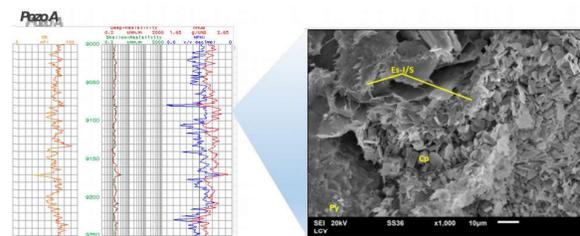
En el pozo A, se realizaron análisis SEM (Microscopía Electrónica de Barrido o *Scanning Electron Microscopy*) en muestras asignadas a la Formación Zorritos. Estos análisis arrojaron datos claves principalmente en la validación de la presencia de abundante piritra framboidal, así como la caracterización de las arcillas y su efecto en el sistema poroso, y en la reducción de la permeabilidad y por ende en la capacidad de flujo de la roca ( $K \cdot h$ )



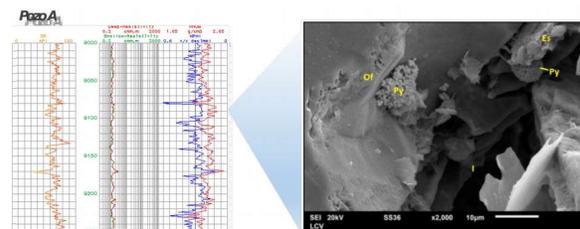
**Figura-25.** Imagen SEM Muestra A. Se puede observar un poro intergranular, arcillas smectíticas, correspondientes a un “coating” arcilloso y un lítico devitrificado con porosidad intergranular y crecimiento de arcilla entre los microcristales producto de la alteración. (LCV,2014).



**Figura-26.** Muestra B. Cemento representado principalmente por “coatings” arcillosos de composición smectítica e illita-smectita dominantes, agregados microcristalinos y framboidales de piritra ocupando espacios intergranulares. (LCV, 2014).

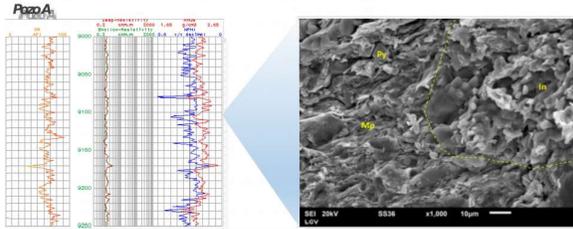


**Figura-27.** Muestra C. Cemento representado principalmente por “coatings” arcillosos de composición smectítica e illita-smectita dominantes, framboides de piritra ocupando espacios intergranulares





**Figura-28.** Muestra D. Composición smectita e illita-smectita. También se identificaron crecimientos sintaxiales de feldespatos y agregados microcristalinos, así como framboides de pirita ocupando los espacios intergranulares. El sistema poral está constituido por poros intergranulares. (LEV, 2014).



**Figura-29.** Muestra E. Cemento representado por pirita mezclada en la matriz arcillosa (en la imagen SEM se observa como cristales octaédricos) se distinguen además “coating” arcillosos que cubren parcialmente los granos, porosidad intergranular escasa debido a la presencia de matriz. (LCV, 2014).

Estos análisis permitieron identificar:

- La presencia de abundante mineral conductivo como la pirita creciendo en espacios intergranulares, esto tiene un efecto directo en la disminución de las lecturas resistividad proveniente de los registros eléctricos, dando como resultado altos valores de saturación de agua ( $S_w$ ) al aplicar modelos tipo Archie.
- Presencia de abundante smectita y subordinadas clorita e illita-smectita, los cuales tienen una carga superficial negativa que hace que los valores de resistividad de los registros disminuya.
- Por último podemos mencionar la presencia de “coatings” arcillosos ó arcillas envolviendo los granos, incrementando sensiblemente los valores de saturación de agua irreducible ( $S_{wi}$ ).

