

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

ESTRATIGRAFÍA, SEDIMENTOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LAS FORMACIONES CHAPIZA Y HOLLÍN EN LA ZONA SUBANDINA.

ESTRATIGRAFÍA, SEDIMENTOLOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LA FORMACIÓN CHAPIZA Y LOS MIEMBROS ALLUVIAL VALLEY FILL Y HOLLÍN INFERIOR DE LA FORMACIÓN HOLLÍN, EN EL CORTE COCA-CODO SINCLAIR, ZONA SUBANDINA, CUENCA ORIENTE.

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA GEÓLOGA.

MARÍA FERNANDA GARRIDO CUERO

maria.garrido@epn.edu.ec

DIRECTOR: Dr. CRISTIAN FERNANDO VALLEJO CRUZ

cristian.vallejob@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2022

CERTIFICACIONES

Yo, MARÍA FERNANDA GARRIDO CUERO 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.



MARÍA FERNANDA GARRIDO CUERO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MARÍA FERNANDA GARRIDO CUERO, bajo mi supervisión.



Dr. CRISTIAN FERNANDO VALLEJO CRUZ
DIRECTOR

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.

MARÍA FERNANDA GARRIDO CUERO

Dr. CRISTIAN FERNANDO VALLEJO CRUZ

DEDICATORIA

Llegar a este momento de mi formación profesional es un sueño cumplido que dedico a quienes nunca han dejado de estar.

A Dios primero, por darme el don de vivir y no dejarme vencer ni en mis peores momentos.

A mi familia que es mi dualidad entre mi mayor fortaleza y mi punto más sensible. A mi madre, la persona más luchadora e incansable que conozco, le dedico cada uno de mis logros, y todo mi esfuerzo porque lo aprendí de ella. A mi más grande apoyo, mi hermana, por nunca soltarme y por ayudarme a cubrir cada uno de mis vacíos. A mi papá, porque nuestras diferencias no limitan el amor que le tengo. Y a mi Brunito, por ser el amor de mi vida.

A la familia que elegí... mis amigos, que son refugio, contención y festejo; por los buenos momentos y por los más difíciles, no hay nada que no podamos juntos. Y también a aquel amigo que tuvo que marcharse antes, por quien quisiera pausar el tiempo y volver a ese abrazo que nos dimos, sin que tuviese que ser el último... sé que nos abraza desde el cielo.

Tengo una parte de cada uno de ustedes grabada en mi corazón.

Todos mis logros son suyos.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco mi vida y todo lo que ha hecho en ella, a mi mamá, no hay algo de todo lo que ha hecho por mí que no pueda agradecer. Quiero ser tan solo un poco de la grandiosa mujer que ella es, gracias por ser mi norte, Ma.

A mi hermana, por ser mi mejor amiga y no faltarme ni un solo momento, gracias por creer en mí incluso las veces que yo he dudado que puedo.

A mi sobrinito, por regalarme el amor más lindo que he conocido, y llegar con su alegría a cambiarme la vida y reconstruir todo lo que estaba roto.

A mi papá, porque pese a todo, sé que está orgulloso de la persona que me he convertido.

A mi familia materna, por siempre estar, más allá de la distancia.

A mis amigos, por convertirse en mi familia y por siempre hacer el camino más bueno.

A todos ellos gracias por creer en mí, por enseñarme a romper los obstáculos, por ayudarme a crecer, por su amor y por hacerme cada día mejor persona.

Asimismo, agradezco a los profesionales y excelentes personas, que, en lugar de subestimarme, han creído en mí, me han permitido aprender mucho de mi carrera, y me han motivado tanto. No hay duda de que son el referente de profesional que aspiro ser.

Finalmente, a mis profesores que sí supieron ser guías a lo largo de la carrera, y por darme la oportunidad de aprender de ellos; particularmente, a mi director de tesis, por su ayuda y guía en este último tramo de la universidad.

A todos, gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Ubicación del área de estudio	3
1.5 Marco teórico	4
1.5.1 Sedimentología	4
1.5.1.1 Facies sedimentarias	4
1.5.1.2 Estructuras sedimentarias	5
1.5.1.2.1 Estructuras pre-sedimentarias	5
1.5.1.2.2 Estructuras sin-sedimentarias	5
1.5.1.2.3 Estructuras post-sedimentarias	8
1.5.1.3 Ambientes Sedimentarios análogos al área de estudio	8
1.5.1.3.1 Ambiente fluvial	8
1.5.1.3.2 Ambiente aluvial	10
1.5.2 Estratigrafía	10
1.5.2.1 Variables geológicas de la Estratigrafía	10
1.5.2.2 Columna estratigráfica	11
1.5.2.3 Estratigrafía secuencial	11
1.5.2.3.1 Cambios del nivel base	11
1.5.3 Geoquímica	12
1.5.3.1 Fluorescencia de Rayos X (XRF)	12
1.5.3.1.1 Principio de XRF	12
1.5.3.2 Lito-geoquímica	13
1.5.3.2.1 Quimio-estratigrafía	13
1.5.3.2.2 Uso de datos de elementos mayores	13
1.5.3.2.3 Uso de datos de elementos traza	14
1.5.3.2.4 Ratios utilizados para análisis geoquímico	14

1.6 Marco Geológico	15
1.6.1 Geología Regional	15
1.6.2 Evolución Tectónica Regional	16
1.6.3 Estratigrafía de la Cuenca Oriente	16
1.6.4 Estratigrafía local del área de estudio	20
1.6.5 Síntesis paleogeográfica del área de estudio	21
2 METODOLOGÍA	22
3 RESULTADOS, DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	25
3.1 Resultados	26
3.1.1 Análisis y definición de litofacies	26
3.1.2 Interpretación de facies	29
3.1.3 Evolución sedimentológica y relaciones estratigráficas	31
3.1.4 Geoquímica de muestras analizadas	32
3.1.4.1 Afinidades mineralógicas de elementos	32
3.1.4.1.1 Análisis estadístico	32
3.1.4.1.1 Análisis gráfico	34
3.1.4.2 Esquemas de Correlación Químio-estratigráfica	35
3.1.4.2.1 Determinación de litologías	36
3.1.4.2.2 Perfiles, químio-zonas y límites químio-estratigráficos	37
3.1.4.2.2.1 Perfiles de elementos mayores	37
3.1.4.2.2.2 Perfiles de elementos traza y REE	39
3.1.4.2.2.3 Perfiles de Synthetic Gamma Ray y ratios de elementos	42
3.1.4.2.3 Modelo en Proveniencia	45
3.1.4.2.4 Fuente	46
3.1.4.2.5 Ambiente de depositación	47
3.1.4.2.6 Cambios en Paleorredox	48
3.1.4.2.7 Meteorización	49
3.2 Discusión y Conclusiones	50
3.3 Recomendaciones	52
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
5 ANEXOS	61
ANEXO I	61
ANEXO II	62
ANEXO III	65
ANEXO IV	66
ANEXO V	67
ANEXO VI	67

ANEXO VII	68
ANEXO VIII	69
ANEXO IX	69
ANEXO X	70
ANEXO XI	71
ANEXO XII	73
ANEXO XIII	73
ANEXO XIV	74
ANEXO XV	75
ANEXO XVI	75
ANEXO XVII	76
ANEXO XVIII	77
ANEXO XIX	78
ANEXO XX	78
ANEXO XXI	79
ANEXO XXII	79

RESUMEN

En este estudio se realizó un reconocimiento macroscópico de componentes en muestras de mano, la interpretación de afinidades minerales determinadas en trabajos previos, y fluorescencia de rayos X, con lo que se reconocieron 12 facies, de tipo arenoso, conglomerático, lodoso-limoso, volcanoclástico y volcánico, distribuidas entre la Formación Chapiza, y los miembros Alluvial Valley Fill (AVF) y Hollín Inferior de la Formación Hollín, y que correlacionadas con su respuesta geoquímica, permitieron determinar el ambiente de depósito fluvial y fluvio-aluvial dominante en la secuencia sedimentaria del Jurásico Superior al Cretácico Inferior.

Las relaciones Fe_2O_3/K_2O y SiO_2/Al_2O_3 permitió la distinción litológica de la Fm. Chapiza de areniscas y arcosas de Hollín Inferior y arcosas y lutitas de AVF. En general, las concentraciones de Si, Th, Zr, W, Nb e Y se presentan con mayores proporciones en las areniscas de Hollín Inferior; mientras que el Sr afín con el Ca aumenta su proporción en las facies finas de la Fm. Chapiza. El alto Al, Ti y Rb explica la presencia de minerales de arcilla, en las facies finas de la Fm. Chapiza y AVF, y la alteración de componentes primarios en las areniscas de Hollín Inferior.

La variación de $MgO-Fe_2O_3-SiO_2/Al_2O_3$ clasifica a las muestras de la Fm. Chapiza, AVF y Hollín Inferior como sedimentos no-marinos, depositados bajo condiciones oxidantes, reafirmadas con los índices $Ni/Co < 5$ y $V/Cr < 2$, y particularmente con el empobrecimiento en U, V, Cu, Co, Mo, Zn y Ni en la Fm. Chapiza; condiciones típicamente de un clima seco ($Mg/Ca < 2.5$), contemporáneo con la actividad volcánica del arco Misahuallí.

