

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y
PETRÓLEOS**

**ESTRATIGRAFÍA, SEDIMENTOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LA
FORMACIÓN HOLLÍN EN LA ZONA SUBANDINA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
GEOLOGÍA**

DANIEL SEBASTIÁN MAYA ORTIZ

daniel.maya@epn.edu.ec

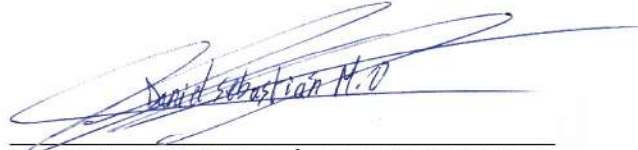
DIRECTOR: PhD. CRISTIAN FERNANDO VALLEJO CRUZ

cristian.vallejov@epn.edu.ec

DMQ, septiembre 2022

CERTIFICACIONES

Yo, DANIEL SEBASTIÁN MAYA ORTIZ declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



DANIEL SEBASTIÁN MAYA ORTIZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DANIEL SEBASTIÁN MAYA ORTIZ, bajo mi supervisión.



PHD. CRISTIAN FERNANDO VALLEJO CRUZ

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

DANIEL SEBASTIÁN MAYA ORTIZ

PhD. CRISTIAN FERNANDO VALLEJO CRUZ

DEDICATORIA

A todos los que creyeron alguna vez en mí.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia, principalmente a mis abuelitos, Luis y Alicia que han sido mi guía, mi soporte y mi motor para conseguir todos mis objetivos, cada logro que consiga será gracias a ellos y para ellos, de igual manera agradezco a mis padres Marcelo y Gretha por hacer hasta lo imposible por ayudarme a conseguir mis objetivos, y agradezco a mi hermano por su cariño sincero y su apoyo incondicional.

Al PhD. Cristian Vallejo por ser un excelente profesor y ser una inspiración durante mi formación académica, además le agradezco por su guía y apoyo brindado durante la ejecución de este proyecto.

A Galo Plaza por mostrarme este camino maravilloso de la geología, con todos sus consejos y anécdotas que sirvieron como motivación cada instante de mi carrera profesional, además de motivarme a continuar con mis estudios y ser un mejor profesional cada día.

To Alec Duncan my mentor thank you so far for show me the beauty of petroleum geology and how fun it is, thanks for your patience and your support in my road to achieve my goals.

Al equipo de Desarrollo de yacimientos de Repsol Ecuador S.A ahora llamado Petrolia S.A por su aprecio y acogida durante mi paso por la empresa, en especial a Roberto Villalva por brindarme su amistad y sus enseñanzas dentro del mundo petrolero.

A mis compañeros por ser un grupo unido durante toda la vida universitaria.

A Ismael por ser un compañero y amigo de verdad, que siempre voy a apreciar como mi hermano.

A Jannis por siempre ayudarme en todo lo que este a su alcance y por su gran cariño.

A Diego por ser siempre un buen amigo y ser una persona siempre dispuesta a ayudar.

A Fernanda por su amistad sincera, carisma y bondad conmigo durante toda mi carrera universitaria.

A mis amigas Doménica Córdova, Doménica Villalva, Doménica Ramírez y Estefi por siempre ser mis concejeras y soporte en cada paso de mi vida.

A mis amigos Elfer, Andrés, Josué, Patricio, Alfredo, Juanjo y Cristian por siempre estar para mí en todo momento.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABLAS.....	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificativos.....	2
1.3 Objetivo general.....	2
1.4 Objetivos específicos.....	2
1.5 Alcance.....	3
1.6 Marco teórico.....	3
1.6.1 Ubicación y acceso.....	3
1.6.2 Geología regional.....	4
1.6.3 Cuenca Oriente.....	5
1.7 Formación Hollín.....	10
1.7.1 Facies.....	10
1.7.2 Tectónica.....	10
1.7.3 Sedimentología y ambientes deposicionales.....	11
1.7.4 Miembros.....	11
2 METODOLOGÍA.....	12
2.1 Revisión bibliográfica.....	12
2.2 Recolección de datos.....	13
2.3 Análisis de la información.....	18
3 RESULTADOS.....	21
3.1 Análisis litogeoquímico de elementos mayores.....	21
3.1.1 Clasificación litológica.....	21
3.1.2 Diagramas bivariantes.....	22

3.1.3	Diferenciación de sedimentos marinos y no marinos.....	24
3.2	Análisis litogeoquímico de elementos traza	25
3.2.1	Composición de sedimentos.....	25
3.2.2	Ambientes paleoredox.....	29
3.2.3	Índice de meteorización.....	30
3.3	Análisis quimioestratigráfico.....	31
3.3.1	Registros Gamma Ray y BI shale sintéticos.....	32
3.3.2	Asociación mineral.....	34
3.3.3	Proveniencia.....	38
3.3.4	Contraste de ambientes paleoredox e índices de meteorización...	40
4	Conclusiones.....	43
5	Recomendaciones.....	44
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa topográfico de la zona de trabajo.....	4
Figura 2.	Máquina perforadora proporcionada por GEOSTRAT S.A.....	13
Figura 3.	Leyenda modificada de la columna estratigráfica de Vallejo et al. (2021).....	13
Figura 4.	Columna estratigráfica modificada de Vallejo et al. (2021).....	14
Figura 5.	Máquina pulverizadora de rocas.	15
Figura 6.	Mortero de acero inoxidable.....	16
Figura 7.	Capsula rellena de la roca pulverizada, lista para el análisis de XRF.....	16
Figura 8.	Equipo VANTA VMR Geochemistry LOD serie M de OLYMPUS perteneciente a GEOSTRAT S.A.....	17
Figura 9.	Diagrama de clasificación de areniscas y lutitas terrígenas de Herron (1988)...	22
Figura 10.	Diagramas bivariantes tipo Harker para todos los óxidos de elementos mayores.....	23
Figura 11.	Diagrama bivariante de clasificación de lodolitas reportado por Spalletti et al. (2014).....	24
Figura 12.	Diagrama ternario de diferenciación de sedimentos marinos de Ratcliffe et al. (2007).....	25
Figura 13.	Diagrama de identificación de composiciones para areniscas de Floyd y Leveridge (1987).....	27

Figura 14. Diagrama de identificación de composición mineral según la proporción K vs Th de Quirein et al. (1982).....	28
Figura 15. Diagrama de discriminación química de rocas volcánicas fuente de Winchester y Floyd (1977).....	28
Figura 16. Diagramas de discriminación de ambientes paleoredox de Rimmer (2004) A) Ni/Co vs V/Cr y B) Ni/Co vs Mo.....	30
Figura 17. Diagrama bivalente de Th vs Th/U para analizar tendencias de meteorización de McLennan et al. (1993).	31
Figura 18. Registro sintético de Gamma Ray, registro BI-Shale y columna estratigráfica modificada de Vallejo et al. (2021).....	33
Figura 19. Registro sintético de Gamma Ray, Si, Al, Fe, Mg, Mn, Ca, Ti, K, P y columna estratigráfica modificada de Vallejo et al. (2021).....	36
Figura 20. Registro sintético de Gamma Ray, ratio Ti/Zr y columna estratigráfica de la Formación Hollín, modificada de Vallejo et al. (2021).....	38
Figura 21. Registro sintético de Gamma Ray, Rb/Sr, Ba/Sr, U/Th, Ni/Co, Mo, V y columna estratigráfica modificada de Vallejo et al. (2021).....	40

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de litofacies y ambientes de depósito para cada uno de los miembros de la Formación Hollín modificado de Vallejo et al. (2021).....	10
Tabla 2. Tabla resumen relación elemento químico-mineral para rocas sedimentarias... 19	19
Tabla 3. Tabla resumen relación elemento químico-fuente relacionada para rocas sedimentarias modificado de Turner et al. (2015).....	20

RESUMEN

Este trabajo se basó en el uso de herramientas geoquímicas como la quimioestratigrafía y diagramas geoquímicos discriminitorios (litogeoquímica), con las siguientes aplicaciones: clasificación litológica, proveniencia, composición de sedimentos, ambientes paleoredox, índices de meteorización, asociación mineral, diferenciación de sedimentos marinos y no marinos de la formación Hollín en la zona Subandina de la Cuenca Oriente.

Los resultados para el miembro inferior de la Formación Hollín reflejaron una predominancia de cuarzoarenitas no marinas con composición ácida a intermedia, sin ambientes paleoredox, índices de meteorización altos y con un aporte mayoritariamente andino. Por otro lado, los resultados para el miembro superior de la formación Hollín mostraron una variación litológica importante con predominancia en el campo de lutitas y wackes no marinos con composición ácida a intermedia, que fueron afectados por condiciones reductoras (ambientes paleoredox), meteorización baja y con un aporte mayoritariamente cratónico. Los datos geoquímicos recopilados en cada una de las litofacies de la Formación Hollín se contrastó con los datos estudios de Mariño (2015) y Vallejo et al. (2021), de esta forma se observó que dichos estudios son concordantes con los resultados de esta investigación.

PALABRAS CLAVE: Hollín, litogeoquímica, quimioestratigrafía.

ABSTRACT

This work was based on the use of geochemical tools such as chemostratigraphy and discriminating geochemical diagrams (litho-geochemistry), with the following applications: lithological classification, provenance, sediment composition, paleoredox environments, weathering indices, mineral association, differentiation of marine sediments and non-marines of the Hollín formation in the Sub-Andean zone of the Oriente Basin.

The results of the lower member of Hollín formation reflected a predominance of non-marine quartz sandstones with an acidic to intermediate composition, without paleoredox environments, high weathering rates and with a mainly Andean contribution. On the other hand, the results for the upper member of the Hollín formation showed an important lithological variation with predominance in the field of non-marine shale and wackes with acidic to intermediate composition, which were affected by reducing conditions (paleoredox environments), low weathering rates and with a mainly cratonic contribution. The geochemical data collected in each of the lithofacies of the Hollín formation was compared with the data from studies by Mariño (2015) and Vallejo et al. (2021), in this way it was shown these studies are consistent with the results of this research.

KEYWORDS: Hollín, Geochemical, chemostratigraphic.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El inicio de la investigación geológica en la Cuenca Oriente comenzó a inicios del siglo XX con el estudio de exploración petrolera de Sinclair y Wasson (1923) el cual fue auspiciado por la empresa estadounidense *Leonard Exploration Company* con el objetivo de conocer el potencial petrolífero de la Cuenca Oriente pues en ese entonces no existían mapas ni reportes geológicos de ningún tipo, después de varios años en el trabajo de Wasson y Sinclair (1927) se presentó por primera vez una descripción geológica perteneciente a la cuenca, en este mismo trabajo se describió también por primera vez a la Formación Hollín, la cual está formada por areniscas finas masivas con saturación de petróleo asfáltico (Wasson y Sinclair, 1927).

Tschopp (1953) hace un estudio mucho más detallado donde se reportan una mayor cantidad de estructuras sedimentarias, además de un mayor detalle en la litología donde se reporta la presencia de lutitas micáceas y lutitas negras con presencia de carbón en la sección superior de la formación.

White et al. (1995) reporta una división estratigráfica formal de la Formación Hollín en tres miembros, los cuales son el miembro *Alluvial valley fill*, *Main Hollín* y *Upper Hollín* esta división está dada por los diferentes ambientes de deposición sedimentaria donde White et al. (1995) los definió como ambiente de relleno aluvial de un valle, río entrenzado y ambiente costero dominado por mareas, durante el Albiano y el Aptiano.

Shanmugam et al. (2000) introduce el concepto de que toda la Formación Hollín sería parte de un sistema estuarino dominado por mareas, el cual desde su miembro inferior representaría el inicio del estuario con canales fluviales de baja sinuosidad que evolucionarían a un estuario dominado por mareas bien definido en el miembro superior de la formación.

Mariño (2015) estudia a la Formación Hollín con un enfoque sedimentológico y estratigráfico detallado haciendo uso de una herramienta de difracción de rayos X, definiendo así varias litofacies que ayudaron a definir de mejor manera los ambientes de deposición sedimentaria de la Formación Hollín, este estudio se realizó desde un afloramiento en el Subandino en la vía a la casa de máquinas del proyecto hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair, el cual es el mismo afloramiento estudiado para el presente trabajo.

Vallejo et al. (2021) integra información geocronológica, proveniencia, estratigráfica y sedimentológica para las formaciones sedimentarias del Mesozoico y el Cenozoico dentro

de la Cuenca Oriente, con el propósito de entender de mejor manera los eventos que generaron los depósitos sedimentarios en la Cuenca Oriente, dentro de este estudio está incluida la deposición de la Formación Hollín, la cual cuenta con los mismos miembros asignados por White et al. (1995). Vallejo et al. (2021) realiza una definición más precisa de los ambientes de deposición sedimentaria con todas las evidencias recopiladas.

1.2 Justificativos

Este trabajo nace de la falta de estudios quimioestratigráficos dentro de la Cuenca Oriente, para este se realizó perforaciones de una pulgada de diámetro, donde el único aditamento de perforación fue agua dulce, con esto se pudo contar con muestras de roca fresca, es decir rocas sin meteorizaciones recientes que puedan perturbar la química de la roca.

El afloramiento donde se tomaron estas muestras de roca fue seleccionado por estar en el dominio tectónico subandino de la Cuenca Oriente, donde se puede encontrar todas las secuencias deposicionales de la Formación Hollín en superficie, pues esta formación dentro del resto de la Cuenca Oriente es de difícil acceso (solo por núcleos de perforación de empresas petroleras) por su alta profundidad al ser uno de los principales reservorios petrolíferos del país.

El análisis geoquímico de elementos mayores, así como el de elementos menores se realizó por medio de fluorescencia de rayos X (XRF) dentro de las instalaciones de GEOSTRAT S.A, este método a llegado a ser la elección predilecta de muchos goecientíficos dedicados a la geoquímica y a la quimioestratigrafía por arrojar datos bastante sólidos y ser un método fácil de usar (Craigie, 2018), el tiempo de análisis en cada muestra es de 120 segundos con una precisión de 99.7% (*Analizador XRF portátil Vanta: Serie Vanta | Olympus, s. f.*).

1.3 Objetivo general

Generar nueva información geoquímica y quimioestratigráfica de la Formación Hollín (miembro Hollín inferior o Main Hollín y miembro Hollín superior o Upper Hollín) en la zona Subandina en el afloramiento correspondiente a la vía de la casa de máquinas, en la central hidroeléctrica Coca-Codo Sinclair.

1.4 Objetivos específicos

1. Generar diagramas de discriminación de proveniencia, ambientes paleoredox y litológicos para la Formación Hollín con base en los datos geoquímicos generados de la metodología de análisis de fluorescencia de rayos X (XRF).

2. Presentar perfiles de variación de concentraciones (espectros quimioestratigráficos) de elementos mayores, traza y sus respectivas proporciones (ratios) con base en los datos obtenidos de la metodología de análisis de fluorescencia de rayos X (XRF), junto a una columna estratigráfica detallada de la Formación Hollín, para realizar interpretaciones de deposición de los miembros que conforman la misma.
3. Correlacionar información litológica, estratigráfica, sedimentológica y geoquímica de esta y otras investigaciones previas en la Formación Hollín, en la zona Subandina.

1.5 Alcance

Este trabajo de integración curricular presentado como requisito previo a la obtención de mi título de ingeniero en Geología se enfocó en conocer a detalle la deposición de los miembros Hollín Inferior y Hollín Superior durante el cretácico en la zona Subandina de la Cuenca Oriente usando como herramienta a la geoquímica. Para esto se extrajeron 86 núcleos de perforación de cada litofacies de la base del miembro Hollín inferior 35 [m] hasta la altura de 140 [m] de la columna estratigráfica de Vallejo et al. (2021). Se empleó un análisis de geoquímica inorgánica para elementos mayores y elementos traza basándose en diagramas preestablecidos por diferentes autores y espectros quimioestratigráficos de elementos diagnósticos a partir de un análisis de fluorescencia de rayos X (XRF), lo que permitió contrastar y correlacionar estos resultados geoquímicos con resultados petrográficos, sedimentológicos y la estratigráficos convencionales obtenidos en investigaciones previas.

Estos análisis de elementos mayores y traza permitieron analizar factores como estratos meteorizados durante su deposición, mineralogía asociada, proveniencia y ambientes paleoredox de la Formación Hollín. Los elementos mayores analizados fueron: SiO₂, Al₂O₃, FeO y Fe₂O₃, MgO, MnO, CaO, KO₂, TiO₂ y P₂O₅, mientras que los elementos traza analizados fueron: Rb, Th, Zr, U, Ni, Co, Mo, V, Sr, Nb, Y y Cr.

1.6 Marco teórico

1.6.1 Ubicación y acceso

Este estudio fue realizado en el límite entre el Cantón El Chaco y el Cantón Gonzalo Pizarro pertenecientes a las provincias de Napo y Sucumbíos respectivamente. Dentro del complejo de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, este está ubicado en la parte

nororiental de la vertiente este de la Cordillera Real al igual que el estudio de Mariño (2015) y Vallejo et al. (2021), en la vía a la casa de máquinas del complejo, cubriendo los kilómetros 13 y 14 de la vía donde están los afloramientos jurásico superior de Chapiza y cretácico inferior de Hollín.

Las vías de acceso dentro del complejo hidroeléctrico se encuentran en perfectas condiciones, aunque no están abiertas al público en general, para su ingreso es necesario hacer una solicitud de ingreso con CELEC-EP.