## Conclusiones

Debido a la problemática de calidad de roca y los problemas inherentes a la productividad que presentan estos yacimientos, nos llevaron a realizar estudios petrofísicos más completos para identificar la causa de dichos problemas, encontrándose lo siguiente:

- En la Formación Zorritos las arcillas son las principales responsables de las bajas lecturas de resistividad en los perfiles de pozo, así como el tamaño de grano y la presencia de pirita en proporciones de hasta 5-6 %.
- La presencia de arcillas complejas, principalmente “smectita”, la cual al entrar en contacto con el agua aumenta varias veces su tamaño, (“se hincha”), taponando los canales poroso-permeables, lo cual tiene un efecto directo en la producción de los pozos y en su rápida declinación.
- En el manejo de un reservorio es de gran importancia considerar la composición de los minerales de arcillas, pues éstos reaccionan de en formas muy variadas con los fluidos y tratamientos usados en la perforación, completación y producción de los pozos.
- Cada grupo de minerales de arcillas, contienen varios miembros los cuales pueden ser muy diferentes en términos de morfología e incluso composición y propiedades químicas, por lo que la velocidad de reacción entre dichos minerales de arcillas y el fluido de completación introducidos en el pozo, pueden variar de modo significativo, incluso para un mismo grupo mineral.

## Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a la Vicepresidencia de Geociencias y la Gerencia de Yacimientos-Perú de Pacific Exploration & Production, por facilitar el desarrollo y publicación de este trabajo.

## Referencias

- Bayer, G.; Rogers, J.J.W.; Adams, J.A.S. and Haack, U.K. (1969) *Thorium*. Handbook of Geochemistry, Springer-Verlag (chapter 90): 49 p.
- Bosch et al.**, (2013) A Review on Tectonic Record of Strain Buildup and Stress Release across the Andean Forearc along the Gulf of Guayaquil-Tumbes Basin (GGTB) near Ecuador-Peru Border. *International*



- Journal of Geosciences* 4 : 618-635.
- Dickinson, W.R. and Suczek, C. (1979) Plate Tectonics and sandstone compositions. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 63 (12): 2164-2182.
- Dickinson, W.R.; Beard, L.S.; Brakenridge, G.R.; Erjavec, J.L.; Ferguson, C.; Inman, K.F.; Knepp, R.A.; Lindberg, F.A. and Ryberg, P.T. (1983) Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geological Society of America Bulletin* 94 (2) : 222-235.
- Heinrich, E. Wm. (1970) *Identificación microscópica de los minerales*. Ediciones URMO (Bilbao): 456 p.
- Hurley, P.M. and Fairbairn, H.W. (1957) Abundance and distribution of Uranium and Thorium in Zircon, Sphene, Apatite, Epidote and Monazite in Granitic Rocks. *Transactions, American Geophysical Union* 38 (6): 939-944.
- LCV (2014) Sondeo A21D (Albacora). Estudio sedimentológico, petrográfico, diagenético, mineralógico, petrofísico y bioestratigráfico. Lima (Perú): 139 p. con 6 láminas anexas.
- Pechinig, R.; Delius, H. and Bartetzko, A. (2005) Effect of compositional variations on log responses of igneous and metamorphic rocks. II: acid and intermediate rocks. In: Harvey, P.K.; Brewer, T.S.; Pezard, P.A. and Petrov, V.A.: *Petrophysical Properties of Crystalline Rocks*. The Geological Society of London, Spec. Pub. 240: 279-300.
- Schoene, B.; Schaltegger, U.; Brack, P.; Latkoczy, Ch.; Stracke, A. and Günther, D. (2012) Rates of magma differentiation and emplacement in a ballooning pluton recorded by U-Pb TIMS-TEA, Adamello batholith, Italy. *Earth and Planetary Science Letters* 355-356 (*Elsevier*): 162-173.
- Tröger, W. E. (1971) *Optische bestimmung der Gesteinbildenden Minerale*. Teil 1 Bestimmungstabellen. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägelle u. Obermiller) (Stuttgart, Deutschland): 188 p. mit Interferenzfarbenskala und 2 farbigen Stereogrammen auf 3 Beilagen.
- Witt, C. and Bourgois, J. (2010) Forearc basin formation in the tectonic wake of a collision-driven, coastwise migrating crustal block: The example of the North Andean block and the extensional Gulf of Guayaquil-Tumbes Basin (Ecuador-Peru border area). *Geological Society of America Bulletin* 122 (1-2): 89-108.
- Zhu, X.; Yun, L.; Jianming, G.; Sheng, Z.; Hai, X.; Tingting, Z.; Shiquan, Z.; Jing, B. and Kai, L. (2014) Detection of Low Resistivity Reservoirs using GR Spectrometry Logs: A Case Study. *Search and Discovery Article # 41350* : 12 p.