La relación Zr/TiO_2 vs. Nb/Y determina que la fuente volcánica que aporta con sedimentos a la Formación Chapiza y los miembros AVF y Hollín Inferior es de composición intermedia-básica a intermedia-ácida. La tendencia a la meteorización aumenta en las facies de Hollín Inferior y disminuye en la Fm. Chapiza y AVF ($Th/U > 4$).

PALABRAS CLAVE: sedimentología, estratigrafía, geoquímica, facies, Chapiza, Hollín Inferior, Alluvial Valley Fill.

ABSTRACT

In this study, a macroscopic recognition of components in hand samples, the interpretation of mineral affinities determined in previous works, and X-ray fluorescence were carried out, with which 12 facies were recognized, sandy, conglomeratic, muddy-silty, volcanoclastic, and volcanic, distributed between the Chapiza Formation, and the Alluvial Valley Fill (AVF) and Lower Hollin members of the Hollin Formation, and which, correlated with their geochemical response, made it possible to determine the dominant fluvial and fluvio-alluvial depositional environment in the sedimentary sequence, from the Upper Jurassic to the Lower Cretaceous.

The $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios allowed the lithological distinction of the Fm. Chapiza from sandstones and arkoses from Lower Hollin and arkoses and shales from AVF. In general, the concentrations of Si, Th, Zr, W, Nb and Y are present in higher proportions in the Lower Hollin sandstones; while the Ca-related Sr increases its proportion in the fine-grained facies of the Fm. Chapiza. The high Al, Ti and Rb explains the presence of clay minerals in the fine-grained facies of the Fm. Chapiza and AVF, and the alteration of primary components in the Lower Hollin sandstones.

The variation of $\text{MgO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ classifies the samples of the Fm. Chapiza, AVF and Lower Hollin as non-marine sediments, deposited under oxidizing conditions, reaffirmed with the indices $\text{Ni}/\text{Co}<5$ and $\text{V}/\text{Cr}<2$, and particularly with the depletion in U, V, Cu, Co, Mo, Zn and Ni in the Fm. Chapiza; conditions typically of a dry climate ($\text{Mg}/\text{Ca}<2.5$), contemporary with the volcanic activity of the Misahualli arc.

The Zr/TiO_2 vs. Nb/Y determines that the volcanic source that contributes sediments to the Chapiza Formation, the AVF and Lower Hollin members is of intermediate-basic to intermediate-acid composition. The weathering tendency increases in the Lower Hollin facies and decreases in the Fm. Chapiza and AVF ($\text{Th}/\text{U}>4$).

KEY WORDS: sedimentology, stratigraphy, geochemistry, facies, Chapiza, Lower Hollin, Alluvial Valley Fill.

1 INTRODUCCIÓN

La Zona Subandina, es la zona de piedemonte de los Andes ecuatorianos y corresponde a un cinturón deformado y exhumado asociado al levantamiento de los Andes y forma parte de un sistema de cuenca de tipo foreland. En la Zona Subandina aflora la secuencia Jurásica y Cretácica de la Cuenca Oriente, aportando con información de las diferentes secuencias sedimentarias que en la parte oriental de la Cuenca Oriente se encuentran a gran profundidad. El enfoque de este estudio comprende el afloramiento que se ubica en la vía a Casa de Máquinas dentro del proyecto hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair, localizado precisamente en la Zona Subandina, y presenta la secuencia completa desde la base de la Fm. Chapiza hasta el tope de la Fm. Napo, centrando principal importancia en observar y caracterizar las diferentes litologías y geometrías de la Fm. Chapiza, y de la Fm. Hollín que se deposita en discordancia angular sobre la Fm. Chapiza. Ésta última se ha interpretado como una secuencia fluvio-aluvial, y el miembro Hollín Inferior como una secuencia fluvial, ambas de cuencas de trasarco.

Desde el punto de vista científico y económico, la Fm. Hollín es el reservorio de mayor importancia de petróleo in-situ, y refleja junto con la Fm. Chapiza cambios en el marco geodinámico durante el Jurásico Superior al Cretácico Inferior.

En vista de la actual campaña de exploración de las formaciones Chapiza y Hollín en zonas cercanas a este afloramiento, la identificación de la variabilidad de litofacies y por tanto la distribución de las mismas cobra mayor grado. Si bien el conocimiento de litofacies es de fundamental importancia para definir ambientes de depósitos; el análisis geoquímico ayuda a identificar cambios sutiles en condiciones de sedimentación como oxidación/reducción y cambios mineralógicos, que aportan con información para mejorar el control estratigráfico y lito geoquímico del Jurásico Superior y Cretácico Inferior de la secuencia sedimentaria de la Cuenca Oriente.

La geoquímica realizada en el presente proyecto mediante el método de Fluorescencia de Rayos X (XRF), constituye el fundamento del estudio lito geoquímico en los sedimentos permitiendo asociar cada litofacie y su respuesta geoquímica con el ambiente de depósito y sus procesos. Además, la implementación de nuevas tecnologías como XRF en el campo de la investigación y su integración con técnicas convencionales son destrezas necesarias en el mercado actual de trabajo, y que han sido empleadas en el presente estudio.

Desde el punto de vista científico este estudio logrará correlacionar la estratigrafía de los sedimentos de la Fm. Chapiza con su respuesta geoquímica, de tal forma, quedará definida y caracterizada de manera detallada los diferentes tipos de facies y su relación genética con

los diversos tipos de ambientes sedimentarios, de igual forma que el miembro inferior de la Fm. Hollín; y su aplicación será la de servir como estándar de correlación para análisis geoquímicos que se realizan con herramientas convencionales de medición geoquímica en pozos de la Cuenca Oriente.

1.1 Objetivo general

Integrar la información estratigráfica, sedimentológica y geoquímica de la Formación Chapiza y los miembros Alluvial Valley Fill (AVF) y Hollín Inferior de la Formación Hollín para correlacionar la estratigrafía de los sedimentos de ambas formaciones y su respuesta geoquímica, lo que servirá como referencia de la evolución estratigráfica y lito geoquímica del Jurásico Superior y Cretácico de la Cuenca Oriente. Esto permitirá ser estándar de correlación para análisis geoquímicos realizados con herramientas de medición geoquímica en pozos de la Cuenca Oriente de Ecuador

1.2 Objetivos específicos

1. Recolectar muestras de roca de la Formación Chapiza, Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill en el afloramiento en la vía a la casa de máquinas de la hidroeléctrica Coca-Codo Sinclair para análisis de fluorescencia de rayos X (XRF) para construir curvas de elementos geoquímicos y diagramas de discriminación de sedimentos.
2. Realizar una columna estratigráfica detallada de la Formación Chapiza, Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill en el afloramiento del corte Coca-Codo Sinclair.
3. Integrar los datos estratigráficos-sedimentológicos en la columna estratigráfica que será correlacionada con curvas de elementos geoquímicos para definir cambios en el ambiente de sedimentación de la Formación Chapiza y la sección Inferior de Hollín en la Zona Subandina de la Cuenca Oriente.

1.3 Alcance

El presente estudio tiene como fin contribuir con el conocimiento geológico en el área de estudio mediante la caracterización estratigráfica, sedimentológica y geoquímica de la Formación Chapiza y Hollín Inferior integrada dentro de una columna estratigráfica en el afloramiento en la vía a la casa de máquinas de la hidroeléctrica Coca-Codo Sinclair y definir con mayor certeza cambios en el ambiente de sedimentación de ambas Formaciones en la

Zona Subandina de la Cuenca Oriente.

La caracterización geológica de dichas formaciones en el área de estudio se basa en la síntesis de trabajos previos y la información recolectada de 114 muestras de roca para análisis de fluorescencia de rayos X (XRF). Con la ejecución del presente proyecto se pretende obtener lo siguiente:

- Levantamiento de la columna estratigráfica detallada de la Formación Chapiza y el miembro inferior de la Formación Hollín, en la vía a la casa de máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair.
- Base de datos de las mediciones de concentraciones de elementos químicos en los sedimentos mediante el método de XRF, obtenidas con el medidor Olympus Vanta.
- Curvas geoquímicas en relación con la elevación vertical, y diagramas de discriminación de sedimentos, para el análisis de afinidades mineralógicas elementales, fuente/proveniencia, ambiente depositacional, meteorización y paleorredox, en base a las concentraciones de elementos mayores y traza.

Los datos estratigráficos-sedimentológicos serán integrados en una columna estratigráfica detallada que correlacionará las curvas de los elementos geoquímicos para definir cambios en el ambiente de sedimentación de la Fm. Chapiza y los miembros Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill de la Fm. Hollín, puesto que, el conocimiento de litofacies permite definir ambiente de depósito, y así mismo, el análisis geoquímico ayuda a identificar cambios sutiles en condiciones de sedimentación y cambios mineralógicos que varían en función del ambiente de depósito.

1.4 Ubicación del área de estudio

La vía a la casa de máquinas de la hidroeléctrica Coca-Codo Sinclair, en la cual se desarrolla el presente estudio, se encuentra localizada al nororiente de la vertiente Este de la Cordillera Real, en el cantón Gonzalo Pizarro de la Provincia de Sucumbíos, que colinda con el cantón Chaco de la Provincia de Napo, en la Cuenca Oriente de Ecuador.