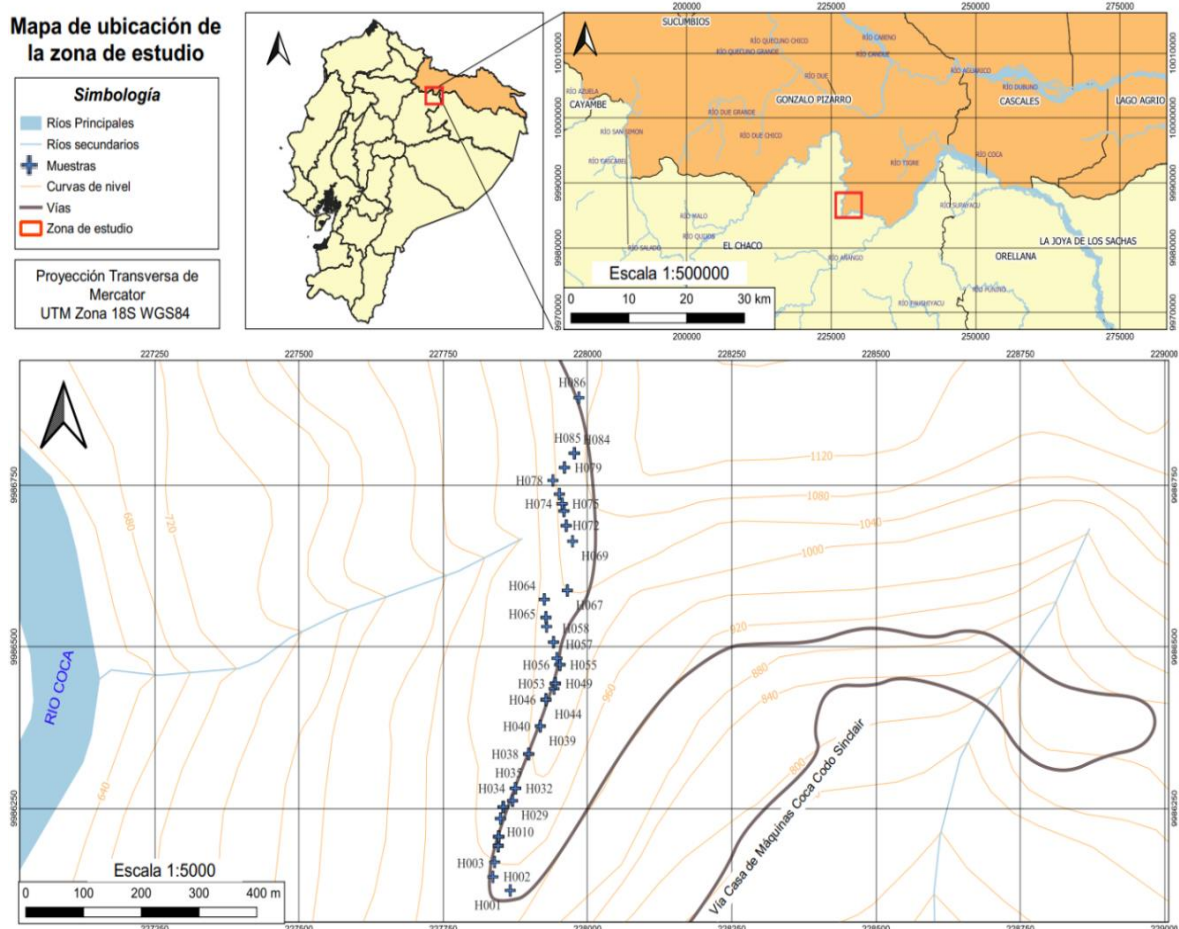


Figura 1. Mapa topográfico de la zona de trabajo.

1.6.2 Geología regional

En el margen Noroeste de América del Sur, se encuentra Ecuador entre Colombia y Perú, en los andes del norte, esta es una región donde se presenta una deformación intensa (Gutscher et al., 1999), al ser un margen convergente de placas tectónicas (placa de Nazca y Sudamericana), por la variación de densidades en ambas placas. La placa oceánica Nazca es subductada bajo la placa Sudamericana, siendo esto un factor clave en la evolución geológica del Ecuador continental, donde se pueden encontrar hasta 7 provincias

tectónicas diferentes (Costa, Cordillera Occidental, Bloque Amotape Tahuin, Cordillera Real, Cuenca Amor Lancones, Valle interandino y Oriente).

La Costa ecuatoriana está compuesta por terrenos con afinidades geoquímicas de Plateau oceánico y arco de islas (Reynaud et al., 1999; Luzieux et al., 2006; Hughes y Pilatasig, 2002; Kerr et al., 2002). La Cordillera Occidental consiste en rocas de afinidad oceánica, acrecionadas del cretácico tardío (Chew et al., 2007). La Cuenca Amor Lancones está representada por sedimentos cretácicos volcánicos, marinos y rocas volcánicas extrusivas (Winter et al., 2010). Dentro de la Cordillera Real y el Bloque Amotape Tahuin se albergan rocas sedimentarias e ígneas metamorfoseadas que se extienden desde el Paleozoico hasta el Cretácico Inferior (Spikings et al., 2021). En medio de las dos cordilleras se encuentra el valle Interandino, donde se presentan una serie de cuencas sedimentarias Neógenas principalmente en el sur, mientras que en la zona norte o septentrional se encuentra el Valle interandino (Hungerbühler et al., 2002; Winkler et al., 2005).

En dirección al este del Ecuador, se encuentra el Oriente ecuatoriano, compuesto por la zona Subandina (*Fold and thrust belt*) y la Cuenca Oriente con una configuración tipo foreland comprendida entre la cuenca de Putumayo y la cuenca de Marañón en Perú (Baby et al., 1999). Estas cuencas de países vecinos estuvieron conectadas por un mar epicontinental es así que en esta región existe evidencia del registro sedimentario que dejó la evolución de ambientes durante el Mesozoico- Cenozoico (Vallejo et al., 2021)

El volcanismo activo en todo el Ecuador continental en la actualidad y durante la formación del mismo ha dejado su huella, principalmente en las dos cordilleras y sus cercanías, sin embargo, en la Cuenca Oriente también es posible encontrar cuerpos volcánicos y magmáticos como son el volcán El Reventador (cercano a la zona de estudio), volcán Sumaco, Batolito de Zamora, Batolito de Abitagua, etc.

1.6.3 Cuenca Oriente

La zona Subandina al ser considerada parte de la Cuenca Oriente, cuenta con sus mismos ambientes sedimentarios y estratigrafía secuencial, solo con la diferencia de su dominio tectónico. Aquí repasaremos todos estos parámetros con el fin de dar una descripción completa de la Cuenca Oriente.

- **Formaciones que conforman la Cuenca Oriente**

La Cuenca Oriente cuenta con formaciones Paleozoicas, Mesozoicas y Cenozoicas. Las cuales se van a repasar de la más antigua a la más joven.

- **Formación Pumbuiza:** Está compuesta por pizarras de color gris y negro, con ciertas zonas con presencia de carbón, además, se encuentran areniscas cuarcíticas finas (Tschopp, 1953). Como resultado que la edad estratigráfica de Pumbuiza Fm. tiene más de 461 ± 32 Ma (Ruiz, 2002).
- **Formación Macuma:** La Formación Macuma perteneciente a la era paleozoica está compuesta principalmente por calizas silíceas con presencia fósil del periodo carbonífero, siendo esta la única formación fosilífera de esta antigüedad en el Ecuador (Lasluisa Molina y Moreno Cerón, 2018; Tschopp, 1953).
- **Formación Santiago:** La Formación Santiago está compuesta por 3 miembros principales: Miembro Río Santiago, Yuquianza y Patuca (Gaibor et al., 2008). Los cuales tienen un cambio de ambiente deposicional que van de un ambiente anóxico a óxico de base a tope respectivamente (Vallejo et al., 2021). El Miembro Río Santiago está compuesto por calizas y arenas calcáreas, Yuquianza está compuesto por una secuencia monótona de lutitas negras y Patuca consiste en una secuencia de areniscas, grauvacas y lutitas, intercaladas por flujos de lava y diques (Gaibor et al., 2008).
- **Formación Piuntza:** Con una edad jurásica de las formaciones Santiago y Piuntza se depositarían de forma simultánea (Vallejo et al., 2021), siendo Piuntza un arco volcánico, el cual sería causante de las lavas y diques presentes en la Formación Santiago.
- **Formación Chapiza:** Depositada durante el jurásico tardío al cretácico temprano la cual está compuesta por siltstones de color gris a rojo, areniscas y conglomerados (Gaibor et al., 2008; Vallejo et al., 2021). El miembro superior de Chapiza, llamado miembro Yaupi está compuesto principalmente de depósitos volcánicos (Gaibor et al., 2008; Romeuf et al., 1995; Tschopp, 1953, 1956; Vallejo et al., 2021; Romero et al., 2021) que pertenecerían al volcanismo de la Formación Misahuallí (White et al., 1995).
- **Formación Misahuallí:** Está comprendida por lavas basálticas a riolíticas, con una composición calco-alcalina que sugiere que se haya formado por un margen continental activo (Romeuf et al., 1995) La deposición Misahuallí fue simultánea a la deposición del miembro superior de Chapiza.

- **Formación Hollín:** Según White et al. (1995), la Formación Hollín está compuesta tres miembros, Alluvial Valley Fill, Main Hollín y Upper Hollín, los cuales de base a tope están divididos en las siguientes secuencias deposicionales: Alluvial Valley Fill, braid plain, coastal plain, shorezone y open marine. Aunque autores como (Baby et al., 2004) sintetizan a la Formación Hollín en miembro principal y superior. “La Formación Hollín fue depositada sobre una inconformidad angular, que la separa de la Formación Chapiza” (Shanmugam et al., 2000; Vallejo et al., 2021). Jaillard et al. (1997), Ordoñez (2006) y Vallejo et al. (2002) con sus aportes micropaleonológicos y las edades radiométricas U-Pb reportadas por Vallejo et al. (2021). Nos permiten conocer que la Formación Hollín pertenece al Albiano temprano a medio en sus miembros Main Hollín y Upper Hollín, mientras que el Alluvial Valley Fill se depositaría durante el Aptiano tardío.

- **Formación Napo:** “La Formación Napo consiste en lutitas ricas en materia orgánica, grainstones bioclásticos y packstones, y areniscas terrigenas” (White et al., 1995). La deposición de la Formación Napo y su distribución fue principalmente controlada por las subidas y bajadas del nivel del mar, además de la actividad tectónica. Los ciclos de deposición de la Formación Napo fueron subdivididos en cuatro secuencias estratigráficas separadas por intervalos de límites de secuencia erosionales. El nivel Eustático sería el causante de la creación de estas superficies erosionales (Ramirez, 2021). Por lo que según lo reportado por Vallejo et al. (2021) La Formación Napo se depositó del Cretácico temprano al cretácico tardío.

- **Formación Tena:** La Formación Tena marca un cambio de ambiente de mar abierto a un ambiente de agua dulce y salobre. Su litología consiste en arcillas multicolores en hacia su tope, mientras que hacía la base se encuentran areniscas (Tschopp, 1953). Es decir que a la base se encuentra el miembro Basal Tena conocido por su importancia económica en el ámbito petrolífero. Esta formación se depositó durante el Maastrichtiano con un aporte sedimentario principalmente andino (Vallejo et al., 2021), Mientras, “la parte superior es una sucesión monótona de lutitas y limolitas rojas con niveles verdosos de medio más típicamente continental, aunque costero, representa una sucesión típicamente regresiva, desde un medio marino somero a un medio continental costero” (Jaillard et al., 1997).

- **Formación Tiyuyacu:** Cuenta con dos miembros uno inferior y otro superior, “El miembro inferior (Tiyuyacu inferior) tiene una edad eocénica inferior” (Baby et al., 2004), en cambio, “El miembro superior tiene una edad eocénica medio a superior” (Baby et al., 2004). Está compuesta por areniscas y conglomerados, con presencia de glauconita en ciertas ocasiones, también se pueden encontrar lutitas arenosas en las zonas más potentes (Jaillard et al., 1997).
- **Formación Orteguaza:** La Formación Orteguaza principalmente por estratos erosionados y meteorizados del volcanismo de la Cordillera real, lo que muestra un enriquecimiento de sedimentos arcillosos (White et al., 1995). La Formación Orteguaza consiste en un depósito de tipo fluvial fino similar a la Formación Chalcana (Christophoul et al., 2002).
- **Formación Chalcana:** “La Formación Chalcana sobreyace a la Formación Orteguaza y está compuesta de una progradación de depósitos aluviales de tamaño fino” (Christophoul et al., 2002). Esta formación tiene su depocentro en medio de la Cuenca Oriente, y su deposición fue dada durante el oligoceno tardío al mioceno temprano, formada por lutitas rojas intercaladas por capas finas de areniscas con estratificación cruzada y laminación horizontal (Roddaz et al., 2011).
- **Formación Arajuno:** “La Formación Arajuno ha sido dividida en dos unidades informales, una inferior con areniscas conglomeráticas con intercalaciones de arcillas bentónicas y una unidad superior roja de arcillas yesosas” (Baldock, 1982; Ruiz, 2002; Tschopp, 1953). La Formación Arajuno pertenece al Mioceno temprano con edades de aproximadamente 22 Ma resultado de dataciones realizadas con trazas de fisión en zircones (Ruiz et al., 2004).
- **Formación Chambira:** A partir de las relaciones estratigráficas de deposición de la Formación Chambira con la Formación Arajuno y los marcadores bioestratigráficos presentes se dice que esta formación corresponde al Mioceno medio a tardío (Roddaz et al., 2011). Consta de conglomerados de varios metros, guijarros de esquistos negros y arcillolitas rojas hacia el tope (Ruiz, 2002).
- **Formación Mesa-Mera:** Es la formación más joven y la que se encuentra al tope de la estratigrafía de la Cuenca Oriente. Está compuesta por depósitos de tipo clástico con un tamaño de grano medio a grueso, su fuente es la Cordillera Real

erosionada (Baldock, 1982; Ruiz, 2002). Por lo que su edad de deposición es cuaternaria (Tschopp, 1953).

- **Dominios Tectónicos de la Cuenca Oriente**

Los dominios tectónicos de la Cuenca Oriente están dados por la misma evolución geológica del Ecuador y de Sudamérica, lo que ha causado que sea una zona muy activa tectónicamente ocasionando la creación de plays petroleros en Ecuador. Durante el Jurásico la Cuenca Oriente fueron parte de una cuenca de rift (Diaz et al., 2004; Vallejo et al., 2021), que provocó una extensión dentro de la misma. Hacia finales del Cretácico la Cuenca Oriente fue deformada por fallas de compresión NNE-SSW que corresponde a la inversión del sistema de rift del mesozoico” (Baby et al., 1999). Como resultado tenemos los siguientes dominios tectónicos:

- **Zona Subandina:** También conocida como SAZ, está limitada al oeste por rocas polideformadas de la Cordillera Real y al este está limitado por la Cuenca Oriente (Ruiz, 2002). El SAZ comprende 3 divisiones, levantamiento Napo, depresión de Pastaza y Cordillera de Cutucú, de Norte a Sur respectivamente.
El levantamiento Napo corresponde a un complejo tipo antiformal relacionado con un mega sistema de empuje y acortamiento (Baby et al., 2013). Donde afloran esencialmente formaciones neógenas y cuaternarias de la Cuenca Oriente, existe un cambio en la geometría de las fallas que se vuelven más cabalgantes al contacto Zona Subandina con la Cordillera Real (Mariño, 2015).
- **Corredor Sacha-Shushufindi:** Conocido como (SSC), se encuentra en la parte más profunda del foredeep de la Cuenca Oriente, es decir en su depocentro. Al norte se extiende por el mencionado foredeep, mientras que al sur se extiende en dirección de la zona Subandina, gracias a la información sísmica se conoce que el corredor se abrió formando durante el Turoniano y el Maastrichtiano (Baby et al., 1999, 2013). La tendencia estructural de los esfuerzos durante el triásico tardío al jurásico temprano explican la tendencia oblicua del corredor con respecto a los andes (Baby et al., 2013).
- **Corredor Capiron-Tiputini:** Según Baby et al. (2004) Cuenta con fallas normales listricas conectadas sobre un nivel de despegue horizontal ubicado en el basamento (pág. 23). La diferencia estructural entre el SSC y el corredor Capiron-Tiputini también conocido como (CTIS) es dada por los patrones estructurales heredados,

el SSC responde a la inversión del triasico tardío al jurásico temprano, mientras que el CTIS responde a la inversión del jurásico medio a tardío probocada en el tras arco de la Cuenca Oriente, este play petrolero constituye el segundo campo más grande de petróleo pesado en extensión solo detrás de Pungarayacu (Baby et al., 2013).

1.7 Formación Hollín

1.7.1 Facies

“El término facies usado de forma descriptiva, para un cierto volumen de sedimento, o interpretativamente para el ambiente deposicional inferido de ese sedimento. Los modelos de facies son ayudas intelectuales para la comprensión de los ambientes sedimentarios” (Anderton, 1985). Es por esto que un estudio de facies es sumamente importante a la hora de describir una formación sedimentaria. Para este estudio se utilizaran las facies sedimentarias descritas por el trabajo de Vallejo et al. (2021).

Tabla 1. Clasificación de litofacies y ambientes de depósito para cada uno de los miembros de la Formación Hollín modificado de Vallejo et al. (2021).

AUTORES	Miembro	Ambientes de depósito	Abreviación	Litofacies		
(Vallejo et al., 2021)	Upper Hollín	PLATAFORMA MARINA SOMERA	BS	Lutitas negras.		
			GS	Arenisca glauconítica.		
(Mariño,2015)		ESTUARIO SUBMAREAL	SCS	Arenisca de grano medio a fino con estratificación cruzada, cortinas de lodo y estratificación herring bone.		
			BC	Brecha calcárea		
(Vallejo et al., 2021)		ESTUARIO INTERMAREAL A SUBMAREAL	MLL	Lodolita con laminación lenticular y grietas de sinéresis.		
			FFRCS	Areniscas de grano fino con laminación flaser, raíces, laminación crinkle y ritmitas de marea.		
		ESTUARIO SUPRAMAREAL	FSS	Areniscas de grano fino con estructuras sigmoidales.		
			MCL	Lodolitas oscuras con carbón y hojas de helecho.		
(Vallejo et al., 2021)		Main Hollín	RÍOS ENTRENZADOS	C	Carbón	
(Mariño,2015)				PS	Paleosuelo.	
(Vallejo et al., 2021)	Alluvial Valley Fill			PLANICIE ALUVIAL	AFLL	Areniscas finas laminadas con intercalación de siltstones
					CFM	Conglomerados finos masivos
(Vallejo et al., 2021)	Alluvial Valley Fill	PLANICIE ALUVIAL	AML	Areniscas medias intercaladas con siltstones		
			MCSX	Arenisca media a gruesa con estratificación cruzada		
(Vallejo et al., 2021)	Alluvial Valley Fill	PLANICIE ALUVIAL	RGM	Lodolitas rojas a grises sin estructura & siltstones con laminación. paralela		
			AMCX	Arkosa de grano grueso a medio con estratificación cruzada.		

1.7.2 Tectónica

La Formación Hollín se deposita luego de un importante hiato sedimentario dentro de toda la Cuenca Oriente, este evento estaría adjudicado al rifting del jurásico tardío, mientras en el cretácico temprano se produjo una importante compresión que daría como resultado la morfología heterogénea del terreno durante la deposición de la Formación Hollín (Horton

et al., 2010; Horton, 2018; Vallejo et al., 2021). Dando como resultado la deposición en cuña con dirección este de la formación.

1.7.3 Sedimentología y ambientes deposicionales

Durante la creación de la Cuenca Oriente las subidas y bajadas del nivel del mar (nivel eustático) jugaron un papel fundamental en la naturaleza de deposición de los sedimentos de Hollín. Variaciones eustáticas controlaron la variación progresiva de depósitos a lo que se le conoce como system tract (Posamentier y Vail, 1988). Aquí repasaremos los ambientes sedimentarios y los system tracts que permitieron que exista dicho ambiente en cada miembro de la Formación Hollín.

1.7.4 Miembros

- **Alluvial Valley Fill**

Es el miembro basal de Hollín, depositándose sobre una base erosionada del jurásico (White et al., 1995) que es la Formación Chapiza. La presencia de las litofacies ACMCX y RM, estarían relacionadas a un depósito de canal fluvial y a una planicie de inundación (Vallejo et al., 2021; White et al., 1995). Este ambiente contaría con una alta energía unidireccional para transportar y formar las estructuras de ACMCX, este miembro aparentemente se depositó desde la Cordillera y estaría dentro de un Falling Stage System Tract, por sus sedimentos característicos de un ambiente fluvial.

- **Main Hollín**

Las litofacies observadas en las areniscas de Main Hollín y la unidireccionalidad relativa del paleoflujo indican un sistema consistente de ríos entrenzados (Vallejo et al., 2021). De acuerdo a Mariño (2015) existe una base erosiva y morfologías cóncavas, propias de un canal, que correspondería a los canales entrenzados. Aquí se pueden encontrar facies que van de conglomerados finos a medios hasta areniscas finas masivas, donde la energía sería muy alta para llevar granos más gruesos a comparación del miembro Alluvial Valley Fill. Por lo que Main Hollín estaría depositándose durante un lowstand system tract como lo muestra Mariño (2015).

- **Upper Hollín**

“La transición de Main Hollín a Upper Hollín está marcada por la aparición de una capa de carbón de 30cm de espesor” (Vallejo et al., 2021). Hollín superior estaría dividida en 3 etapas de deposición, siendo estas: Estuario dominado por mareas, inundación de un estuario dominado por mareas y por último muestra la representación de un ambiente de

plataforma, como lo muestra Vallejo et al. (2021) y Shanmugam et al. (2000). En donde los ambientes los sedimentos varían de ambientes submareales a supra mareales, con predominio de ambientes profundos hacia arriba de la sucesión, muestra clara de una transgresión producto de un Transgressive System Tract como aseguran Mariño (2015; Vallejo et al. (2021).

2 METODOLOGÍA

Dentro de esta investigación se decidió seleccionar el método inductivo, siendo este el que mejor se ajusta al desarrollo de la misma, En la Inferencia Inductiva se parte de juicios particulares para dar un salto y concluir con un Juicio Universal (Cabrera, 1987), por lo que este análisis nos permitirá realizar interpretaciones geológicas de deposición.

El enfoque de la investigación ha sido cuantitativo, este produce un conocimiento a partir de la producción u obtención de datos numéricos (Ochoa et al., 2020), donde los valores numéricos obtenidos (concentración de elementos químicos en las muestras recolectadas en la Formación Hollín) son el resultado del ensayo de XRF.

El trabajo fue definido como experimental, por ser una investigación en la cual el investigador manipula y controla una o más variables independientes y observa la o las variables dependientes para medir las variaciones concomitantes (Agudelo Viana y Aigner Aburto, 2008), donde la variable independiente estará dada por la distribución espacial de la deposición (varía de base a tope) y la variable dependiente sería la concentración de los elementos químicos (elementos señalados en los objetivos específicos medidos en porcentaje en peso).

El estudio fue dividido en tres etapas: Revisión bibliográfica, recolección de datos y análisis de la información.

2.1 Revisión bibliográfica

Leer y entender la bibliografía de la Formación Hollín fue fundamental, la geología de la Formación Hollín en el dominio tectónico del Subandino ecuatoriano no cuenta con muchos estudios a comparación de los realizados en el foredeep de la Cuenca Oriente, donde la Formación Hollín ha representado un reservorio importante de petróleo. Los principales aportes bibliográficos fueron hechos a partir de los estudios de Vallejo et al. (2021) y Mariño (2015) que formaron una guía importante de la Formación Hollín, ambos estudios realizados en la misma sección estratigráfica estudiada en este trabajo. Se tomó como referencia la estratigrafía e interpretaciones sedimentológicas propuestas por Vallejo et al. (2021).

2.2 Recolección de datos

La técnica de recolección elegida fue la observación, por lo que las rocas utilizadas en este estudio fueron muestreadas directamente en el afloramiento, con ayuda de una máquina perforadora con un motor a dos tiempos que permitió la obtención de las mismas (núcleos de perforación con un diámetro de 1”) esta máquina perforadora fue proporcionada por GEOSTRAT S.A, dichas muestras fueron tomadas a 1 metro de distancia entre sí (aproximadamente), el muestreo cubre la totalidad de litofacies descritas dentro del intervalo mencionado en la sección 1.3 correspondiente al trabajo de Vallejo et al. (2021).



Figura 2. Máquina perforadora proporcionada por GEOSTRAT S.A.



Figura 3. Leyenda modificada de la columna estratigráfica de Vallejo et al. (2021).

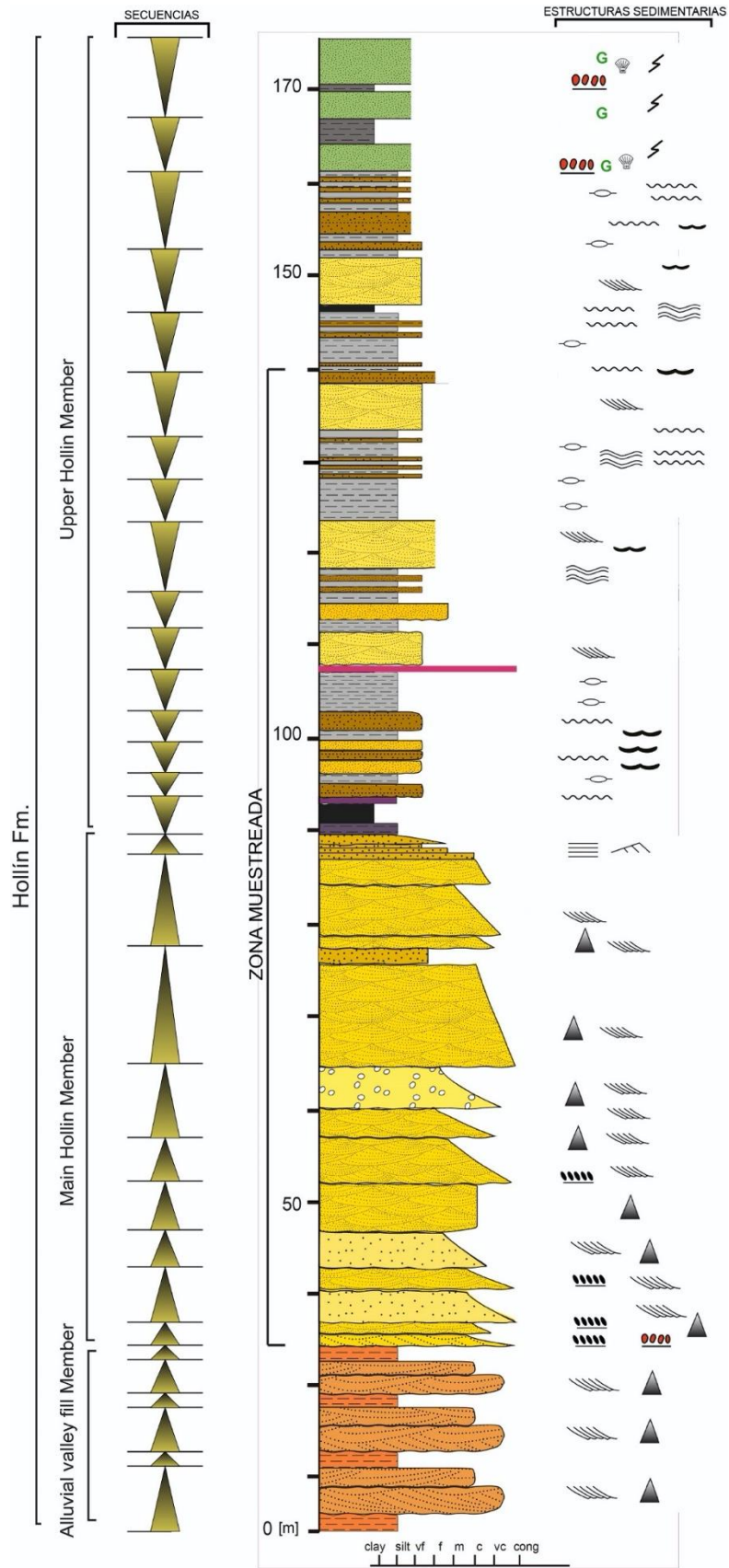


Figura 4. Columna estratigráfica modificada de Vallejo et al. (2021).

Una vez que se obtuvieron todas las muestras estas fueron secadas en un horno especializado para rocas perteneciente a la EPN, luego fueron pulverizadas una a una controlando la contaminación entre muestra y muestra. Para esto fue extremadamente necesario llevar una asepsia optima en la máquina pulverizadora, también se realizó la pulverización de ciertas muestras por medio de un pistilo y mortero metálicos, esto por defectos mecánicos presentados en la pulverizadora de la EPN, de igual manera fue extremadamente importante cuidar la limpieza de estos instrumentos para evitar contaminación de las muestras.



Figura 5. Máquina pulverizadora de rocas.



Figura 6. Mortero de acero inoxidable.

Una vez pulverizada la muestra, es almacenada en una funda plástica tipo Ziploc etiquetada con el nombre de la formación, su numeración correspondiente y su litofacie correspondiente, lo que es de gran ayuda para ubicar la muestra dentro de la columna estratigráfica, posterior a esto se deposita el polvo de la muestra en una capsula especial diseñada para el análisis de XRF. Esta capsula es armada manualmente cubriendo una entrada con un plástico especial de propileno para este ensayo geoquímico. Una vez esta rellena la capsula es cubierta por la abertura que queda libre con algodón, para compactar el polvo correspondiente a la muestra, una vez compacto el material, se coloca una tapa por la entrada que quedaba libre, para que la capsula esté lista para ser sometida al ensayo.



Figura 7. Capsula rellena de la roca pulverizada, lista para el análisis de XRF.

El ensayo geoquímico fue realizado con el equipo VANTA VMR Geochemistry LOD serie M de OLYMPUS perteneciente a GEOSTRAT S.A, este equipo cuenta con una fuente de excitación conformada de rayos X de 4 vatios con un ánodo optimizado (*Analizador XRF portátil Vanta: Serie Vanta | Olympus, s. f.*), para utilizarlo y poder tabular los resultados, es necesario conectar el equipo a una computadora. Antes de procesar la muestra es necesario calibrar el equipo con ayuda de dos capsulas propias del fabricante, que al ser colocadas al análisis calibran la lectura del equipo.

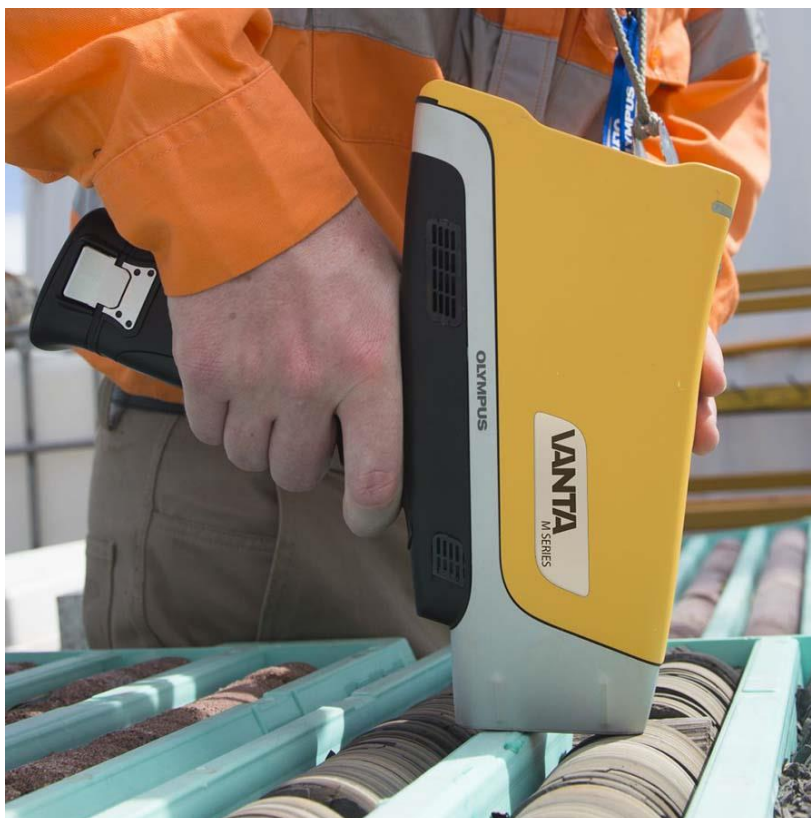


Figura 8. Equipo VANTA VMR Geochemistry LOD serie M de OLYMPUS perteneciente a GEOSTRAT S.A.

Esta tecnología de fluorescencia de rayos X (XRF) es la más usada en el análisis de elementos traza y mayores, por su gran calidad de datos y su rapidez de obtención de los mismos, pues en aproximadamente un minuto se puede obtener resultados confiables.

Una vez el equipo esté listo, la capsula previamente preparada es colocada con la cara cubierta por el plástico de propileno contra el sensor del equipo, una vez colocada la capsula es extremadamente necesario tapar la muestra y el sensor con la tapa del fabricante, pues es el análisis emite una radiación muy alta que puede ser perjudicial para la salud. Terminado el análisis los datos son exportados a una un libro Excel para un mejor análisis de datos. Este proceso fue repetido para cada una de las muestras, al igual que

en el proceso de pulverización es necesario evitar al máximo la contaminación en las capsulas, pues son reutilizables y la mínima contaminación puede alterar los resultados de manera abrupta.

2.3 Análisis de la información

La información fue analizada por medio de la geoquímica, que es la ciencia unión de la geología y la química como una disciplina dentro de la geología misma. La geoquímica ayuda a resolver problemas de carácter geológico como pueden ser dataciones de rocas, el crecimiento de las cadenas montañosas, la velocidad con la que son erosionadas, etc. (White, 2005). Su aplicación dentro de este estudio está limitada a las rocas sedimentarias, estas están compuestas por fragmentos de otros tipos de rocas, por lo que la composición de los sedimentos y la roca como tal es muy diversa. Los sedimentos pueden ser terrígenos, biogénicos o metalíferos (Marshall y Fairbridge, 1999). La naturaleza de las rocas sedimentarias está dada por diferentes factores, fundamentalmente cuatro que pueden contribuir a su química y su formación: Sitio de proveniencia del sedimento, medio de transporte, sitio de deposición y condiciones de enterramiento durante el proceso de diagénesis (Mackenzie, 2005).