El área del afloramiento está delimitada al norte por el río Dué y el volcán El Reventador, al sur por los cerros Pan de Azúcar y Cerro Negro; al este por la Cordillera Huagraurco y, al Oeste por la Cordillera Real (Mariño, 2015).

El afloramiento en estudio expone desde la base de Chapiza (228357E / 9986298N; IIGE, 2020) hasta el contacto Hollín – Napo (227977E / 998681 N; Mariño, 2015), no obstante, la interpretación de las geometrías del presente estudio se realizó concretamente entre las

coordenadas 227942E / 9986435N y 228893E / 9986431N, que corresponden al tope de Hollín Inferior y la base de Chapiza Medio, respectivamente. El Miembro Chapiza Inferior se encuentra cubierto por abundante vegetación, lo que dificulta el acceso y por consiguiente la exposición de facies y geometrías de la secuencia completa de la Fm. Chapiza.

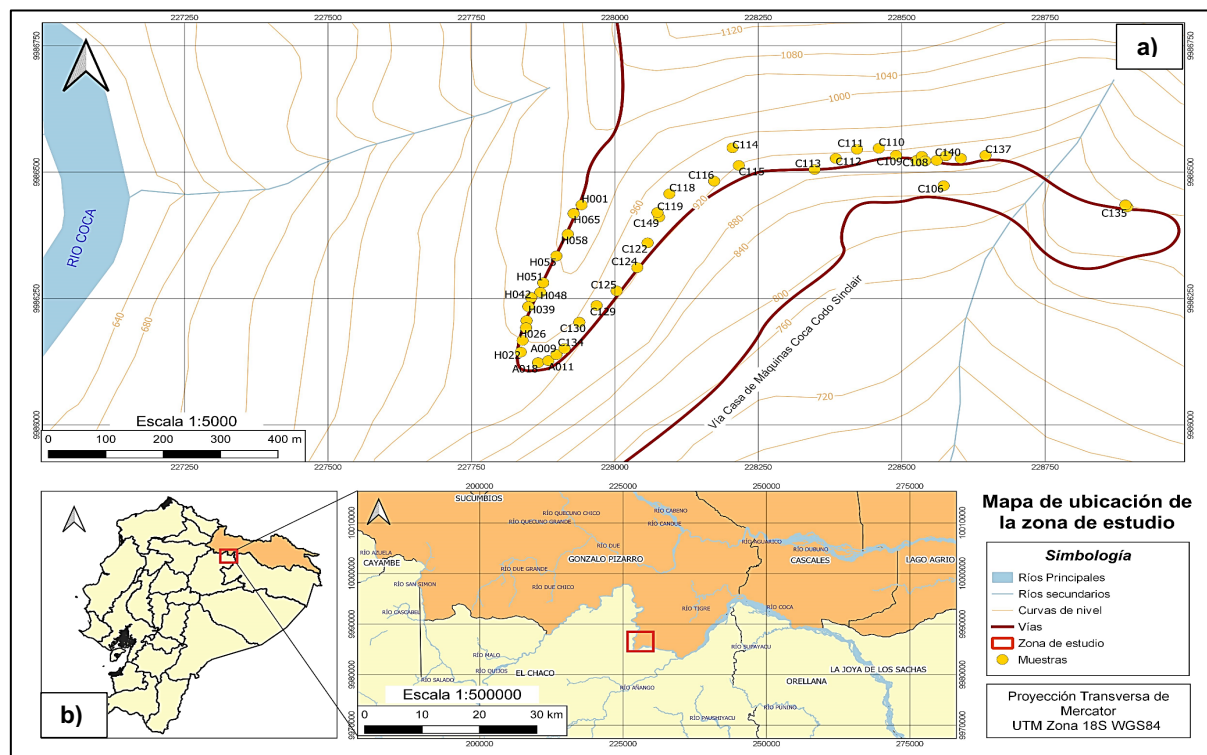


Fig. 1: Mapa de la ubicación de la zona de estudio. **a)** Mapa topográfico y localización de los puntos de muestreo. **b)** mapa cantonal de las provincias de Sucumbios y Napo.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Sedimentología

Es el estudio de los procesos de formación, transporte y depósito de material que se acumula como sedimento en ambientes continentales y marinos, y forman rocas sedimentarias.

1.5.1.1 Facies sedimentarias

Hacen referencia a cuerpos de roca con características específicas que reflejan las condiciones bajo las que se formaron (Reading y Levell, 1996). Se denominan **“litofacies”** cuando agrupan características físicas petrológicas: litología, textura, estructuras sedimentarias y contenido fósil, así como geométricas: espesor, geometría de los estratos y propiedades direccionales, que pueden ayudar a determinar los procesos de formación (Arche, 2010). Asociar litofacies implica también coleccionar atributos como la continuidad y forma de las unidades litológicas (Potter, 1959); este concepto involucra tanto relaciones verticales como laterales entre las facies, y es fundamental para reconstruir los procesos depositacionales específicos para definir el ambiente.

1.5.1.2 Estructuras sedimentarias

Referidas a la organización geométrica de los elementos que conforman el sedimento, y ayudan a realizar las interpretaciones paleoambientales. A continuación, se detallan las estructuras relacionadas al área de estudio, divididas en tres categorías (Arche, 2010):

1.5.1.2.1 Estructuras pre-sedimentarias

Se forman en el basamento antes de que se depositen los sedimentos, son siempre erosivas.

Canales. Están asociados a transporte de sedimentos por periodos de tiempo largos, debido a que son macroestructuras que pueden ir desde metros a kilómetros. La mayoría de ellos están rellenos de areniscas con estratificación cruzada y sus rellenos pueden formar cuerpos elongados de sedimentos, que comúnmente, muestran cambios ascendentes en el tamaño de grano, como en los valles incisos que gradualmente se van rellendo con un relativo aumento del mar. La presencia de los canales se da en ambientes fluvial, deltaico, submareal somero, intermareal y abanico submarino (Tucker, 2003).



Fig. 2: Ejemplo de relleno de canal fluvial con arena gruesa, cortando areniscas finas y lodolitas, Sudáfrica (Tucker, 2003).

1.5.1.2.2 Estructuras sin-sedimentarias

Se forman al mismo tiempo de la depositación. Dan información sobre la velocidad de la corriente que las originó, pero escasa sobre el medio en que se formaron (Arche, 2010).

Estratificación y laminación. Se producen por los cambios de patrones en la sedimentación, como tamaño de grano, color, o composición mineralógica. Las capas >1cm se definen como “estratos”; mientras que, son llamadas “láminas” si son <1 cm. Usualmente, la laminación se forma por suspensión o corrientes turbidíticas de baja densidad y ocurre en litologías de grano fino; también puede ocurrir por precipitación periódica de minerales como la calcita, halita, yeso (Tucker, 2003).

Las superficies de estratificación varían en forma y continuidad, y se pueden reconocer límites planos, curvos, ondulados, paralelos, transversales, o discontinuos (Tucker, 2003).

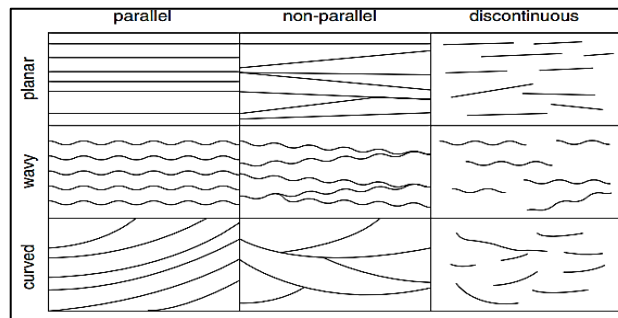


Fig. 3: Diferentes tipos de estratificación y laminación (Tucker, 2003).

Estratificación cruzada. Es una estructura sedimentaria interna, comúnmente se encuentra en sedimentos del tamaño de arena y gruesos. Presenta un ángulo orientado a la dirección principal de la estratificación; la forma de los estratos cruzados refleja la dirección de la pendiente y dependen de las características del flujo, profundidad del agua y tamaño del grano (Tucker, 2003).

La estratificación cruzada se forma como resultado de la depositación durante la migración de ripples en areniscas, también puede ocurrir por el relleno de los surcos erosionales, el crecimiento de pequeños deltas, la migración de sedimentos en un canal, en conglomerados en ríos trenzados y la depositación en el foreshore de una playa (Tucker, 2003).

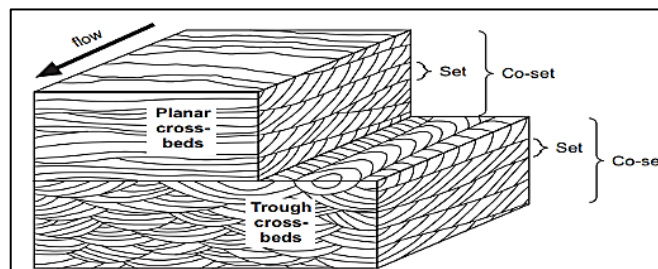


Fig. 4: Tipos de estratificación cruzada (Nichols, 2009).