Dentro de la geoquímica existen varias ramas, la utilizada en este estudio fue la Quimioestratigrafía con herramientas como espectros de concentración química y diferentes diagramas discriminatorios que nos ayudaron a definir estratos meteorizados, mineralogía asociada, proveniencia y ambiente tectónico para las rocas sedimentarias de la Formación Hollín.

Los diagramas discriminatorios (pertenecientes a la litogeoquímica) y la aplicación de elementos mayores realizados fueron: El diagrama de Herron (1988) para clasificación de areniscas y lutitas terrígenas, diagramas binarios tipo Harker, diagrama bivariante de clasificación de lodolitas de Spalletti et al. (2014) y el diagrama ternario de diferenciación de sedimentos marinos de Ratcliffe et al. (2007). Mientras que para los diagramas discriminatorios y su aplicación de elementos traza se realizó: Diagrama de identificación de composiciones para areniscas de Floyd y Leveridge (1987), diagrama de identificación de composición mineral según la proporción K vs Th de Quirein et al. (1982), diagrama de discriminación de fuentes de rocas volcánicas de Winchester y Floyd (1977), diagramas de discriminación de ambientes paleoredox de Rimmer (2004), diagrama bivariante de Th vs Th/U para analizar tendencias de meteorización de McLennan et al. (1993).

La quimioestratigrafía usa la firma geoquímica de los sedimentos y rocas sedimentarias para así realizar interpretaciones de deposición de las formaciones geológicas (Weissert

et al. 2008) por lo que este tipo de análisis es más complejo en la (Tabla 2) se muestra un resumen de la mineralogía relacionada en rocas sedimentarias, esto fue útil para identificar las asociaciones minerales en el análisis de espectros químicos.

Tabla 2. Tabla resumen relación elemento químico-mineral para rocas sedimentarias.

ELEMENTO	MINERALES RELACIONADOS
Si	Cuarzo
Al	Minerales arcillosos principalmente Caolinita y feldespatos.
Fe	Minerales arcillosos y pirita.
K	Feldespatos, micas y minerales arcillosos principalmente Illita.
U	Materia orgánica y minerales pesados.
Th	Minerales pesados y materia orgánica.
Sr	Carbonatos, feldespatos y minerales arcillosos.
Rb	Feldespatos, micas y minerales arcillosos principalmente Illita.
Ti	Rutilo, Anataxa, esfena y minerales opacos.
Ba	Barita.

Los valores obtenidos para los elementos mayores, elementos traza y sus respectivas proporciones (ratios) fueron ploteados a manera de perfiles verticales de concentración (espectros quimioestratigráficos) junto con el registro sedimentario extraído de la columna estratigráfica de Vallejo et al. (2021), con la finalidad de mostrar las aplicaciones ya mencionadas previamente. Dentro de estos espectros de concentración se construyó un registro de Gamma Ray sintético y un registro BI-Shale (Brittleness Index shale). El registro Gamma Ray sintético consiste en la ejecución de la (ecuación 1) transformando las unidades de U y Th a PPM's, las unidades de K son tratadas en porcentaje en peso (wt%) (Ellis, 2007). Por otro lado, el registro BI-Shale muestra la fragilidad de la roca la cual se puede calcular de diversas formas, "el índice de fragilidad puede ser usado para reconstruir diferentes parámetros elásticos sensibles con la fragilidad" (Qian et al., 2020). Este registro fue obtenido por medio de la metodología mineralógica (ecuación 2) dicha ecuación se adapta perfectamente a este estudio por su alto contenido Si (Cuarzo) a lo largo de toda la columna estratigráfica y por la falta de datos geomecánicos como el módulo de Young y la proporción de Poisson.

$$Synthetic\ GR = (16 * K) + (8 * U) + (4 * Th) \quad (equación\ 1)$$

$$BI\ Shale = \frac{Cuarzo}{Total} * 100 \quad (equación\ 2)$$

Dentro del estudio de proveniencia existen elementos indicadores (Tabla 3), una relación importante es el ratio (Rutilo, Anatasa, Brookita y Titanita)/Zircón o Ti/Zr para identificar cambios en la distribución de minerales pesados (Craigie, 2018). Estos minerales pertenecen al índice ultraestable (ZTR) comunes en fuentes cratónicas (Garzanti y Andò, 2007). Sin embargo, el aporte de zircones no está limitado al cratón, sino que también existe aporte de la fuente continental (fuente andina), por lo que este ratio es determinante para el análisis de proveniencia dentro de la Cuenca Oriente. Por otro lado, los ratios U/Th y Ni/Co son utilizados para reconocer estratos anóxicos, es decir, ambientes paleoredox.

Tabla 3. Tabla resumen relación elemento químico-fuente relacionada para rocas sedimentarias modificado de Turner et al. (2015).

Elemento	Fuente relacionada	Referencia
Ti	Fuente cratónica.	Sageman y Lyons (2004) y Franco et al. (2021)
Zr	Fuente continental y cratónica.	Bhatia y Crook (1986)
Ca	Fuente carbonatada y fosfatada.	Banner (1995) y Tribovillard et al. (2006)
Sr	Fuente carbonatada y fosfatada.	Banner (1995) y Tribovillard et al. (2006)
P	Acumulación de fosfato y anóxica.	Tribovillard et al. (2006)
Mo	Anóxica, sistema redox.	Tribovillard et al. (2006) y Algeo y Rowe (2012)
V	Anóxica, sistema redox.	Tribovillard et al. (2006)

El índice de meteorización envuelve la conversión de vidrio volcánico y minerales inestables como como el feldespato y mica que pasan a arcillas (McLennan et al., 1993). Se utilizó los ratios de Rb/Sr y Ba/Sr, esto parte del principio de movilidad de los elementos, el Sr es un elemento con alta movilidad durante la meteorización, mientras que el Rb y el Ba tienen una movilidad baja durante la meteorización (Craigie, 2018).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis litogeoquímico de elementos mayores

En esta sección dedicada al análisis de 9 elementos mayores, los cuales son elementos tradicionalmente estudiados por ser los más abundantes en las rocas en general (Si, Al, Fe, Mg, Mn, Ca, K, Ti y P) Para el caso de Fe se trabajó con Fe total y Fe₂O₃. Los geocientíficos suelen ocupar los datos geoquímicos de elementos mayores para hacer estudios de clasificación litológica de las rocas, ambientes paleoredox, construcción de diagramas de variación (diagramas bivariantes) de óxidos del elementos mayores y determinación experimental de composición de rocas en condiciones de formación (Rollinson y Pease, 2021a).

3.1.1 Clasificación litológica

La clasificación de una roca sedimentaria clástica desde el punto de vista geoquímico es usada por medio del principio de madurez, donde las rocas con mayor madurez tendrán mayor cantidad de cuarzo en su composición y mayor transporte, con este principio en mente Herron (1988) realiza su diagrama de clasificación donde toma en consideración minerales arcillosos, ferromagnesianos y feldespatos potásicos para así conocer las variaciones entre los diferentes tipos de rocas sedimentarias clásticas, donde SiO₂/Al₂O₃ representa una comparación entre cuarzo y minerales arcillosos, mientras Fe₂O₃/K₂O representa una comparación de minerales ferromagnesianos y feldespatos potásicos.

Miembro Hollín inferior (Main Hollín): Los resultados muestran una dispersión considerable de datos en el diagrama de Herron, donde predominan las muestras que se concentran en la clasificación de cuarzoarenitas y wacke. Las demás muestras se encuentran presentes en los campos de subarkosa, arkosa, lutita, litoarenita, sublitoarenita y arenisca enriquecida en hierro, lo que reflejaría que estas muestras presentan minerales enriquecidos en Fe y Al, lo que puede estar asociado directamente con la presencia de arcillas como la illita.

Miembro Hollín Superior (Upper Hollín): Muestra una dispersión menor de datos a comparación del miembro inferior con una alta concentración en el campo de lutitas, lutitas enriquecidas en hierro, wacke, arkosa y con una muy baja concentración de datos en los campos de cuarzoarenita, litoarenita y sublitoarenita. Donde estos datos estarían bien justificados por la variación en litofacies y ambientes deposicionales reportados por Vallejo et al. (2021).

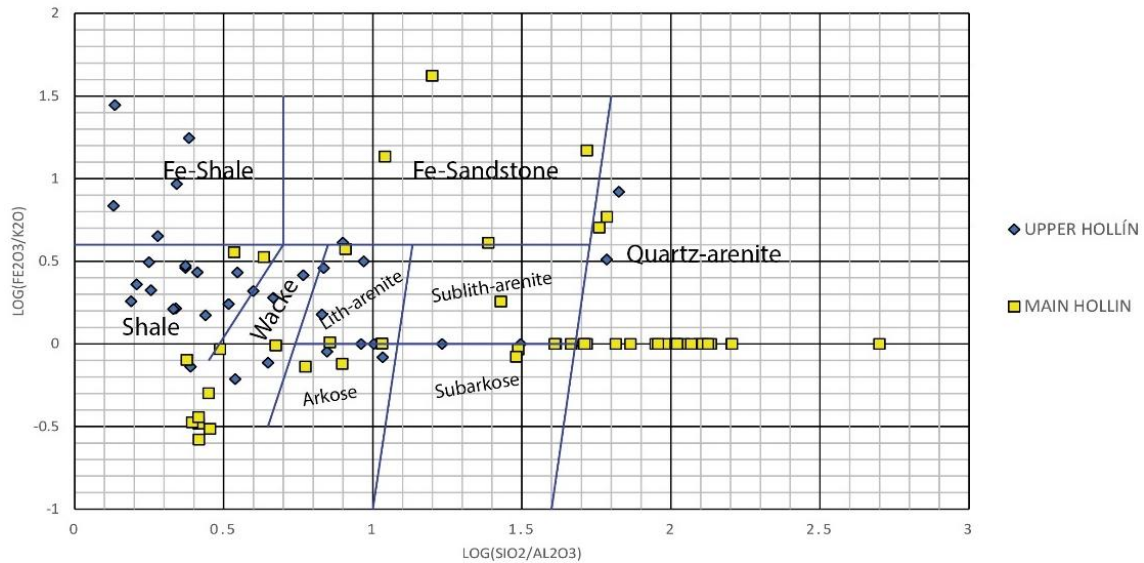


Figura 9. Diagrama de clasificación de areniscas y lutitas terrígenas de Herron (1988).

3.1.2 Diagramas bivariantes

Los diagramas bivariantes son una comparación entre dos elementos mayores, donde tradicionalmente se ocupa el SiO₂ en el eje de las abscisas para conocer la variación de este con los demás elementos mayores, este tipo de diagramas bivariantes es llamado diagramas Harker. Este tipo de diagramas son muy útiles y muestran una tendencia que puede ser determinante en el entendimiento de las rocas y su madurez composicional, para las rocas sedimentarias se puede decir que estas tendencias pueden reflejar un resultado de mezcla de sedimentos químicamente distintos (Rollinson y Pease, 2021a).

Miembro Hollín inferior (Main Hollín): Las concentraciones de SiO₂ para el miembro inferior de la Formación Hollín son muy elevadas a comparación de las con las demás concentraciones de elementos mayores con sus respectivos óxidos lo que hace consistente los datos arrojados en el diagrama de Herron (1988) y los resultados petrográficos de Mariño (2015), por lo que estas areniscas presentan una alta madurez. Sin embargo, existe una variación considerable para el diagrama bivalente SiO₂ vs Al₂O₃, donde reflejaría la presencia de una mezcla de componentes en los sedimentos con un importante aporte de Al₂O₃ (Posible presencia de acillas). Luego tenemos FeO(t), Fe₂O₃ y CaO cuentan con un par de muestras que reflejan una concentración considerable a comparación del resto de óxidos que son muy escasos en concentración.

Se realizó el diagrama bivalente reportado por Spalletti et al. (2014). Donde se observa una clasificación de lodolitas, donde existen dos muestras del miembro inferior que presentan concentraciones considerables, dándonos una marga lodolítica y una lodolita

margosa, las cuales estarían relacionadas a una zona de inundación del sistema de río entrenzado que formó el miembro inferior de Hollín.

Miembro Hollín Superior (Upper Hollín): Las concentraciones de SiO₂ para el miembro superior de Hollín difieren mucho del miembro inferior, estas concentraciones son mucho más bajas y dispersas, por lo que en la mayoría de diagramas Harker no se puede encontrar una tendencia clara, esto estaría relacionado a la mezcla de diferentes tipos de sedimentos, lo cual es bastante concordante por la variación litológica que presenta Hollín superior en el registro sedimentario de Vallejo et al. (2021).

Mientras que, para el diagrama de Spalletti et al. (2014) se observa que todas las muestras están dentro del campo de lodolita a excepción de una muestra la cual es muy rica en CaO esta estaría relacionada a una capa carbonatada perteneciente a un depósito de bayfill descrita por Mariño (2015).

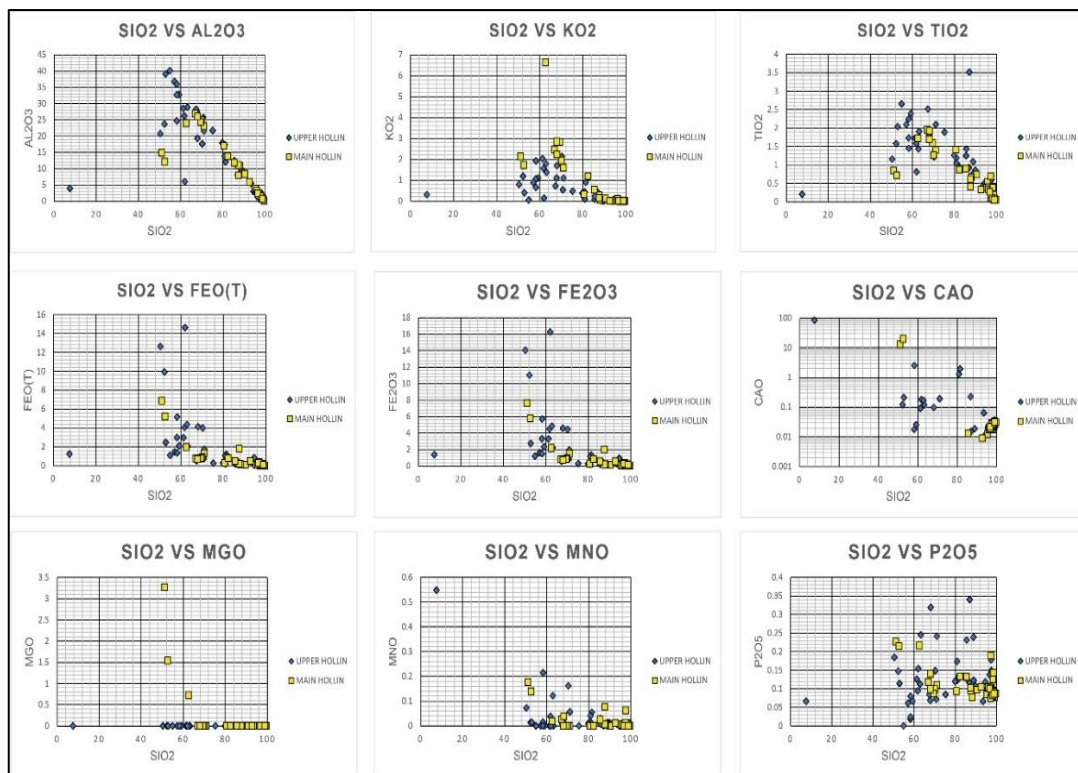


Figura 10. Diagramas bivariantes tipo Harker para todos los óxidos de elementos mayores.

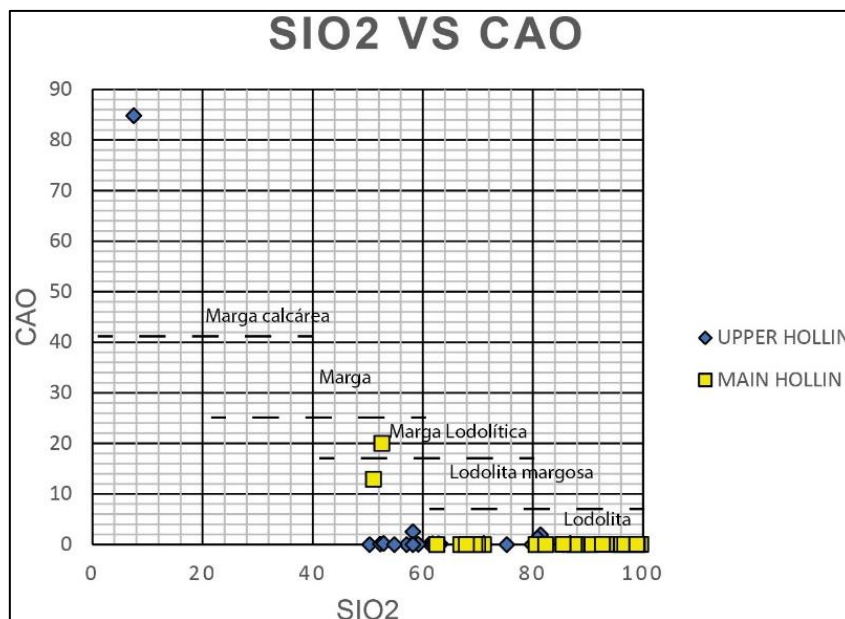


Figura 11. Diagrama bivariante de clasificación de lodolitas reportado por Spalletti et al. (2014).

En el diagrama bivariante reportado por Spalletti et al. (2014). Se observa que la gran mayoría de rocas cae dentro de lodolitas y solo existe una muestra que contiene una elevada cantidad de calcio,

3.1.3 Diferenciación de sedimentos marinos y no marinos

Según Ratcliffe et al. (2007) se diferencian los sedimentos marinos y no marinos por contenidos más altos de Fe_2O_3 y MgO , que pueden estar relacionados con un mayor contenido de glauconita en las unidades marinas, al igual que la relación SiO_2/Al_2O_3 que puede generar una relación entre el contenido de cuarzo y de arcillas presentes, por lo que el diagrama ternario reportado por el mismo Ratcliffe et al. (2007) es un buen indicador para conocer el origen de los sedimentos.

Para este caso los resultados del **Miembro Hollín inferior (Main Hollín)** y el **Miembro Hollín Superior (Upper Hollín)** fueron muy parecidos, pues los valores de MgO son muy bajos en todas las muestras analizadas, por lo que la naturaleza de toda la columna estratigráfica según los datos geoquímicos es no marina, que se puede interpretar como depósitos continentales a costeros.

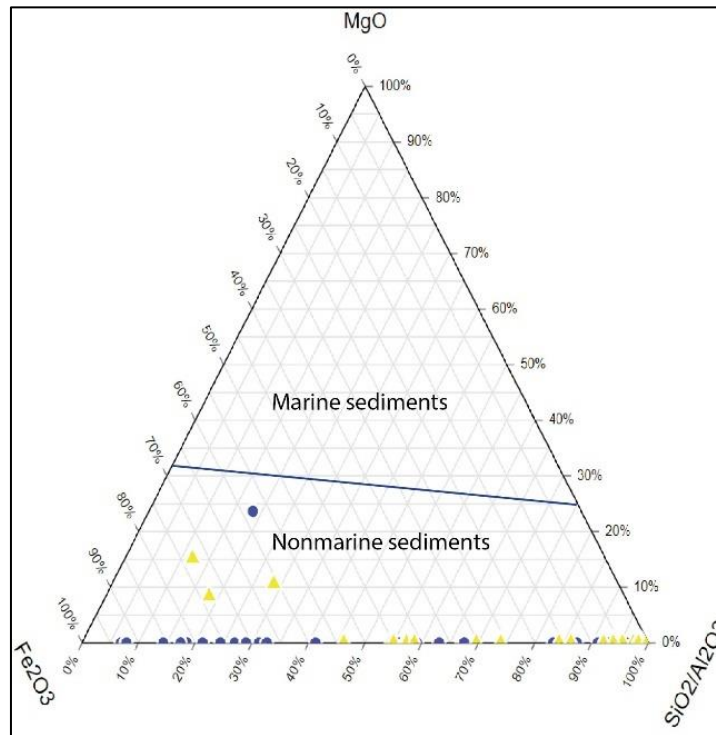


Figura 12. Diagrama ternario de diferenciación de sedimentos marinos de Ratcliffe et al. (2007).

3.2 Análisis litogeoquímico de elementos traza

Los elementos traza están definidos como elementos de muy baja concentración los cuales suelen tener una concentración menor al 0.1% en peso o a su vez tienen menos de 1000 (ppm's). “Los elementos traza son más sensibles a procesos geoquímicos a comparación de los elementos mayores y por lo tanto son mejores discriminantes entre procesos petrológicos” (Rollinson y Pease, 2021b).

3.2.1 Composición de sedimentos

Según Floyd y Leveridge (1987) la característica de reconocer productos erosionados de series magmáticas es por medio de un diagrama bivalente de Rb vs K, donde las rocas con un mayor valor de estos dos componentes mostrarían una composición intermedia a ácida y los valores menores reflejarían una composición básica. Esta relación incluso es útil con rocas que han sido sometidas a un metamorfismo bajo a medio. Para el miembro inferior y superior de Hollín los resultados pueden ser confiables por su bajo aporte metamórfico como lo reporta en su estudio de proveniencia Vallejo et al. (2021).

De acuerdo a Quirein et al. (1982) la proporción Th/K es una composición mineral clave de lutitas, donde esta proporción reduce su valor cuando aumenta la Illita y demás minerales que son mostrados en el diagrama del mismo autor.

Miembro Hollín inferior (Main Hollín): Los valores se encuentran distribuidos de una manera muy pareja, pero con una leve predominancia correspondiente a una fuente intermedia a ácida, lo cual es concordante con los datos presentados por el estudio de proveniencia de Vallejo et al. (2021). Donde los minerales pesados de composición ácida a intermedia tienen una abundancia similar a los minerales pesados de composición básica.

Para el diagrama de Quirein et al. (1982) se observa que la gran concentración de valores del miembro inferior están en el punto de origen en el campo de minerales pesados de Th como zircón y en el campo de Caolinita los cuales son minerales comunes en el miembro inferior según Mariño (2015), aunque también existen puntos en los campos de la Montmorillonita, Illita, micas y glauconita, siendo este último mineral característico de ambientes de plataforma marina, es por esto que no deberían estar presente por el ambiente de deposición de estas rocas sedimentarias.

Los resultados reflejados en el diagrama de Winchester y Floyd (1977) muestran una alta concentración de datos en los campos de Riolita y Rio-Dacita las cuales son dos tipos de rocas muy ácidas, dentro del estudio de proveniencia de este estudio y el de Vallejo et al. (2021) se muestra un aporte significativo del cratón específicamente de las provincias tectónicas de Venturi-Tapajos y de Río Negro-Jurena (Cordani et al., 2009; Vallejo et al., 2021), lo que es concordante con la descripción de Tapajos de Hartmann y Delgado (2001) donde se habla de la presencia de rocas volcánicas intermedias que van hasta rocas graníticas ácidas.

Miembro Hollín Superior (Upper Hollín): La distribución de datos para el miembro superior de Hollín tiene una predominancia a una composición ácida a intermedia, incluso mucho más marcada que para el caso del miembro inferior, pues apenas existen cinco muestras que cuentan con dicha composición básica. De igual manera los resultados concuerdan con el estudio de proveniencia de minerales pesados de Vallejo et al. (2021). Donde existe una clara predominancia de minerales pesados asociados a la composición ácida para el miembro Hollín superior.

Los resultados en el diagrama de Quirein et al. (1982) muestran una dispersión importante de sus datos pasando por todos los campos del diagrama, lo que se refleja en la variedad de minerales arcillosos, producto de las litologías variables y diferentes ambientes de deposición relacionados a un ambiente estuarino del miembro superior de la Formación Hollín, al igual que en el miembro inferior la presencia de glauconita no sería correcta para el intervalo muestreado dentro de este estudio.

Para el diagrama de Winchester y Floyd (1977) se observa también una clara concentración de los resultados en los mismos campos que el miembro inferior, sin embargo, existe una mayor concentración en el campo de Rio-Dacita, este aporte cratónico en el miembro superior es mucho mayor a comparación del miembro inferior y tendría aporte de provincias tectónicas como Río Negro-Jurena y Rondonia San Ignacio (Vallejo et al., 2021) donde estas provincias tectónicas estarían relacionadas con sedimentos e inclusiones graníticas (Cordani et al., 2009).

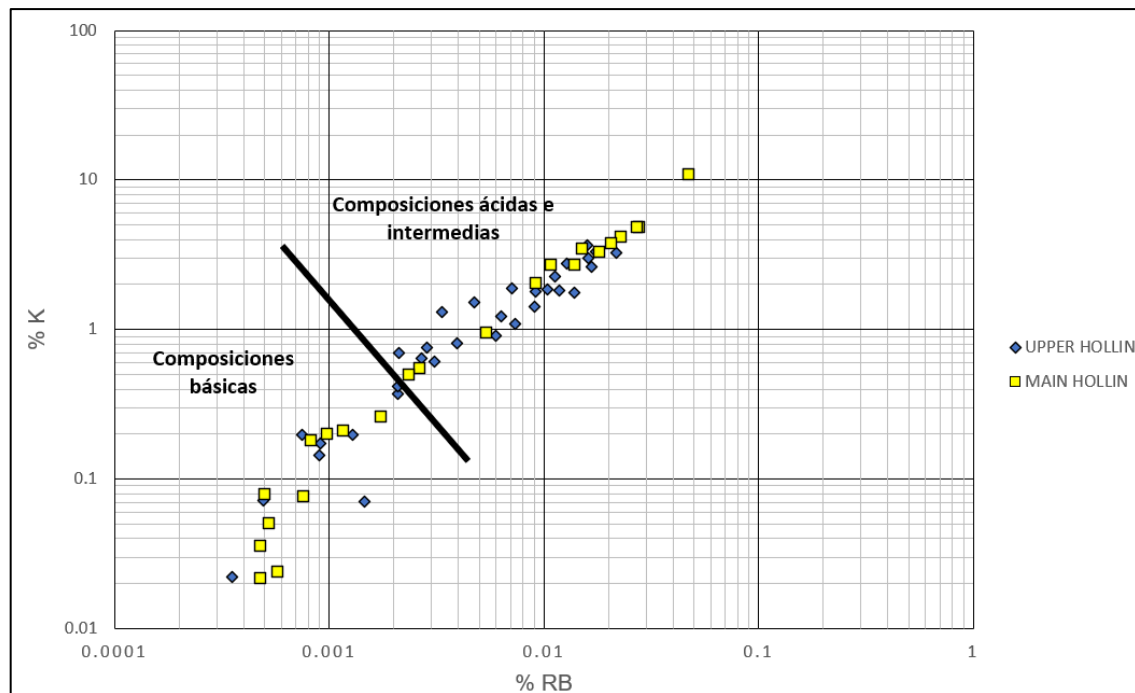


Figura 13. Diagrama de identificación de composiciones para areniscas de Floyd y Leveridge (1987).

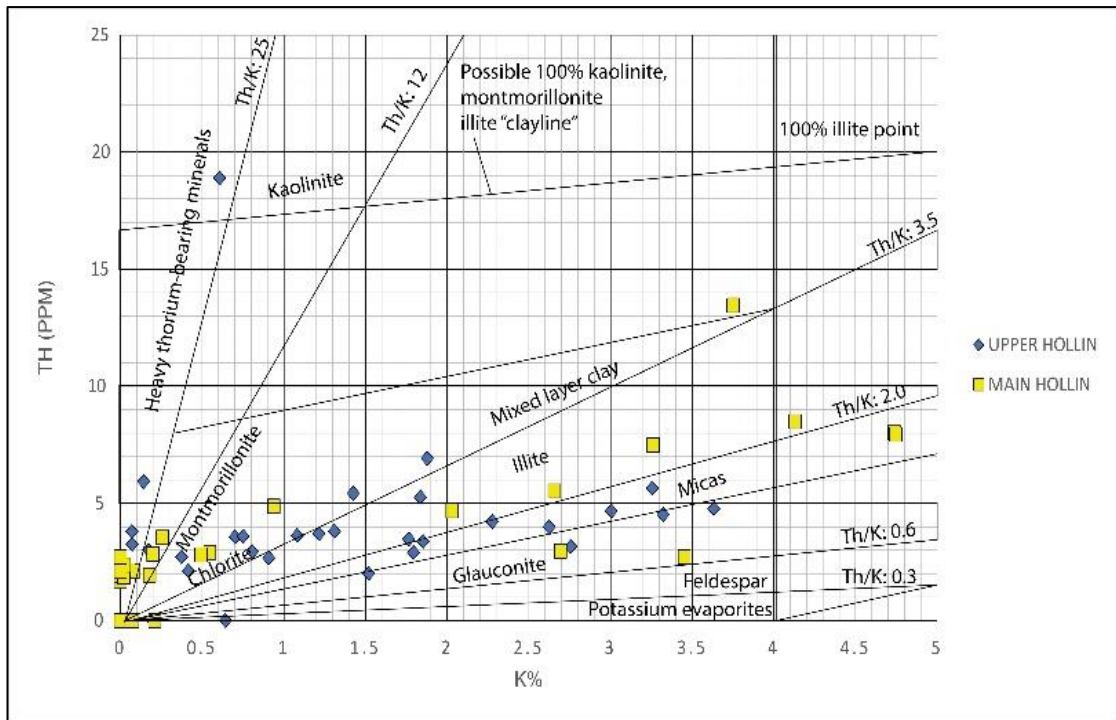


Figura 14. Diagrama de identificación de composición mineral según la proporción K vs Th de Quirein et al. (1982).

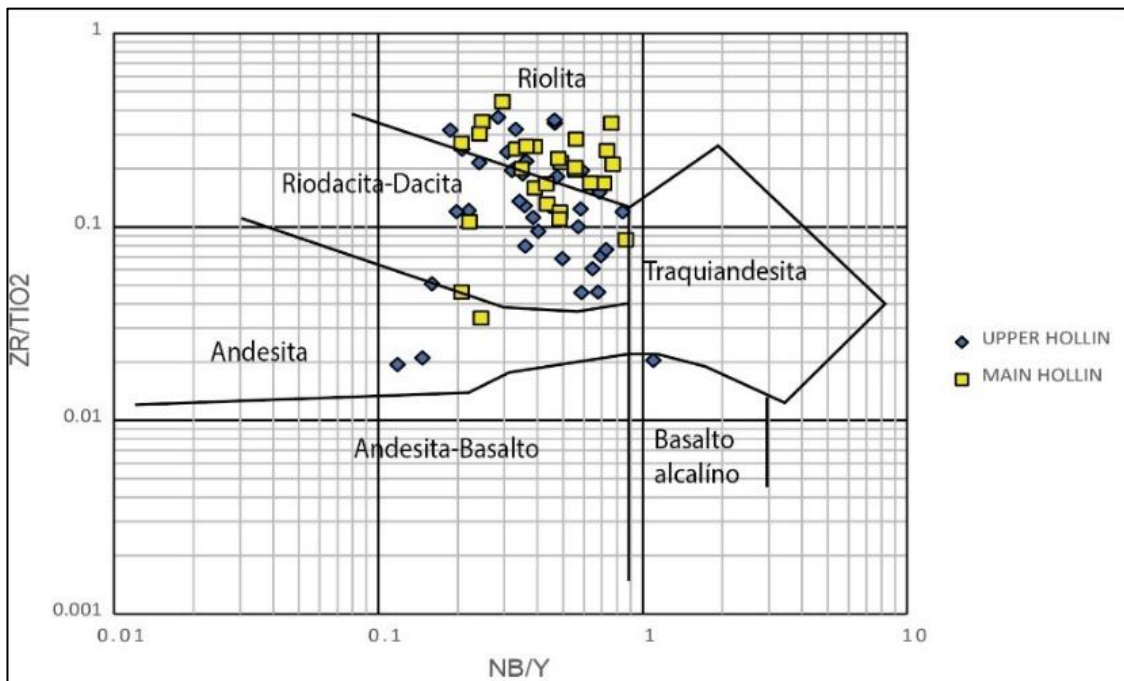


Figura 15. Diagrama de discriminación química de rocas volcánicas fuente de Winchester y Floyd (1977).

3.2.2 Ambientes paleoredox

Las variaciones del nivel eustático dentro de la deposición de sedimentos puede generar una influencia en la abundancia de elementos traza que sirvan como marcadores para ambientes reductores, este es el caso del Mo, U, Ni, Co, V y Cr, es decir dichos elementos aumentarán su concentración en la presencia de ambientes anóxicos o pobres en oxígeno.

Para este apartado los resultados del **Miembro Hollín inferior (Main Hollín) y el Miembro Hollín Superior (Upper Hollín)** fueron bastante similares en la gráfica A) y B) con la única particularidad que en la gráfica A) existe unos pocos datos de ambos miembros que se encuentran dentro del campo pobre en oxígeno (dysoxic), mientras la gran cantidad de sedimentos analizados se encuentran dentro del campo óxico se ajustan perfectamente con el miembro inferior a excepción de los estratos añadidos en este estudio, por su ambiente sedimentario de río entrelazado reportado por Vallejo et al. (2021). Sin embargo, esto no mostraría con claridad los ambientes paleoredox para toda la formación, principalmente en los estrato del miembro superior el cual contiene ambientes sedimentarios de tipo estuarinos intermareales a estuarinos submareales según Vallejo et al. (2021) los cuales deberían estar más cerca de un ambiente pobre en oxígeno. Por otro lado, la gráfica B) en el eje de las ordenadas cuenta con una variación importante de Mo para el miembro superior la cual debería ser diagnóstica, esto por qué el Mo puede ser considerado el mejor elemento diagnóstico para deposición de sedimentos en condiciones reductoras (Dean et al., 1997).

Los resultados aplicando los diagramas de Rimmer (2004) quizá no sean lo suficientemente sensibles al tratarse de depósitos de una cuenca poco profunda como es la Cuenca Oriente.