Ripples. Ocurren en las superficies de los estratos, se producen por diferentes mecanismos:

- **Ripples formados por olas:** Se forman en sedimentos no cohesivos, especialmente limos y arena gruesa. Típicamente su forma es simétrica, su cresta es recta y la longitud de la onda es controlada por el tamaño de grano y la profundidad del agua; mientras más grande el grano y más profunda es el agua, los ripples son más largos (Tucker, 2003).
- **Ripples de corriente:** son producidos por una corriente unidireccional, por lo que son asimétricos, con un lado cortado abruptamente y el otro lado ligeramente deformado, con crestas rectas. Se forman en sedimentos con tamaños de grano menores a 0.6mm, y en casi todos los ambientes, ríos, deltas, líneas de costa y aguas profundas (Tucker, 2003).
- **Ripples de viento:** son estructuras asimétricas, tienen crestas largas, rectas y paralelas con bifurcaciones (Tucker, 2003).

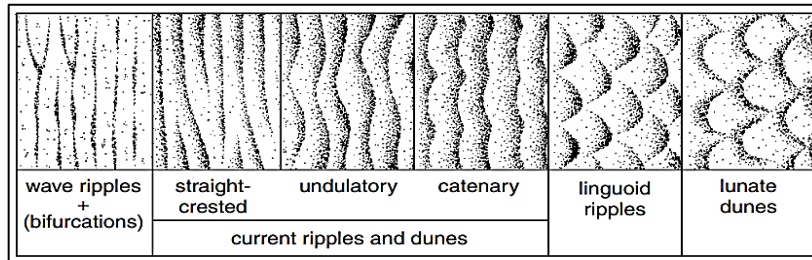


Fig. 5: Tipos de ripples y dunas (Tucker, 2003).

Gradación. Indica cambios en el tamaño de grano desde el fondo hasta tope superior. Se observan sin dificultad en conglomerados y en areniscas (Tucker, 2003).

- **Gradación normal**, consiste en partículas más gruesas en la base y las más finas en el tope. Usualmente resulta de la depositación de flujos en declive, ya que el flujo desacelera las partículas más grandes que son depositadas primero y después las más finas. Es típica de corrientes turbidíticas y tormentosas (Tucker, 2003).
- **Gradación inversa**, el tamaño de grano incrementa hacia el techo del estrato. Surge de un incremento en la fuerza del flujo durante la sedimentación, pero es más común por la dispersión de granos y los efectos de flotabilidad. Comúnmente ocurre en los depósitos de gran concentración de mezclas agua-sedimentos, al igual que en los depósitos con estratificación cruzada por avalancha y flujo de arenas, y también en las partes más bajas del flujo gravitacional (Tucker, 2003).

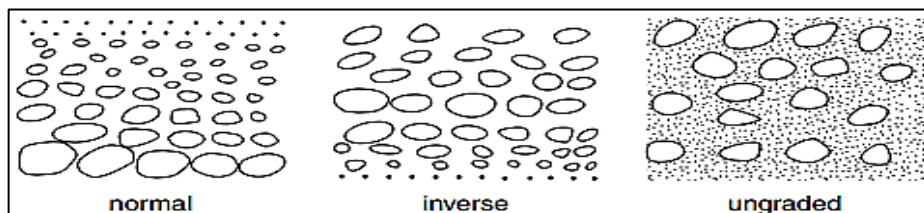


Fig. 6: Diferentes tipos de gradación (Tucker, 2003).

Imbricación. En su mayoría, los cantos o granos de formas planas o alargadas se disponen de forma imbricada cuando son transportados por una corriente unidireccional. Se disponen en forma inclinada en dirección contraria a la corriente.

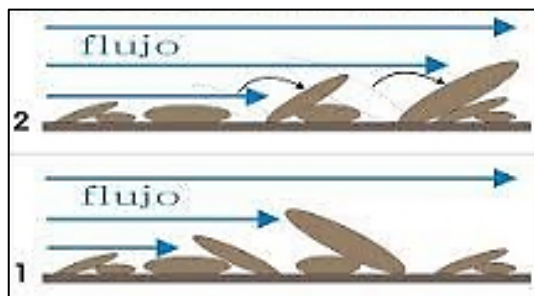


Fig. 7: Imbricación de clastos y dirección de la corriente (Navarrete, 2017).

1.5.1.2.3 Estructuras post-sedimentarias

Se forman cuando los sedimentos que ya han sido depositados aún están sueltos o poco consolidados.

Estructuras de carga. Se forman por el hundimiento diferencial entre un estrato en otro; son comunes en el piso de las capas de areniscas que están sobreyaciendo lodo; ocurren como bulbos, sin ninguna orientación preferente, para formar estructuras de llama, o ball and pillow (Tucker, 2003).

1.5.1.3 Ambientes Sedimentarios análogos al área de estudio

1.5.1.3.1 Ambiente fluvial

Los ríos son sistemas de transferencia que recogen y transportan sedimentos hasta grandes cuencas. La principal clasificación de los sistemas fluviales se basa en la geometría del canal, y mide parámetros físicos para determinar la cualidad del canal: número de canales, grado de sinuosidad, e índice de entrelazamiento (Miall, 1996), de acuerdo con lo que se clasifican en rectos, meándricos, anastomosados y trenzados.

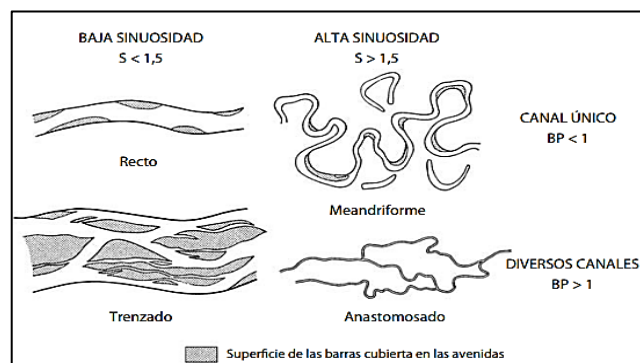


Fig.8: Principales tipos de ríos (Miall, 1996)

- **Rectos**, tienen un único canal, no hay barras y son de baja sinuosidad. Son de alta cantidad de agua, velocidad muy baja, gran ancho y profundidad.
- **Meándricos**, con un canal sinuoso. Producen un ambiente dentro del río bien diferenciado: en el exterior de las curvas la velocidad es alta, y en el interior es baja.
- **Anastomosados**, caracterizados por presentar varios canales sinuosos que se dividen y juntan a lo largo del río.
- **Trenzados o braided**, presenta múltiples canales de baja sinuosidad y barras en torno a las cuales el flujo se reúne y se bifurca alternativamente.

Algunos de los elementos más destacados en los sistemas fluviales son:

Canales. Son depresiones alargadas con márgenes concretos y con una base normalmente cóncava, a través de la cual fluyen agua y sedimentos, y en la que pueden depositarse

sedimentos formando cuerpos comúnmente alargados. Los depósitos de canal varían de metros a kilómetros, y su principal característica distintiva es su movilidad (Fig. 8, 10) (Bridge, 1993).

Barras. Depósitos alargados que separan las corrientes de agua de los canales en aguas poco profundas. Por su posición dentro del canal y su morfología, comúnmente son barras:

- **Longitudinales**, se forman en la parte media de los canales cuando los sedimentos más gruesos incluidos en la corriente son depositados debido a la pérdida de competencia en el transporte, orientándose con el eje principal paralelo a la dirección de la corriente. La fracción gruesa del material se concentra a lo largo del eje principal y en la parte basal de la barra, tendiendo a existir una disminución en el tamaño del grano hacia arriba de la misma. Su estructura interna principalmente es masiva, aunque pueden presentarse capas con una estratificación horizontal pobremente desarrollada.
- **Laterales**, son muy largas que se desarrollan en áreas de energía relativamente baja a lo largo de las porciones laterales de la corriente principal.

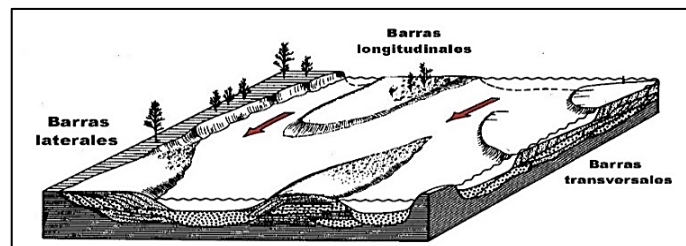


Fig. 9: Tipos de barras en un sistema fluvial (Arche, 2010)

Valles. Son hendiduras del terreno producidas por la excavación de ríos y están limitadas por dos laderas o vertientes. Por lo general, se van haciendo más suaves a medida que el valle se ensancha, y comúnmente son rellenados con material aluvial (Fig. 11).

Crevasse splay. Indican que el río ha roto su barrera natural y se ha desbordado. Aunque no presentan mucha continuidad, corresponden a depósitos progradacionales identificados por la facies de arenas bioturbadas, lodosas, y con relictos de estratificación cruzada (Madero et al., 2010)

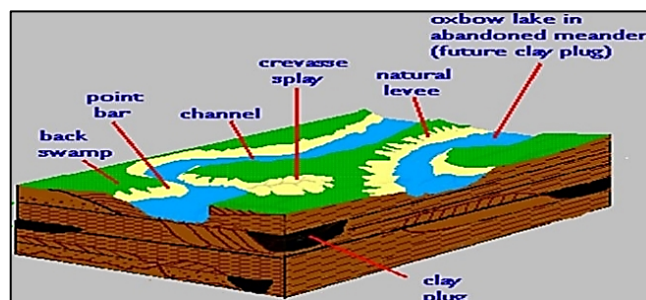


Fig. 10: Elementos relacionados al sistema fluvial (Tomada de <https://slideplayer.es/slide/10990198/>)

1.5.1.3.2 Ambiente aluvial

Planicie aluvial. Relieve en gran parte plano creado por la deposición de sedimentos durante un largo período de tiempo por uno o más ríos provenientes de las regiones montañosas, a partir de las cuales se forma el suelo aluvial (Fig. 11). Son el área más pequeña sobre la cual los ríos se inundan en un período de tiempo determinado (National Cooperative Soil Survey, 2016).