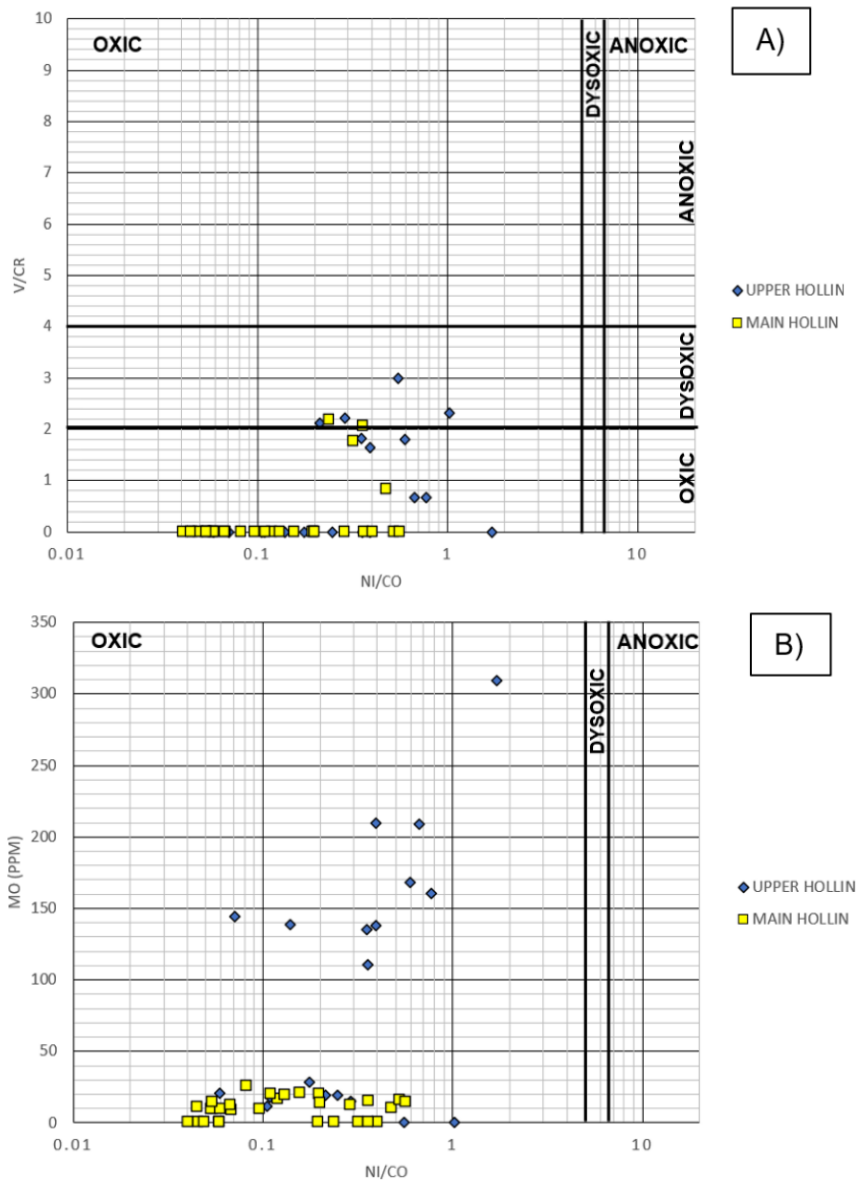


Figura 16. Diagramas de discriminación de ambientes paleoredox de Rimmer (2004) A) Ni/Co vs V/Cr y B) Ni/Co vs Mo.

3.2.3 Índice de meteorización

El índice de meteorización está dado por la porción de minerales alcalinos, los cuales cuentan con una mayor movilidad a comparación de los demás elementos (Parker, 1970). De acuerdo a McLennan et al. (1993) las rocas pertenecientes a la corteza superior típicamente tienen valores entre 3.5 y 4 en su relación Th/U, durante la meteorización esta relación tiende a incrementar su valor, por lo que este límite es un buen indicador para reconocer las rocas que están siendo afectadas por la meteorización.

Miembro Hollín inferior (Main Hollín): Las muestras correspondientes al miembro inferior de la Formación Hollín reflejan una baja tendencia de meteorización, pues la mayoría de

muestras cuenta con un valor superior de U en comparación de Th, lo que permite que las muestras se encuentren bajo el límite de la tendencia del diagrama bivalente de McLennan et al. (1993).

Miembro Hollín Superior (Upper Hollín): Los valores de Th/U correspondientes al miembro superior de Hollín a pesar de no cruzar por encima del límite de tendencia de meteorización en la mayoría de los casos, cuenta con una dispersión de datos mayor a comparación del miembro inferior, lo que podría reflejar que las rocas del miembro superior son más susceptibles a la meteorización.

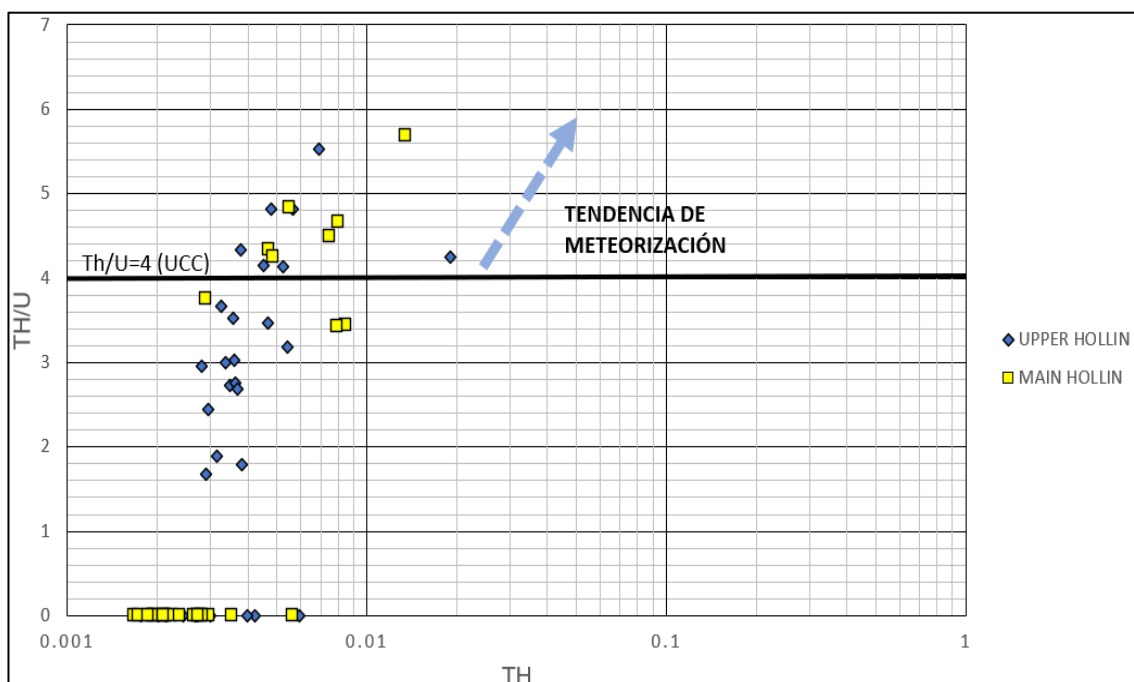


Figura 17. Diagrama bivalente de Th vs Th/U para analizar tendencias de meteorización de McLennan et al. (1993).

3.3 Análisis quimioestratigráfico

La Quimioestratigrafía es una técnica de correlación estratigráfica a partir de la química de las rocas sedimentarias la cual ha sido utilizada principalmente en campañas de desarrollo de campos petroleros (Craigie, 2018). Los alcances de la Quimioestratigrafía son extensos, más allá de contener información por cada elemento químico que soporte el equipo de fluorescencia de rayos X (XRF) se puede ampliar el alcance más allá utilizando ratios entre ellos, lo que puede proporcionar información valiosa de deposición de las rocas sedimentarias.

3.3.1 Registros Gamma Ray y BI shale sintéticos

El registro Gamma Ray es un ensayo común en el desarrollo y exploración petrolera que tiene como finalidad mostrar los estratos radioactivos. Para el uso de este registro sintético es necesario contar con las concentraciones de U, K y Th lo que nos puede mostrar de forma clara las anomalías de arcillas y dolomitas difíciles de detectar en estudios estratigráficos con el registro convencional Gamma Ray (Ellis, 2007).

Por otro lado, el registro BI-Shale (Brittleness Index shale) o índice de fragilidad común en el estudio de reservorios no convencionales (reservorios de lutitas) para la fracturación hidráulica de las mismas rocas, puede ser usado en otros campos, como la perforación, geología, geoquímica y geofísica (Rickman et al., 2008). Este parámetro físico fue obtenido con la cantidad de Si, al disminuir su concentración de Si aumentará la fragilidad y al aumentar la concentración de Si la fragilidad disminuirá para cada estrato.

Miembro Hollín inferior (Main Hollín): El registro Gamma Ray sintético construido para el miembro inferior de Hollín, refleja 4 picos con valores altos de radioactividad, estos se encuentran a 6, 10, 14 y 24 metros desde la base respectivamente, los dos primeros picos reflejan un alto contenido de siltstones (visible en la columna estratigráfica Fig.4) lo que muestra una presencia representativa de finos con materia orgánica, mientras que en los picos restantes también se cuenta con estos sedimentos finos incluida la materia orgánica, pero a menor escala. Por otro lado, el resto refleja valores relativamente bajos, representan al resto de areniscas que conforman al miembro inferior de Hollín, está relacionado con un ambiente de deposición de un río entrecruzado como menciona Vallejo et al. (2021). Por lo que estos valores anómalos podrían estar relacionados directamente a planicies de inundación de este ambiente sedimentario.

El registro BI-Shale por su parte muestra un contraste claro con el registro Gamma Ray sintético, esto se evidencia con los picos negativos del registro localizados en las mismas muestras con picos positivos para el registro Gamma Ray, lo que sugiere que estos sedimentos de planicies de inundación cuentan con una cantidad baja de Si, por lo tanto son mucho más frágiles a comparación del resto del miembro inferior.

Miembro Hollín Superior (Upper Hollín): El registro Gamma Ray sintético cuenta con una cantidad considerable de picos positivos para el miembro superior, los cuales van adquiriendo valores mayores a medida que nos acercamos al tope, esto se explica por la gran variación de depósitos sedimentarios que se evidencian en la Fig.4. Estos valores de radioactividad concuerdan de manera muy precisa con los estratos clásticos finos de un ambiente estuarino, donde se puede contar de manera más accesible con arcillas o materia

orgánica a comparación de estratos clásticos gruesos como es el caso del miembro inferior. Para la litofacie SCS de Vallejo et al. (2021), que pertenece a un ambiente submareal de estuario se obtuvieron valores más bajos de radioactividad por su bajo contenido de sedimentos finos, fósiles e icnofósiles.

El registro BI-Shale refleja una variación importante de fragilidad, por la gran variación de litofacies en el miembro superior de Hollín, los principales picos negativos están presentes en los estratos de carbón por su alta fragilidad, mientras que para las litofacies SCS y FFRCS de Vallejo et al. (2021) se obtuvieron los valores más altos, es decir, son los estratos menos frágiles del miembro superior de Hollín.

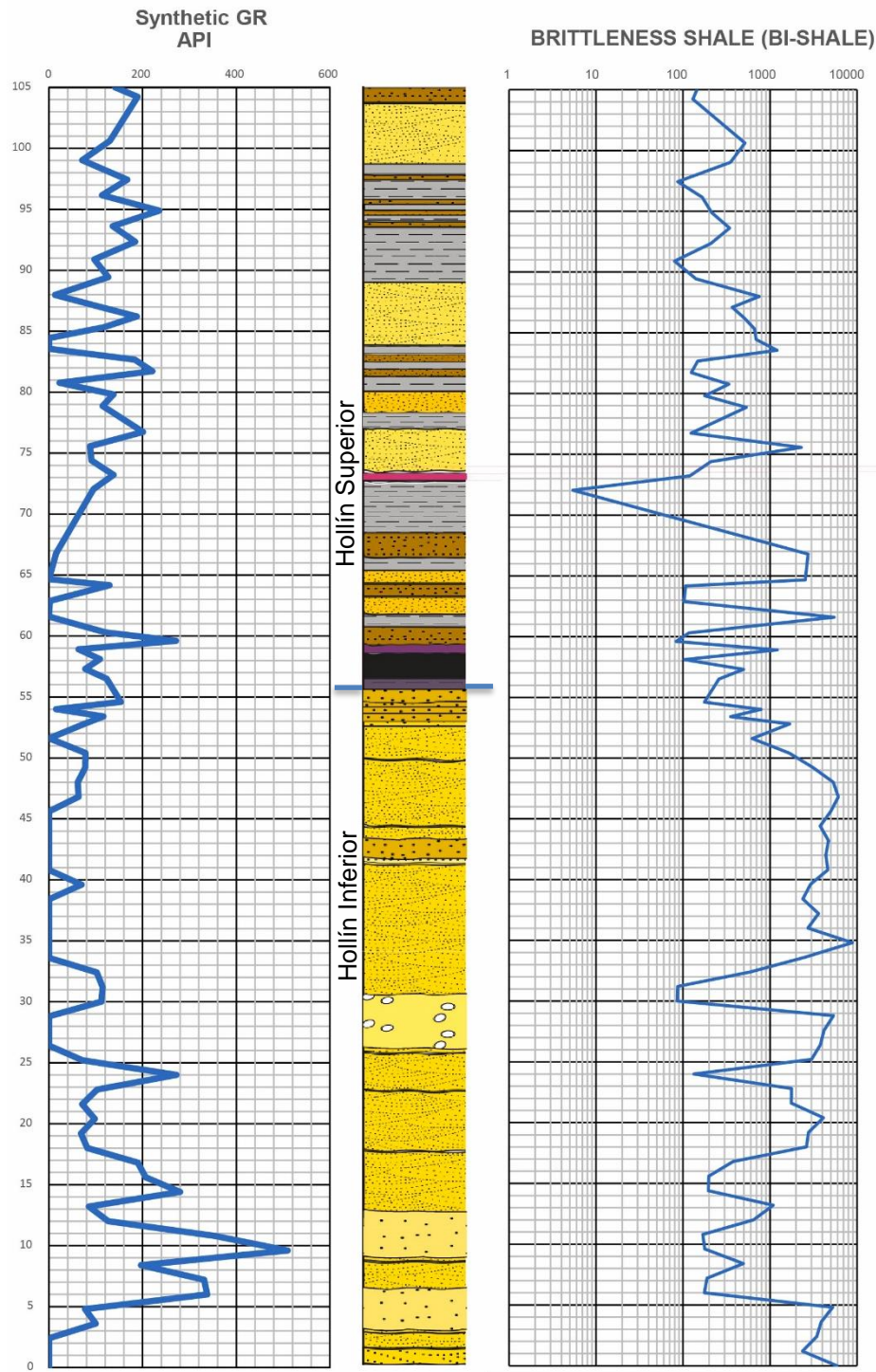


Figura 18. Registro sintético de Gamma Ray, registro BI-Shale y columna estratigráfica modificada de Vallejo et al. (2021).

3.3.2 Asociación mineral

El análisis mineralógico usando Quimioestratigrafía puede llegar a ser muy ambiguo si no se tiene un registro previo que soporte las asociaciones minerales, esto porque los elementos químicos en general, pueden estar presentes en diferentes tipos de minerales.

Lo que soporta este estudio de asociación mineral son los trabajos presentados por Vallejo et al. (2021) y Mariño (2015) donde se hizo un estudio detallado.

Miembro Hollín inferior (Main Hollín): El espectro de Si refleja una concentración elevada en todo el miembro inferior por su alto nivel de cuarzo en general lo que estaría relacionado directamente con la facie MCSX de Vallejo et al. (2021), excepto en los estratos que fueron designados previamente en la sección 3.3.1, donde el espectro de Al tiene picos positivos lo cual puede estar relacionado con la presencia de caolinita, los espectros de Fe, Mg, P y Mn muestran anomalías positivas en estos campos, esto está relacionado a minerales arcillosos como illita, el espectro de Ti está presente en mayor concentración en los sedimentos de planicie de inundación que se registraron en el miembro inferior lo que está directamente relacionado con la presencia de minerales polimorfos de TiO₂ como: Anatasa, brookite y rutilo, mientras que los picos positivos de Ca y K están relacionados con feldespatos. En el estudio de difracción de rayos X (XRD) de Mariño (2015) se reporta en el miembro inferior en general una cantidad de cuarzo mayor al 90% y el resto de minerales corresponden a caolinita, illita y feldespatos los cuales están relacionados con los espectros antes analizados, por otro lado, en el trabajo de Vallejo et al. (2021) se muestra la facie FLS la cual refleja la presencia de sedimentos finos en el miembro inferior de Hollín, lo que indica consistencia de los datos quimioestratigráficos.

Miembro Hollín Superior (Upper Hollín): El espectro de Si correspondiente al miembro superior presenta variaciones por los abundantes cambios litológicos, los valores más bajos registrados corresponden a carbones y los más altos corresponden a la facie SCS reportada por Vallejo et al. (2021), los espectros de Al y Fe cuentan con picos positivos concordantes entre ellos en gran parte, lo que está relacionado con minerales arcillosos como caolinita e incluso el alto contenido de Fe puede estar relacionado directamente a la presencia de pirita, el espectro de Mg para el miembro superior no es visible, por la baja cantidad de minerales asociadas a este elemento. Los espectros de Mn y Ca cuentan con un par de picos positivos que concuerdan entre sí, lo que podría reflejar la presencia de esmectita. Para el espectro de Ti se encuentra una variación importante donde se observan grandes valores que pertenecen al ambiente estuarino intermareal a la base del miembro superior, mientras que hacía al tope de la columna sedimentaria existen más variaciones las cuales están relacionadas a los mismos minerales mencionados en el miembro inferior. Por otro lado, el espectro de K presenta picos positivos no tan pronunciados los cuales se mantienen constantes a lo largo de todo el miembro superior lo que estaría relacionado con feldespatos, micas y arcillas. Por último, el espectro de P aumenta hacia el tope de la

columna estratigráfica, lo que podría deberse a minerales pesados o presencia de fosfatos biogénicos.

Los resultados de Vallejo et al. (2021) y Mariño (2015) muestran que los minerales como feldespatos, caolinita, illita y piritita cuentan con un porcentaje mayor al examinado en el presente estudio, porque dichas investigaciones cuentan con un enfoque direccionado a las características físicas y mineralógicas de la Formación Hollín.

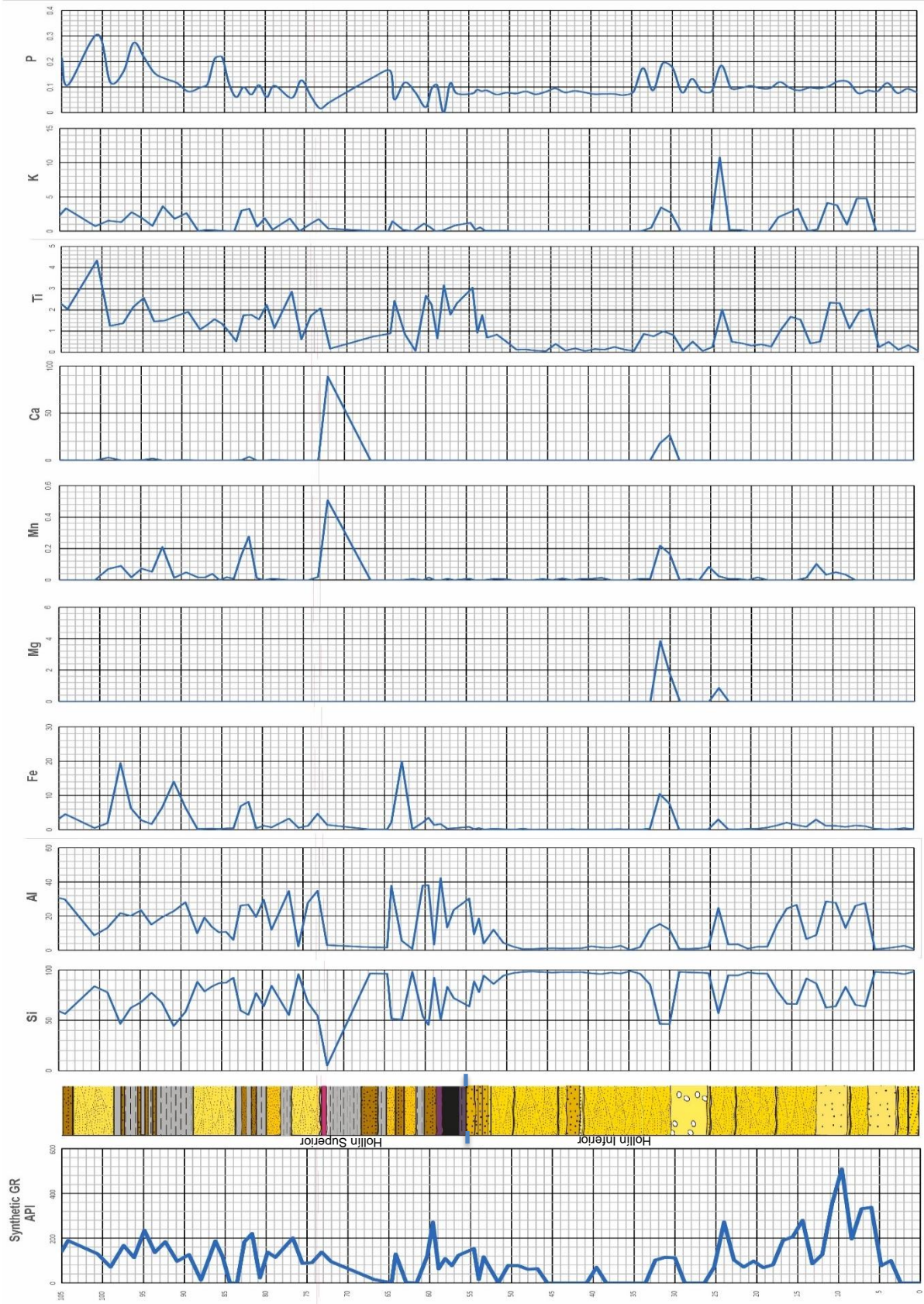


Figura 19. Registro sintético de Gamma Ray, Si, Al, Fe, Mg, Mn, Ca, Ti, K, P y columna estratigráfica modificada de Vallejo et al. (2021).

3.3.3 Proveniencia

El concepto es la base de los estudios de proveniencia es que “los sedimentos clásticos se derivan de rocas fuente que se han desintegrado por erosión y meteorización. Las composiciones de los sedimentos clásticos son, por lo tanto, el producto de diferentes tipos de rocas dentro de una cuenca sedimentaria” (Bjørlykke, 2010). En este estudio se tomó en cuenta el ratio más efectivo en la identificación de fuentes cratónicas y orogénicas (Ti/Zr), el cual se acopla perfectamente con las fuentes de la Cuenca Oriente.

Miembro Hollín inferior (Main Hollín): Para el caso el espectro de Ti/Zr tenemos que tener en cuenta que estamos comparando un elemento mayor contra un elemento traza, por lo que la abundancia entre estos elementos varía en gran proporción, es por esto que es necesario usar una escala logarítmica para dicho ratio, donde los picos que sobrepasen el valor de 10 reflejarán una proveniencia mayor del cratón y los menores al valor de 10 reflejarán una proveniencia mayor andina.

Miembro Hollín Superior (Upper Hollín): Para el caso el ratio Ti/Zr se observa una predominancia de picos positivos principalmente en los sedimentos finos y en las arenas con estructuras sigmoidales (facies MLL y FSS de Vallejo et al. (2021)) lo que significa que la principal fuente de proveniencia para estos estratos sería el cratón, mientras que, las facies arenosa (SCS y FFRCS de Vallejo et al., (2021)) presentan picos negativos lo que demuestra una proveniencia principalmente andina.

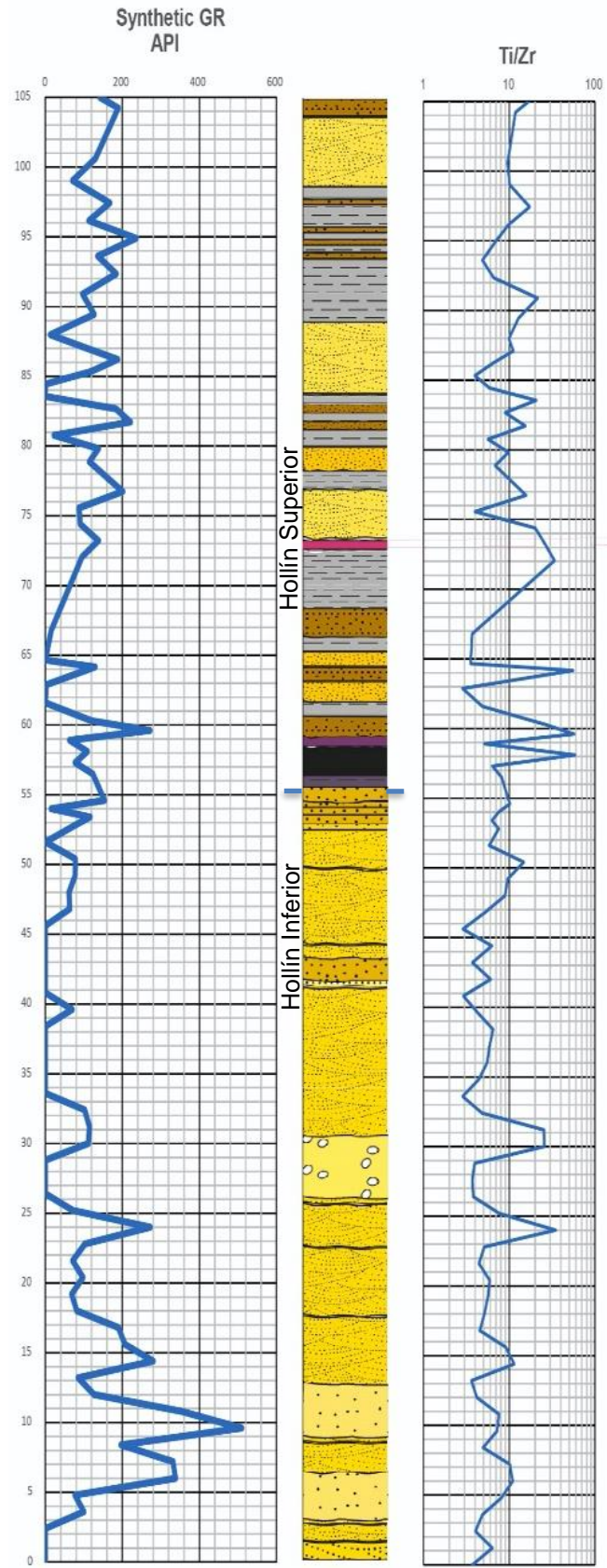


Figura 20. Registro sintético de Gamma Ray, ratio Ti/Zr y columna estratigráfica de la Formación Hollín, modificada de Vallejo et al. (2021).

3.3.4 Contraste de ambientes paleoredox e índices de meteorización

El índice de meteorización y los ambientes paleoredox ya explicados en las secciones 3.2.2, 3.2.3 y 2.3, pueden ser medidos por espectros quimioestratigráficos, para el caso de los ambientes paleoredox se utilizó los siguientes ratios y elementos químicos diagnósticos U/Th, Ni/Co, Mo y V. Por otro lado, para el caso de los índices de meteorización se utilizó los ratios (Ba/Sr) y (Rb/Sr), donde los valores que reflejen valores mayores a 1 confirmarían la baja cantidad de Sr producto de la meteorización. Sin embargo, debemos tomar en cuenta las dos curvas juntas pues el Rb está relacionado con minerales arcillosos, feldespatos y micas, que están presentes en la columna estratigráfica y podrían aumentar los valores del ratio (Rb/Sr).

Miembro Hollín inferior (Main Hollín): Para el ratio U/Th y Ni/Co los valores son prácticamente inexistentes excepto en las zonas que corresponderían a las ya discutidas planicies de inundación en la sección 3.3.1 donde se registran valores muy bajos, lo que reflejaría una relación de materia orgánica y ambientes anóxicos. Los espectros correspondientes a Mo y V están relacionados con la existencia de condiciones anóxicas, aunque también pueden estar relacionados con minerales arcillosos, se debe tratar estos datos con cuidado por la baja concentración de dichos elementos, pues no necesariamente podría ser un factor determinante.

Los espectros para el miembro inferior muestran comportamientos diferentes y hay pocas concordancias, lo que muestra que los altos valores de Rb son producto del aporte mineral ya mencionado al inicio de esta sección. Por otro lado, el Ba no fue alterado en ningún momento, pues para la perforación de las muestras no se usaron aditamentos de perforación (lodos de perforación), a los 22, 23, 27 metros desde la base se observan valores muy altos correspondientes a las facies MCSX y CFM. A los 39 metros desde la base hasta el tope del miembro inferior de Hollín se observa una alta meteorización la cual pasa por las facies MCSX y AFLL.

Miembro Hollín Superior (Upper Hollín): Para el ratio U/Th y Ni/Co se observan picos positivos en prácticamente en todos los estratos excepto en las facies MLL (estratos cercanos a la base), FFRCS y FSS las cuales presentan una importante alternancia entre picos positivos y negativos lo cual sería producto del ambiente estuarino intermareal que propone Vallejo et al. (2021), por otro lado, a medida que avanzamos hacia el tope de la columna sedimentaria los valores son mucho más altos y constantes esto está se evidencia en las facies MLL (estratos cercanos al tope), FFRCS (estratos cercanos al tope) y SCS donde esto sería resultado del cambio de un ambiente estuarino intermareal a un ambiente

estuarino submareal el cual es fue registrado por Vallejo et al. (2021). Los valores de Mo y V al representar anoxia coinciden con los picos principales de los ratios analizados anteriormente, lo que confirma la presencia de condiciones anóxicas, al igual que para el miembro inferior, estos valores pueden ser alterados directamente por la presencia de minerales arcillosos, los cuales son muy abundantes en el miembro superior a comparación del miembro inferior de la Formación Hollín.

Al igual que para el miembro inferior los valores de Rb no son tan confiables a comparación de los valores de Ba, por la gran cantidad de minerales arcillosos presentes en el miembro superior, los resultados para el ratio Ba/Sr son bajos a comparación del miembro inferior, donde solamente existen valores altos en 63, 64 y 84 metros desde la base, estos valores corresponden a las litofacies FSS, FFRCS y SCS respectivamente, por lo tanto, la meteorización es muy baja en general para el miembro superior.

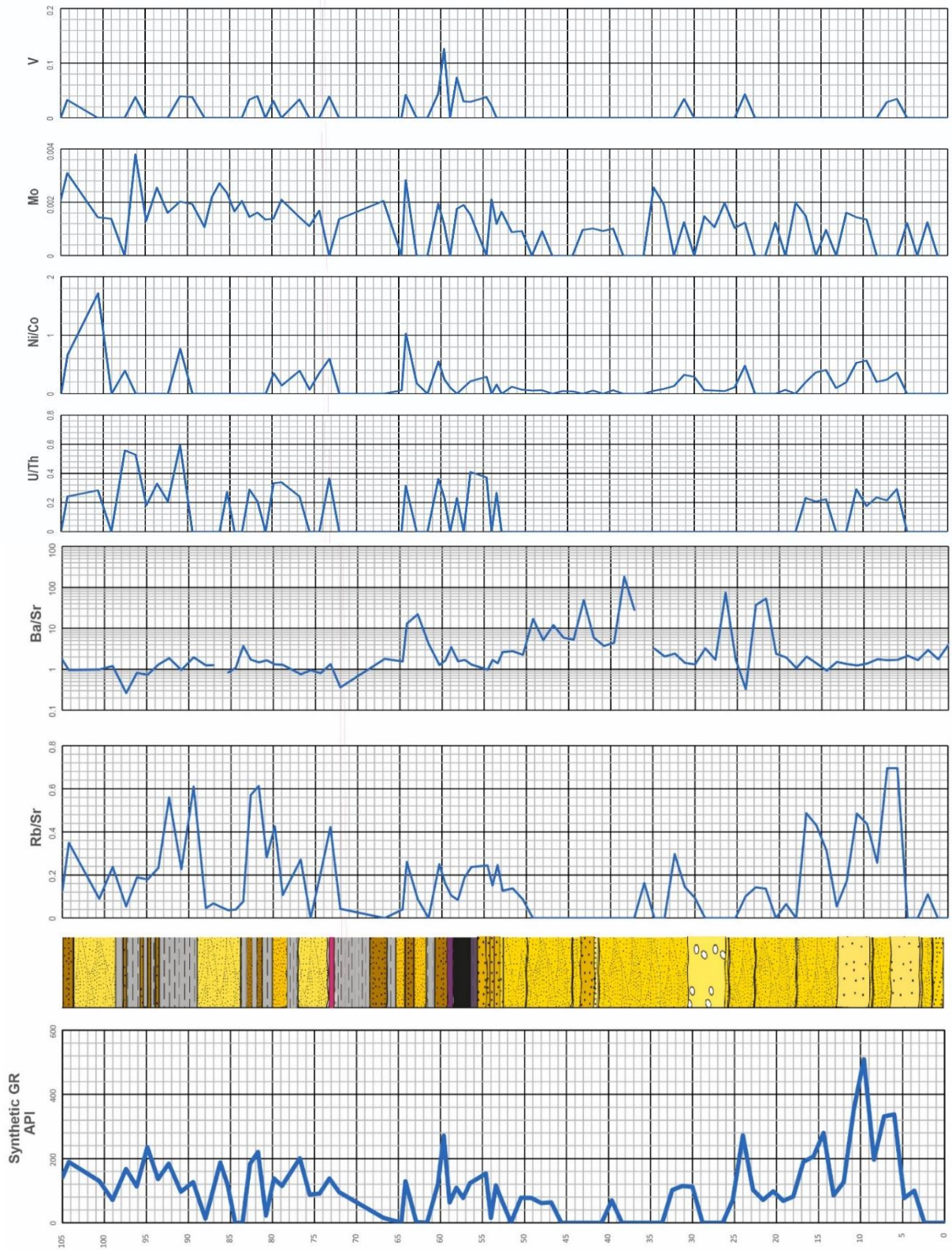


Figura 21. Registro sintético de Gamma Ray, Rb/Sr, Ba/Sr, U/Th, Ni/Co, Mo, V y columna estratigráfica modificada de Vallejo et al. (2021).