Abanico aluvial. Se forma por la masa de sedimento depositada en algún punto a lo largo de un arroyo (Fig. 11) en el que hay una fuerte disminución en el gradiente (Allaby, 2013). La energía del movimiento del sedimento proviene de la gravitación; el agua solamente disminuye la fricción y facilita el deslizamiento (Griem, 2020).

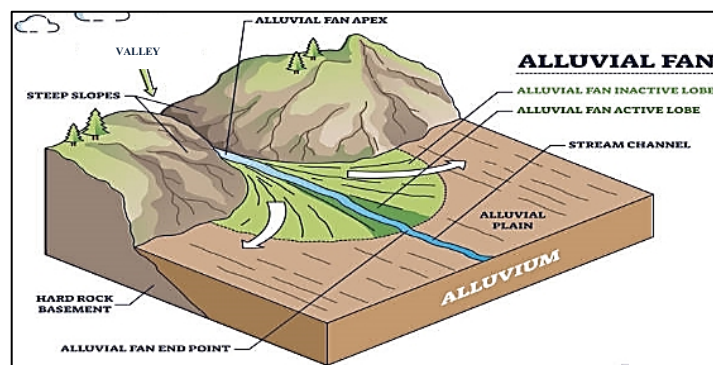


Fig. 11: Sistema aluvial (Tomada de <https://geolodiaavila.com/2020/03/21/el-abanico-aluvial-de-candeleda-la-huella-de-una-montana-vaciada/>)

1.5.2 Estratigrafía

Es el estudio e interpretación de las rocas sedimentarias y estatificadas, y de la identificación, descripción, secuencia, tanto vertical como horizontal, cartografía y correlación de las unidades estratigráficas de rocas (Weller, 1960), tiene tres objetivos principales:

- **Identificación de estratos y establecimiento de la serie estratigráfica local**, incluye la descripción de caracteres esenciales, como: espesor, composición litológica, textura, estructuras, contenido paleontológico, etc; y la ordenación temporal de estos caracteres en estratos permite obtener la serie estratigráfica local.
- **Correlación entre las diferentes series estratigráficas**, consiste en comparar las series locales entre sí para obtener la serie estratigráfica general de una región estudiada.
- **Interpretación estratigráfica**, consiste en estudiar los cambios sucesivos de la cuenca en el tiempo, en base a los datos obtenidos de los dos primeros objetivos (Paleogeografía)

1.5.2.1 Variables geológicas de la Estratigrafía

Navarrete (2017) detalla que las variables fundamentales de la Geología Estratigráfica son:

- **Tiempo geológico**, comienza con las primeras formaciones estratigráficas, cuyo estudio

corresponde a la Geocronología.

- **Espacio**, es esencialmente geográfico y nos indica la posición donde se ha desarrollado un proceso geológico.
- **Suceso**, es el representante de un fenómeno geológico que queda registrado en las rocas estratificadas, mediante características especiales que actúan como indicadores

1.5.2.2 Columna estratigráfica

Es una representación vertical de la superposición de distintos fenómenos físicos que se han producido a lo largo de la formación de la Tierra, los cuales, a lo largo del tiempo geológico, depositan las capas de sedimentos más antiguas en la parte inferior y las más recientes en la parte superior (Navarrete, 2017). Los parámetros sedimentológicos necesarios para su construcción son: Litología, color, granulometría, textura, sorteo, naturaleza de los clastos, estructuras sedimentarias, forma, superficies erosivas, paleocorrientes y contenido fósil.

1.5.2.3 Estratigrafía secuencial

Es una técnica que establece las relaciones entre la sedimentología y el análisis estratigráfico convencional (Marocco, 2009), y permite la reconstrucción paleogeográfica y la predicción de facies y litologías, mediante el análisis de las características depositacionales: cambios en los patrones de estratificación, variaciones en la fuente de sedimentos a través del tiempo, y el espacio disponible para la sedimentación (Catuneanu et al., 2011). Éste último, se forma con las fluctuaciones del nivel de base, debido a: eustatismo, tectónica, clima, diagénesis, compactación de los sedimentos, y energía de las olas (Marocco, 2009).

1.5.2.3.1 Cambios del nivel base

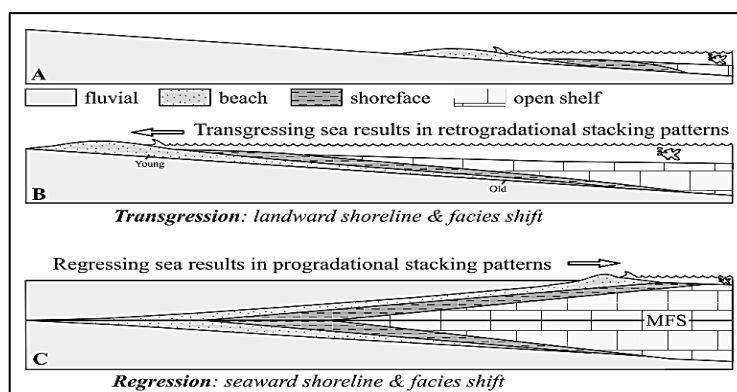


Fig. 12: Transgresiones y regresiones. La superficie que las separa la retrogradación de la progradación es la superficie máxima de inundación (MFS) (Catuneanu et al., 2011).

Transgresión. Es un acontecimiento geológico en el que nivel del mar aumenta en relación con la Tierra y existe la migración de la línea de costa hacia el continente, lo que provoca un movimiento o avance de las facies distales hacia el continente, también conocido como retrogradación (Marocco, 2009).

Regresión. Es el suceso geológico en el que el nivel del mar se retira de los continentes, es decir, se da la migración de la línea de costa hacia el mar, lo que provoca un movimiento o avance de las facies proximales en dirección hacia el mar y expone el fondo marino, definido como progradación (Marocco, 2009).

1.5.3 Geoquímica

Hace referencia al estudio de la distribución, proporción y asociación de los elementos químicos de la corteza terrestre y de las leyes que las condicionan (Allaby, 2013). Los datos geoquímicos convencionalmente son subdivididos en cuatro categorías (Rollinson, 1993):

- **Elementos mayores,** predominan en los análisis de roca y su concentración habitualmente está expresada como porcentaje en peso (wt%) de óxido.
- **Elementos traza,** presentan menos del 0.1% en la roca y sus concentraciones son expresadas en partes por millón (ppm) o incluso partes por billón (ppb).
- **Isótopos radiogénicos,** incluye aquellos isótopos con decaimiento espontáneo debido a su radiactividad natural.
- **Isótopos estables,** son nucleidos que no experimentan de forma espontánea decaimiento radiactivo.

1.5.3.1 Fluorescencia de Rayos X (XRF)

Es un método analítico en geoquímica utilizado con frecuencia para determinar la composición elemental de muestras de rocas, sedimentos y otros materiales terrestres (Weindorf et al., 2014). Esta técnica se utiliza en la determinación de concentraciones geoquímicas para un rango de elementos mayores y traza. La mayor limitación es que los elementos más ligeros que Na (número atómico=11) no pueden ser analizados.

1.5.3.1.1 Principio de XRF

La espectrometría XRF se basa en el principio de dispersión de longitud de onda, que establece que los átomos emiten fotones de rayos X de energía o característica de longitud de onda que se puede estimar (Weltje y Tjallingii, 2008). En XRF, la muestra se bombardea con un haz de rayos X de alta energía, lo que lleva a la ionización de los átomos que la componen y al desprendimiento de un electrón de la capa interna. El agujero de electrones resultante en la capa interna se llena con un electrón de la capa externa acompañado de la liberación de energía en forma de fotón. La radiación emitida tiene una energía menor que la radiación absorbida y se denomina '*fluorescencia*'. La radiación emitida refleja la diferencia de energía entre las dos capas involucradas. Como estas transiciones ocurren en energías

discretas únicas para un elemento específico y su entorno local, la fluorescencia característica emitida se puede utilizar para determinar los elementos en una muestra y su concentración. Por lo tanto, el análisis XRF puede determinar la composición elemental/química de una muestra, pero no logra diferenciar compuestos sólidos como la Difracción de Rayos X (XRD).

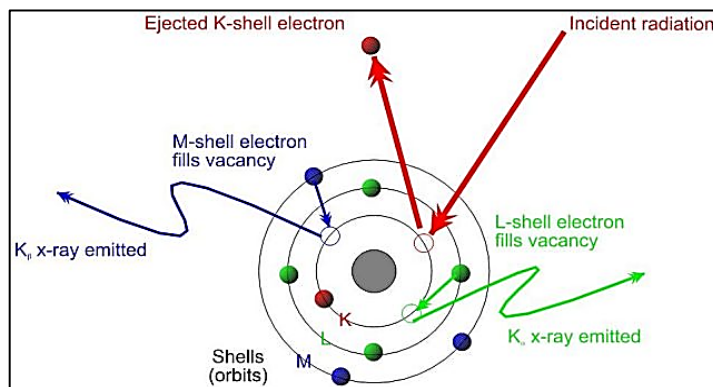


Fig. 13: Esquema de la teoría de XFR (Tomada de <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/elemental-analyzers/handheld-xrf-spectrometers/how-xrf-works.html>)

1.5.3.2 Lito-geoquímica

Es la determinación de la composición química de rocas con el objetivo de detectar patrones de distribución de elementos químicos (Govett y Nichol, 1979). Esta técnica permite la identificación de facies y funciona como una herramienta muy poderosa en petrología, quimio-estratigrafía y exploración de minerales.

1.5.3.2.1 Quimio-estratigrafía

Es la aplicación de la geoquímica de elementos principales y traza para la caracterización y subdivisión de secuencias sedimentarias en unidades geoquímicamente distintas y la correlación de estratos en cuencas sedimentarias (Pearce et al., 1993), utilizando variaciones sutiles en la composición elemental de los sedimentos. La técnica se basa en que incluso los sedimentos aparentemente homogéneos muestran cambios en su composición química, por factores como: procedencia (tipo de roca), meteorización/erosión (clima), transporte (energía; agua/viento), mezcla (diferentes fuentes), almacenamiento temporal (meteorización), deposición (ambiente), diagénesis (profundidad de enterramiento; temperatura, presión, fluidos), y posible levantamiento y repetición del ciclo sedimentario (Craigie, 2018).

1.5.3.2.2 Uso de datos de elementos mayores

Los elementos que tradicionalmente se presentan como óxidos en un análisis químico de elementos mayores: Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K y P, ayudan a comprender la génesis y la evolución de los principales tipos de roca; se hace uso de estos 10 elementos en la clasificación de rocas, en la construcción de diagramas de variación, y en la comparación con composiciones de rocas determinadas (Rollinson, 1993).

1.5.3.2.3 Uso de datos de elementos traza

Estos elementos son más sensibles a los procesos geoquímicos que los elementos mayores y, por lo tanto, son mejores para discriminar entre procesos petrológicos. Cragie (2018) describe algunas consideraciones respecto al uso de datos de estos elementos:

- Son indicadores de tamaño de grano Si, Al, y Ti. El Si se concentra en cuarzo, mientras que Al está concentrado en minerales de arcilla, al igual que Ti, que normalmente se encuentra en minerales pesados con afinidad por arcillas, silt y fracciones finas.
- Los principales indicadores de minerales arcillosos son: Th, LREE, Al, V, Mg, Fe, Mn, Na, Sr, Sc, Cs, Ga, K, Rb.
- Los indicadores de procedencia de los sedimentos son los que presentan afinidades con minerales pesados y son altamente inmóviles, pues no se ven fuertemente afectados por meteorización y diagénesis post-depositacional, como son: Zr, Hf, Nb, Ta, Ti, Y, Cr, Th, HREE. Éstos tienen concentraciones muy bajas en el agua de mar y río, y tiempos de residencia bajos en el océano. De este modo, representan el componente terrígeno del sedimento y reflejan la química de su fuente.
- Los principales indicadores paleorredox son U, P, Mo, Cu, Co, Ni, Zn, V.
- Los indicadores de minerales carbonatados básicamente son: Ca, Mg, Sr
- Los elementos inmóviles como Zr, Hf y Sn pueden distribuirse mecánicamente según el tamaño de grano y controlarse mediante la concentración de minerales pesados.
- Los elementos más solubles incluyen Fe, Mn, Pb y, a veces, Cr, y pueden ser móviles durante la diagénesis.
- Durante la meteorización, los elementos Cs, Rb y Ba se fijan, pero Sr puede lixivarse.
- En los sedimentos químicos, es más probable que las concentraciones de elementos traza reflejen la composición del agua de la que se precipitaron: agua de mar, agua intersticial o fluidos hidrotermales.

1.5.3.2.4 Ratios utilizados para análisis geoquímico

Tabla 1: principales ratios de elementos y su función dentro del análisis geoquímico (Craige, 2018)

Ratios	Usos
Si/Al; Ti/Al	Tamaño de grano
Zr/Nb; Zr/Hf; Zr/Ti; Zr/Y; Zr/Ta; Zr/Yb; Zr/Th; Nb/Ti; Nb/Y; Nb/Ta; Nb/Yb; Nb/Th; Ti/Y; Ti/Ta; Ti/Yb; Ti/Th; Y/Ta; Y/Yb; Y/Th; Ta/Yb; Ta/Th; Yb/Th	Fuente/proveniencia
Zr/P; Ti/P; Ta/P; Y/P; Yb/P; Th/P; P/U; Zr/U; Ti/U; Ta/U; Y/U; Yb/U; Th/U; Gd/Zr; Gd/Ti; Gd/Y; Gd/Ta; Gd/Yb; Gd/Th; Gd/U; Gd/P; Na/K; Na/Sc; K/Sc	Proveniencia, ambiente depositacional y/o meteorización/diagénesis
Mn/Al; Mo/Al; Cu/Al; Ni/Al; Co/Al; Zn/Al; P/Al; U/Al; U/Th; Ni/Co	Paleorredox y abundancia de materia orgánica
Mg/Ca	Proporción de Dolomita vs. Calcita Condiciones de Humedad

1.6 Marco Geológico

1.6.1 Geología Regional

El Ecuador está comprendido por tres regiones morfoestructurales: la planicie Costera al Oeste, la región andina en el Centro, y la Cuenca Oriente al este. Cada región corresponde a las denominadas zonas de antearco, arco volcánico y trasarco, respectivamente, puesto que están relacionadas con un modelo de zonas de subducción que involucra la Placa oceánica de Nazca que subduce bajo la placa continental Sudamericana desde el Jurásico; dentro de este escenario subduce también el Carnegie Ridge, que además ha influenciado a la migración hacia el NE del Bloque Norandino a lo largo de un fallamiento dextral (Gutscher et al., 1999 ; Trenkamp et al., 2002; Witt y Burgois, 2009; Alvarado, 2012).

La planicie costera se ha reconocido como terrenos alóctonos de procedencia oceánica (Goossens y Rose, 1973; Juteau et al., 1977; Lebrat et al., 1987; Kerr et al., 2002) que han sido acrecionados en el Cretácico Tardío al margen continental (Luzieux et al., 2006; Vallejo et al., 2006). Sobre este basamento oceánico se ha desarrollado la cuenca de antearco con un relleno sedimentario del Neógeno y Cuaternario (Luzieux et al., 2006).

La región andina, se encuentra conformada por las Cordilleras Real y Occidental, separadas entre sí por el Valle Interandino al Norte y las cuencas sedimentarias neógenas al Sur. La Cordillera Real, está formada por un basamento de rocas metamorfizadas de origen oceánico y continental, los metasedimentos probablemente del Paleozoico son afectados por granitoides tipo S del Triásico y conjuntos volcano-magmáticos y volcano-sedimentarios marinos y continentales del Jurásico (Litherland y Aspden, 1992). La Cordillera Occidental presenta un basamento de terrenos acrecionados, con litología y edad similares a la Costa (Vallejo et al., 2019). La zona andina se encuentra cubierta por material volcánico del Oligoceno al Presente.

La Cuenca Oriente por otro lado, es parte del sistema de cuencas antepaís Marañón-Oriente-Putumayo y la provincia petrolera conocida como “MOP”, que se desarrolla desde el sur de Colombia hasta el norte de Perú (Baby et al., 2013), entre la faja plegada situada al Oeste y el cratón Guayano-Brasileño al Este (Vallejo et al., 2021).

La cuenca de antepaís se desarrolla como resultado de esfuerzos transpresivos, presentes a partir del Cretácico Tardío, que provocan la emersión de la Cordillera Real y la generación de la subsidencia flexural en el trasarco (Baby et al., 2013). Está deformada por una tectónica de piel gruesa, ligada a la inversión de antiguas fallas extensionales del pre-Aptiense que llevaron a la formación de diferentes cuencas repartidas en el cratón; siendo preservadas por debajo de la discordancia angular a la base de la Fm. Hollín (Baby et al., 2013). Estas fallas

actualmente inversas han dividido a la Cuenca Oriente en tres dominios tectónicos.

1.6.2 Evolución Tectónica Regional

Rivadeneira y Baby (1999) dividen a la Cuenca Oriente en tres dominios estructurales que se separan por fallas de basamento NNE-SSO. Estos dominios se diferencian por características geométricas y cinemáticas, producto de la dinámica pre-cretácica.