4. CONCLUSIONES

- Dentro de la clasificación litológica obtenida a partir de la geoquímica, con el diagrama de Herron (1988), registro gamma ray sintético y estudio Quimioestratigráfico de asociación mineral, se definieron con mejor detalle y precisión varios estratos de la columna estratigráfica, como es el caso de la presencia de varios sedimentos finos dentro del miembro inferior de la Formación Hollín o la presencia de rocas carbonatadas en el miembro superior de la misma.
- La proveniencia desde el punto de vista quimioestratigráfico muestra la predominancia de un aporte cratónico (cratón amazónico) para ambos miembros de la Formación Hollín, además los diagramas utilizados dentro de este estudio muestran una composición predominantemente ácida, alto transporte por la madurez textural de los sedimentos y una fuente no marina que concuerda con la naturaleza del cratón, mientras el aporte restante de las rocas está relacionado al aporte andino.
- Los ambientes paleoredox fueron analizados por medio de los diagramas de Rimmer (2004) y por espectros quimioestratigráficos, esta última metodología mencionada arroja resultados mucho más confiables al analizar de manera individual y de manera combinada (ratios) los elementos clave dentro del análisis de estos ambientes, donde el miembro superior muestra una alternancia entre ambientes con tendencia a ser redox (pobres en oxígeno) y ambientes que no lo son, lo cual estaría mostrándonos las variaciones de la línea de costa durante la subida y bajada del nivel del mar en el ambiente estuarino al que pertenece el miembro superior de la Formación Hollín.
- La meteorización al estar asociada a la interacción de una roca con agentes externos, muestra un espectro contrario a lo contrario a un ambiente paleoredox, lo que valida las interpretaciones para ambientes paleoredox.
- La fragilidad de las rocas observada con el registro BI-Shale basado en la composición mineral, mostró que el miembro superior de Hollín es mucho más frágil que el miembro inferior, lo cual puede ser correlacionado para perforaciones en otros reservorios de la cuenca que pertenezcan a esta formación.
- Las evidencias geoquímicas recopiladas en este estudio fueron correlacionadas y reafirman las interpretaciones realizadas en los trabajos de Mariño (2015) y Vallejo et al. (2021), donde el nivel eustático comenzó a subir desde ríos entrenzado en Hollín Inferior, el cual por su configuración también contaba con sedimentos finos que se los interpretó como posibles planicies de inundación o parte de barras

propias del sistema fluvial entrenzado. Hacia el miembro superior de la Formación Hollín se observa un cambio importante en los ambientes paleoredox, como en el registro de gamma ray sintético los cuales se van intercalando entre picos positivos y negativos lo que muestra niveles poco oxigenados vs oxigenados depositados durante variaciones del nivel del mar. Estos cambios también reflejan el movimiento de la línea de costa durante la subida progresiva del nivel del mar durante esta etapa la cual es reconocida como el inicio de un transgressive system tract.

- La geoquímica es una herramienta precisa que nos ayuda a entender la deposición y evolución de rocas sedimentarias, tomando en cuenta conocimientos previos (contexto geodinámico, petrográfico, sedimentológico y estratigráfico) que sumen a la interpretación. Por otro lado, las interpretaciones dadas sin conocimientos previos abren un abanico de posibles interpretaciones geológicas que pueden ser erróneas.

5. RECOMENDACIONES

- Continuar con el estudio geoquímico y Quimioestratigráfico dentro de las zonas no cubiertas del miembro superior de la Formación Hollín, para así contar con un estudio completo de todos los ambientes de deposición de dicha formación.
- Aplicar la metodología del registro Gamma Ray sintético para así prescindir de las herramientas Wireline y sus altos costos.
- Aplicar el registro BI-Shale para correlacionar la fragilidad de las rocas para futuras perforaciones de yacimientos que se encuentren dentro de la misma formación geológica.
- Realizar este tipo de ensayos quimioestratigráficos para los diferentes campos petroleros de la Cuenca Oriente, donde se cuente con núcleos de perforación, para conocer con exactitud las variaciones eustáticas mapeando la migración de la línea de costa como se lo realiza en el estudio de Turner et al. (2015), y tener información estratigráfica más precisa.
- Correlacionar estos datos con más afloramientos de la Formación Hollín que permitirían hacer un estudio quimioestratigráfico mucho más preciso.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo Viana, L. G., & Aigner Aburto, J. M. (2008). *Diseños de investigación experimental y no-experimental*.
- Algeo, T. J., & Rowe, H. (2012). Paleooceanographic applications of trace-metal concentration data. *Chemical Geology*, 324, 6-18.
- Analizador XRF portátil Vanta: Serie Vanta | Olympus. (s. f.). Recuperado 27 de junio de 2022, de [https://www.olympus-ims.com/es/vanta/#!cms\[focus\]=cmsContent14332](https://www.olympus-ims.com/es/vanta/#!cms[focus]=cmsContent14332)
- Anderton, R. (1985). Clastic facies models and facies analysis. *Geological Society, London, Special Publications*, 18(1), 31-47. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1985.018.01.03>
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2004). *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo* (Vol. 144). Institut français d'études andines.
- Baby, P., Rivadeneira, M., Barragán, R., & Christophoul, F. (2013). Thick-skinned tectonics in the Oriente foreland basin of Ecuador. *Geological Society, London, Special Publications*, 377(1), 59-76. <https://doi.org/10.1144/SP377.1>
- Baby, P., Rivadeneira, M., Christophoul, F., & Barragan, R. (1999). *Style and timing of deformation in the Oriente Basin of Ecuador*. 5.
- Baldock, J. W. (1982). *Geología del Ecuador: Boletín de Explicación del Mapa geológico de la República del Ecuador*. Dirección General de Geología y Minas, Quito, Ecuador.
- Banner, J. L. (1995). Application of the trace element and isotope geochemistry of strontium to studies of carbonate diagenesis. *Sedimentology*, 42(5), 805-824.
- Bhatia, M. R., & Crook, K. A. (1986). Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to mineralogy and petrology*, 92(2), 181-193.
- Bjørlykke, K. (2010). Sedimentary Geochemistry. En K. Bjørlykke, *Petroleum Geoscience* (pp. 87-111). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02332-3_3

- Cabrera, M. (1987). *El método inductivo*. 61.
- Christophoul, F., Baby, P., & Dávila, C. (2002). Stratigraphic responses to a major tectonic event in a foreland basin: The Ecuadorian Oriente Basin from Eocene to Oligocene times. *Tectonophysics*, 345(1-4), 281-298. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00217-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00217-7)
- Cordani, U. G., Teixeira, W., D'Agrella-Filho, M. S., & Trindade, R. I. (2009). The position of the Amazonian Craton in supercontinents. *Gondwana Research*, 15(3-4), 396-407. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.12.005>
- Craigie, N. (2018). *Principles of Elemental Chemostratigraphy*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71216-1>
- Dean, W. E., Gardner, J. V., & Piper, D. Z. (1997). Inorganic geochemical indicators of glacial-interglacial changes in productivity and anoxia on the California continental margin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(21), 4507-4518.
- Ellis, D. V. (2007). *Well logging for earth scientists* (2nd ed). Springer.
- Floyd, P. A., & Leveridge, B. E. (1987). Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society*, 144(4), 531-542. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531>
- Franco, J. A., Cramer, T., Bonilla, A., Castañeda, A. J., Poujol, M., Amaya, Z., Franco, J. A., Cramer, T., Bonilla, A., Castañeda, A. J., Poujol, M., & Amaya, Z. (2021). Mineralogía y geocronología de rutilo-(Nb,Ta) relacionado a casiterita y columbita-tantalita provenientes de rocas Mesoproterozoicas del Cratón Amazónico cerca de Cachicamo, Colombia. *Boletín de Geología*, 43(1), 99-126. <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n1-2021005>
- Gaibor, J., Hochuli, J. P. A., Winkler, W., & Toro, J. (2008). Hydrocarbon source potential of the Santiago Formation, Oriente Basin, SE of Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(2), 145-156. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.07.002>

- Garzanti, E., & Andò, S. (2007). Chapter 29 Plate Tectonics and Heavy Mineral Suites of Modern Sands. En *Developments in Sedimentology* (Vol. 58, pp. 741-763). Elsevier.
[https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(07\)58029-5](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58029-5)
- Hartmann, L. A., & Delgado, I. (2001). Cratons and orogenic belts of the Brazilian Shield and their contained gold deposits. *Mineralium Deposita*, 36(3-4), 207-217.
<https://doi.org/10.1007/s001260100175>
- Herron, M. M. (1988). Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Research*, 58(5), 820-829.
- Horton, B. K. (2018). Sedimentary record of Andean mountain building. *Earth-Science Reviews*, 178, 279-309. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.025>
- Horton, B. K., Saylor, J. E., Nie, J., Mora, A., Parra, M., Reyes-Harker, A., & Stockli, D. F. (2010). Linking sedimentation in the northern Andes to basement configuration, Mesozoic extension, and Cenozoic shortening: Evidence from detrital zircon U-Pb ages, Eastern Cordillera, Colombia. *GSA Bulletin*, 122(9-10), 1423-1442.
<https://doi.org/10.1130/B30118.1>
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Peterson, D. E., Helg, U., & Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews*, 57(1-2), 75-124. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00071-X)
- Jaillard, E., Caron, M., Dhondt, A., Ordoñez, M., Andrade, R., Bengtson, P., Bulot, L., Cappetta, H., Dávila, C., & Díaz, R. (1997). Síntesis estratigráfica y sedimentológica del Cretáceo y Paleógeno de la cuenca oriental del Ecuador. *Orstom-Petroproduccion eds*, 164.
- Lasluisa Molina, E. R., & Moreno Cerón, K. J. (2018). *La Formación Macuma en la cordillera de Cutucú al sureste de Ecuador: Paleontología y estratigrafía*.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19132>
- Luzieux, L. D. A., Heller, F., Spikings, R., Vallejo, C. F., & Winkler, W. (2006). Origin and Cretaceous tectonic history of the coastal Ecuadorian forearc between 1°N and 3°S: Paleomagnetic,

radiometric and fossil evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, 249(3), 400-414.

<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.07.008>

Mackenzie, F. T. (2005). *Sediments, Diagenesis, and Sedimentary Rocks: Treatise on Geochemistry, Volume 7* (Vol. 7). Elsevier.

Mariño, E. D. L. M. M. M. (2015). *IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FACIES DE LA FORMACIÓN HOLLÍN EN UN AFLORAMIENTO UBICADO EN EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA-CODO SINCLAIR, PROVINCIA DE NAPO*. 220.

Marshall, C. P., & Fairbridge, R. W. (Eds.). (1999). *Encyclopedia of geochemistry*. Kluwer Academic Publishers.

McLennan, S. M., Hemming, S., McDaniel, D. K., & Hanson, G. N. (1993). Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Special Papers-Geological Society of America*, 21-21.

Ochoa, R., Nava, N., & Fusil, D. (2020). Comprensión epistemológica del tesista sobre investigaciones cuantitativas, cualitativas y mixtas. *Orbis: revista de Ciencias Humanas*, 15(45), 13-22.

Ordoñez, M. (2006). *Micropaleontología ecuatoriana: Datos bioestratigráficos y paleoecológicos de las cuencas: Graben de Jambelí, Progreso, Manabí, Esmeraldas y Oriente; del levantamiento de la península de Santa Elena, y de las cordilleras Chongón Colonche, costera y Occidental*. Petroproducción y Centro de Investigaciones Geológicas de Guayaquil.

Posamentier, H. W., & Vail, P. R. (1988). *Eustatic controls on clastic deposition II—sequence and systems tract models*.

Qian, K.-R., Liu, T., Liu, J.-Z., Liu, X.-W., He, Z.-L., & Jiang, D.-J. (2020). Construction of a novel brittleness index equation and analysis of anisotropic brittleness characteristics for unconventional shale formations. *Petroleum Science*, 17(1), 70-85.

<https://doi.org/10.1007/s12182-019-00372-6>

- Quirein, J. A., Gardner, J. S., & Watson, J. T. (1982). Combined Natural Gamma Ray Spectral/Litho-Density Measurements Applied to Complex Lithologies. *All Days*, SPE-11143-MS.
<https://doi.org/10.2118/11143-MS>
- Ramirez, F. A. (2021). *Cretaceous Napo U and Napo T Sandstone Channels Accommodation Space Created by Erosion and Tectonism, Exploration and Development Implications on Western Ecuadorian Oriente Basin; #11351 (2021)*. 24. <https://doi.org/10.1306/11351Ramirez2020>
- Ratcliffe, K. T., Morton, A. C., Ritcey, D. H., & Evenchick, C. A. (2007). Whole-rock geochemistry and heavy mineral analysis as petroleum exploration tools in the Bowser and Sustut basins, British Columbia, Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 55(4), 320-336.
<https://doi.org/10.2113/gscpgbull.55.4.320>
- Rickman, R., Mullen, M., Petre, E., Grieser, B., & Kundert, D. (2008, septiembre 21). *A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
<https://doi.org/10.2118/115258-MS>
- Rimmer, S. M. (2004). Geochemical paleoredox indicators in Devonian–Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA). *Chemical Geology*, 206(3-4), 373-391.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.12.029>
- Roddaz, M., Hermoza, W., Mora, A., Baby, P., Parra, M., Christophoul, F., Brusset, S., & Espurt, N. (2011). Cenozoic Sedimentary Evolution of the Amazonian Foreland Basin System. En C. Hoorn & F. P. Wesselingh (Eds.), *Amazonia: Landscape and Species Evolution* (pp. 61-88). Wiley-Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781444306408.ch5>
- Rollinson, H., & Pease, V. (Eds.). (2021a). Using Major Element Data. En *Using Geochemical Data: To Understand Geological Processes* (2.^a ed., pp. 49-95). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781108777834.006>
- Rollinson, H., & Pease, V. (2021b). *Using Geochemical Data: To Understand Geological Processes* (2.^a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108777834>

- Romero, C. W., Přejmení, A., Granja, J., Escobar, V., Gramal, A., Carranco, F., Condoy, D., & Calderón, E. (2021). Las características geoquímicas y significado geodinámico del Miembro Yaupi de la Formación Chapiza en la Cordillera Cutucú. *Revista Científica GeoLatitud*, 4(2), 1-10.
- Romeuf, N., Aguirre, L., Soler, P., Féraud, G., Jaillard, E., & Ruffet, G. (1995). *Middle Jurassic volcanism in the Northern and Central Andes*. 15.
- Ruiz, G. M. H. (2002). *Exhumation of the northern Sub-Andean Zone of Ecuador and its source regions: A combined thermochronological and heavy mineral approach* (p. 260 S.) [ETH Zurich; Application/pdf]. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-004489528>
- Ruiz, G. M. H., Seward, D., & Winkler, W. (2004). Detrital thermochronology—a new perspective on hinterland tectonics, an example from the Andean Amazon Basin, Ecuador. *Basin Research*, 16(3), 413-430.
- Sageman, B. B., & Lyons, T. W. (2003). *Geochemistry of fine-grained sediments and sedimentary rocks* (Vol. 7).
- Shanmugam, G., Poffenberger, P., & Toro Álava, J. (2000). Tide-Dominated Estuarine Facies in the Hollin and Napo (T"and «U») Formations (Cretaceous), Sacha Field, Oriente Basin, Ecuador". *AAPG Bulletin*, 84. <https://doi.org/10.1306/C9EBCE7D-1735-11D7-8645000102C1865D>
- Sinclair, J. H., & Wasson, T. (1923). Explorations in Eastern Ecuador. *Geographical Review*, 13(2), 190-210. <https://doi.org/10.2307/208447>
- Spalletti, L. A., Schwarz, E., & Veiga, G. D. (2014). Inorganic geochemistry as indicator of provenance and sedimentary environment in black shales: The tithonian transgressive deposits of the Neuquén basin (Vaca Muerta Formation), Argentina. *Andean Geology*, 41(2), 401-435. <https://doi.org/10.5027/andgeoV41n2-a07>
- Tribovillard, N., Algeo, T. J., Lyons, T., & Riboulleau, A. (2006). Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. *Chemical geology*, 232(1-2), 12-32.

- Tschopp, H. J. (1953). Oil explorations in the Oriente of Ecuador, 1938–1950. *AAPG Bulletin*, 37(10), 2303-2347.
- Tschopp, H. J. (1956). Upper Amazon basin geological province. *Geological Society of America Memoir*, 65, 296-303.
- Turner, B. W., Molinares-Blanco, C. E., & Slatt, R. M. (2015). Chemostratigraphic, palynostratigraphic, and sequence stratigraphic analysis of the Woodford Shale, Wyche Farm Quarry, Pontotoc County, Oklahoma. *Interpretation*, 3(1), SH1-SH9.
- Vallejo, C., Hochuli, P. A., Winkler, W., & Von Salis, K. (2002). Palynological and sequence stratigraphic analysis of the Napo Group in the Pungarayacu 30 well, Sub-Andean Zone, Ecuador. *Cretaceous Research*, 23(6), 845-859.
- Vallejo, C., Romero, C., Horton, B. K., Spikings, R. A., Gaibor, J., Winkler, W., Esteban, J. J., Thomsen, T. B., & Mariño, E. (2021). Jurassic to Early Paleogene sedimentation in the Amazon region of Ecuador: Implications for the paleogeographic evolution of northwestern South America. *Global and Planetary Change*, 204, 103555.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103555>
- Wasson, & Sinclair. (1927). Geological Explorations East of the Andes in Ecuador. *AAPG Bulletin*, 11. <https://doi.org/10.1306/3D9327D1-16B1-11D7-8645000102C1865D>
- Weissert, H., Joachimski, M., & Sarnthein, M. (2008). Chemostratigraphy. *Newsletters on Stratigraphy*, 42(3), 145-179. <https://doi.org/10.1127/0078-0421/2008/0042-0145>
- White. (2005). Geochemistry. An on-line textbook. *Cornell University*, 701.
- White, H. J., Skopec, R. A., Ramirez, F. A., Rodas, J. A., & Bonilla, G. (1995). *Reservoir characterization of the Hollin and Napo formations, western Oriente Basin, Ecuador*.
- Winchester, J. A., & Floyd, P. A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343.
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)

Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Abegglen, P., Tobler, St., & Egüez, A. (2005). The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the inter-Andean depression in Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 19(1), 5-19.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.06.006>