- **Corredor Subandino o Dominio Occidental:** constituye la parte aflorante de la Cuenca Oriente, en donde se observan fallas inversas de bajo a alto ángulo, producto de una tectónica transpresiva con movimientos dextrales. Debido a que lahares cuaternarios se encuentran levantados, se sabe que este dominio se levantó y deformó durante el Plioceno y Cuaternario (Rivadeneira y Baby, 1999). Se distinguen tres principales zonas morfo-estructurales: *Levantamiento Napo*, *Depresión Pastaza* y *Levantamiento Cutucú*.
- **Corredor Sacha-Shushufindi o Dominio Central:** se forma como producto de la inversión al final del Cretácico, de una serie de semi-grabens y grabens del Triásico Superior-Jurásico (Ramírez, 2007). Las estructuras de este dominio se orientan de N-S a NNE-SSW, se verticalizan en profundidad y pueden evolucionar hacia la superficie en estructuras en flor (Barragán et al., 1997).
- **Corredor Capirón – Tiputini o Dominio Oriental:** se caracteriza por estructuras oblicuas en “echelón”, con fallas verticales en superficie, que expresan una tectónica transpresiva dextral. Resulta de la inversión tectónica de semi-grabens Pre-Cretácicos, limitados por fallas lítricas, lo que provocó un levantamiento importante de la parte este de la cuenca durante el Eoceno, ya que estructuras de esta edad están erosionadas y selladas por la base de la Fm. Tiyuyacu Superior (Baby et al., 1998).

1.6.3 Estratigrafía de la Cuenca Oriente

Las primeras fases de evolución de la Cuenca Oriente están registradas en su basamento cristalino y/o metamórfico relacionado al escudo Guayanés, sobre el cual se depositó la sección Pre-Cretácica conformada por los ciclos tectono-sedimentarios de Pumbuiza, Macuma, Santiago/Sacha y Chapiza/Yaupi/Misahualí (Díaz et al., 2004), sobre esta sección se encuentra la secuencia Cretácica constituida por las formaciones Hollín, Napo y Tena Basal, asociadas a variaciones eustáticas (Yépez, 2020). Una vez que la Cuenca Oriente se ubicó en posición de cuenca de antepaís de trasarco, se depositó la sección de sedimentos paleógenos y neógenos (Christophoul et al., 2004).

A continuación, se realiza una síntesis de la geología de la secuencia del Jurásico Superior al Cretácico Tardío de la Cuenca Oriente, enmarcada dentro del enfoque del presente estudio.

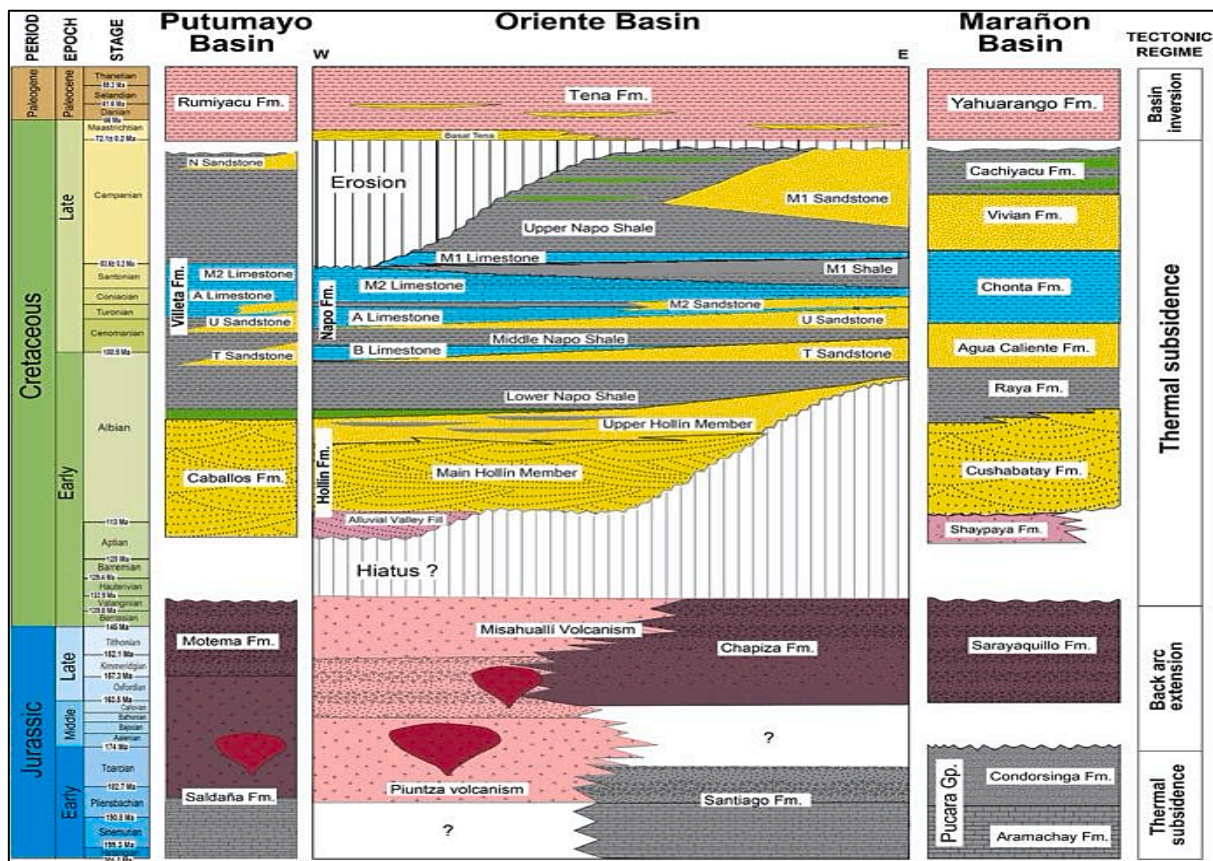


Fig. 14: Estratigrafía regional de las cuencas Oriente, Putumayo y Marañón (Vallejo et al., 2021)

Formación Chapiza (Jurásico Superior – Cretácico Inferior; Vallejo et al., 2021)

El afloramiento tipo se encuentra entre los ríos Chapiza y Yaupi, en el flanco oriental de la Cordillera de Cutucú (Goldschmid, 1941). Consiste en una sucesión de sedimentos clásticos continentales rojos de clima seco (red beds) con pequeñas incursiones marinas locales (Díaz et al., 2004). En esta formación se diferencian litológicamente tres miembros (Tschopp, 1953):

- **Miembro Inferior**, consiste en alternancias de limolitas y areniscas, multicolores con intercalaciones de yeso y anhidrita.
- **Miembro Medio**, incluyen limolitas, areniscas y conglomerados de color rojo sin intercalaciones de evaporitas.
- **Miembro Superior**, se describen limolitas, areniscas y conglomerados de color rojo, areniscas feldespáticas, intercaladas con rocas piroclásticas, tobas grises, verdes y violetas, areniscas tobáceas, brechas de toba y niveles de lava. Las facies piroclásticas están presentes en el norte del levantamiento Cutucú, y fueron mencionadas inicialmente por Wasson y Sinclair (1927) como "tobas y basaltos Misahuallí" debido a su aparición en el río Misahuallí, que se une al río Napo a unos 15 km aguas abajo del pueblo de Napo. Por esta razón los piroclastos de Chapiza Superior ya no se consideraban únicamente como facies, sino que el término "Misahuallí" posteriormente se utilizó para referirse a la

subdivisión superior de la Fm. Chapiza (Tschopp, 1953; Rivadeneira y Sánchez, 1989; Litherland et al., 1994). Jaillard et al. (1997) en su lugar define al Miembro Chapiza Superior como Formación Yaupi.

El espesor de la Fm. Chapiza está comprendido entre 600 y 4500 m (Rivadeneira et al., 2004), y tiene una edad del Jurásico Superior de acuerdo con lo obtenido en la palinoflora de la Fm. Chapiza por Ordóñez et al. (2006). Esta edad también es consistente con el período Medio a Superior de edad Jurásica para la Fm. Chapiza propuesta por Tschopp (1953), deducida por su posición estratigráfica relativa entre la Fm. Santiago del Liásico y Hollín de Cretácico Inferior. Tschopp (1953) menciona que no existen indicios de vulcanismo comparable al de Misahuallí en el Cretácico Inferior al este de los Andes, ni en Colombia ni en Perú; esto y el gran intervalo erosivo previo a la superposición de Hollín apoyan su idea de que toda la Fm. Chapiza pertenece al Jurásico y no se extiende hacia el Cretácico Inferior.

El ambiente de depositación de la Fm. Chapiza es discutido, para Christophoul et al. (1998), los Miembros Inferior y Medio se encuentran depositados en un ambiente continental de tipo fluvial y lacustre; mientras que, el Miembro Superior en un ambiente continental, pero con sedimentos volcanoclásticos y es contemporáneo al arco volcánico Misahuallí (Díaz et al. 2004). Por otro lado, para Ordóñez et al. (2006) el ambiente para el Miembro Inferior es marino somero restringido, posiblemente de lagoon no mayor a 20 metros de profundidad, desarrollado en aguas de temperaturas tropicales a subtropicales, de baja energía. Mientras que, el Miembro Medio sería marino marginal a transicional; y el Miembro Superior es de un ambiente continental.

La Fm. Chapiza se encuentra sobreyaciendo en discordancia angular, a la Fm. Santiago (Tschopp, 1953), y subyacen por la Fm. Hollín en discordancia angular y erosiva (Baby et al., 1998).

Miembro Misahuallí de la Formación Chapiza (Liásico Tardío – Jurásico Temprano; Litherland y Aspden, 1992)

Su afloramiento se restringe a la Zona Subandina, y es un equivalente lateral del miembro superior de la Fm. Chapiza (Tschopp, 1953) y pertenecen al mismo ciclo tectono-sedimentario, controlado por el arco volcánico Jurásico que se extiende desde Colombia hasta Perú (Baby et al., 1998).

El Miembro Misahuallí está conformado por acumulaciones volcánicas masivas y gruesas: coladas de lava basáltica a riolítica y depósitos piroclásticos como ignimbritas y tobas, así como dacitas, riolitas, areniscas volcanoclásticas y brechas volcánicas. Y tiene una potencia de 1000 a 3000 m.

Formación Hollín (Aptiano Superior – Albiano Temprano; Barragán et al., 2004)

Aflora ampliamente en la Zona Subandina, y es dividida en los siguientes Miembros:

- **Alluvial valley Fill (AVF):** White et al. (2005) y Vallejo et al. (2021) resalta los cambios a la base de Hollín, indicando la presencia del miembro Alluvial Valley Fill a la base de la Formación Hollín que al noroeste de la Cuenca Oriente, en la carretera Coca-Codo afloran aproximadamente 20 m de lutitas laminadas de color rojizo a verdoso que se intercala con capas de areniscas arcósicas de grano medio a grueso. Las areniscas arcósicas pueden ser conglomerados e incluyen abundante veta de cuarzo, y estratificación cruzada; mientras que, en el sur de la cuenca, al norte de la aldea El Panguí, este Miembro llena una superficie de erosión directamente en la parte superior del batolito de Zamora. Los depósitos del AVF se interpretan como canal fluvial de areniscas y lutitas de llanura de inundación en un paleovalle (White et al., 1995).
- **Hollín Inferior o Principal:** consiste de una secuencia fluvial de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, poco cementadas (Barragán et al., 2004) que corresponde a depósitos de ríos trenzados progradantes (White et al., 1995).
- **Hollín Superior o Secundario:** consiste en una secuencia arenosa que en la parte inferior es de tipo clástico, de playa-deltáico-estuarino, y en la superior son depósitos de plataforma marina somera con la presencia de abundante glauconita (Jaillard, 1997). Contiene fósiles de bivalvos, y se evidencia su proximidad con el continente debido a la presencia de arena y la ocurrencia de retrabajamientos, mientras que, la disminución hacia el tope muestra que la influencia continental decrece, lo que sugiere una clara transgresión (Baby et al., 2004).

Formación Napo (Albiano Medio – Campaniano Medio; Barragán et al., 2004)

La transición de Hollín Superior a Napo es rápida y concordante, pues esta última se considera netamente marina. Consiste en una secuencia cíclica marina somera de aproximadamente 275 m. Jaillard (1997) le asigna la categoría de Grupo y lo subdivide en:

- **Napo Basal (Albiano inferior – Albiano Superior),** es concordante con la formación Hollín, y está constituida por areniscas basales, glauconíticas de grano fino a medio, intercaladas con limolitas y calizas delgadas. Incluye la *Caliza "C"*, de tipo masivo con lutitas negras en la base.
- **Napo Inferior (Albiano superior – Cenomaniano Superior),** comprende la *Caliza "B"* que son calizas margosas de medio anóxico, alternadas con lutitas negras y las areniscas glauconíticas y masivas "U y T"

- **Napo Medio (Turoniano)**, es netamente calcáreo y predominantemente marino, compuesta por las *Calizas "A"* de color gris oscuras a negras.
- **Napo Superior (Coniciano inferior – Campaniano Medio)**, de base a tope comprende una secuencia de lutitas con intercalaciones de bancos calcáreos; es integrada por calizas y lutitas oscuras, la *Arenisca "M-1 inferior"* que consiste de areniscas, con intercalaciones de lutitas.

Formación Tena (Maastrichtiano Inferior – Paleoceno; Faucher y Savoyat, 1973)

Se forma posterior a un hiato de sedimentación y erosión parcial con Napo. Esta Formación es indicadora de un cambio significativo de sedimentación Cretácica - Terciaria en el Oriente, marcando una regresión marina y la emergencia de la naciente cordillera, cuya erosión fue la principal fuente de material clástico a la cuenca Oriente (Freire, 2012). Se conserva aflorando en su totalidad en la cordillera de Cutucú, en donde alcanza hasta 1000 m de espesor. Tschopp (1953) lo subdivide en:

- **Miembro Tena Basal**, consiste de areniscas arcósicas, cuarzo areniscas que varían de arcósicas a calcáreas de este a centro-norte, en la Zona Subandina se encuentran conglomerados, areniscas cuarzosas y brechas calcáreas (Escobar, 2016).
- **Miembro Inferior**, se constituye de limolitas y areniscas rojas continentales de grano fino, y son concordantes sobre las areniscas y limolitas "Tena Basal".
- **Miembro Superior**, es constituido de limolitas y areniscas de grano grueso.

1.6.4 Estratigrafía local del área de estudio

El área del proyecto se ubica en la zona subandina, un cinturón de transición entre la Cordillera Real y la Llanura Amazónica. Comprende un relieve accidentado controlado por el levantamiento del basamento cristalino, la actividad volcánica cuaternaria y la erosión de ríos.

Formación Chapiza

En la zona de estudio, las mejores exposiciones de la Formación Chapiza son observadas entre las coordenadas 227912E / 9986151N; 228698E / 9986411N. Consiste en una sucesión de sedimentos clásticos continentales rojos (red beds) con pequeñas incursiones marinas locales. La Formación Chapiza incluye alternancias entre lutitas rojas, areniscas grises, rosadas, violetas, pequeños horizontes de evaporitas y dolomitas, areniscas feldespáticas y conglomerados interestratificados con tobas violetas, grises y verdes, brechas tobáceas y andesitas basálticas (Vallejo et al., 2021). La base de la Fm. Chapiza no se observa en el área de estudio, mientras que, la Fm. Hollín se deposita en discordancia angular sobre la Fm. Chapiza, y su espesor está comprendido para esta sección entre 125 y 150 m (IIGE, 2020).

De acuerdo con los resultados de edades publicadas por Hall y Calle (1982) y edades U/Pb obtenidas recientemente por Vallejo et al. (2021) se indica que el rango de edad de la Fm. Chapiza varia de 165 Ma a 132 Ma. Datos palinológicos reportados por Ordóñez et al. (2006) colocan a esta formación en el Jurásico Superior.

La Fm. Chapiza ha sido interpretada por Diaz et al. (2004) y Vallejo et al. (2021) como una secuencia de abanicos aluviales, depósitos evaporíticos de sabkha en cuenca de trasarco, depositados durante un período de extensión con una fuente de arco volcánico calco-alcalino.

Formación Hollín

En la zona de estudio, las mejores exposiciones de la formación se observan entre las coordenadas 227898E / 9986139N; 227963E / 9986777N. Consiste en una sucesión de capas métricas de areniscas cuarzosas de grano fino a grueso y de color blanco a amarillo, y en muchas ocasiones con una estratificación cruzada intercaladas con lentes irregulares de lutita (Freire, 2012). La Fm. Hollín cubre en discordancia angular a la Fm. Chapiza; mientras que, la Fm. Napo se deposita en concordancia sobre la Fm. Hollín (Vallejo et al., 2021)

De acuerdo con los resultados de edades de máxima depositación U/Pb obtenidas por Vallejo et al. (2021) en zircones detríticos se indica que la edad máxima de depositación (MDA) para la base de esta Formación es de 119 Ma, mientras que datos palinológicos reportados por Ordóñez et al. (2006) colocan a esta formación en el Albiano – Aptiano. La Fm. Hollín ha sido interpretada como una secuencia de depósito fluvial para el miembro inferior y costero mareal para el miembro superior por Shammugan et al. (2000), Mariño (2015), Romero et al. (2019) y Vallejo et al. (2021)

1.6.5 Síntesis paleogeográfica del área de estudio

La evolución del área de interés puede entenderse desde los cambios en el marco geodinámico de la Cuenca Oriente ocurridos en el contexto del Jurásico Medio al Cretácico Inferior, de las Formaciones Chapiza y Hollín Inferior.

Paleogeografía del Jurásico Medio

La subducción en dirección SE, da origen al arco magmático calco-alcalino de Piuntza de orientación NNE-SSO, extendido desde el norte de Perú hasta el norte de Colombia (Romeuf et al., 1994), y es intruido por los batolitos de Abitagua, Rosa Florida y Zamora (Aspden et al., 1990). Este evento geodinámico pone fin a la apertura del rift del triásico, lo cual provoca un levantamiento de éste, que da lugar a la superficie erosiva de la base de la Fm. Chapiza (Christophoul et al., 1998).

Paleogeografía del Jurásico Superior-Cretácico Inferior

La dirección de la subducción cambia hacia el NE y se forma el arco magmático de Misahuallí (Jaillard et al., 1990). Este episodio pudo haber provocado un tectonismo de tipo extensional, al cual están asociadas estructuras de semi-graben que fueron rellenadas parcialmente por depósitos clásticos de la Fm. Chapiza (Vallejo et al., 2021). Las edades obtenidas de rocas sedimentarias e ígneas que llenan los semi-grabens y las edades U/Pb obtenidas en Vallejo et al. (2021) sugieren que la Fm. Chapiza fue depositada durante un período de extensión y vulcanismo contemporáneo, en ~160 a 132 Ma.

En el Cretácico Inferior, la acreción de terrenos alóctonos en Colombia y Ecuador, produjo un evento compresional que ocasionó el enfriamiento y exhumación de las rocas pre-cretácicas de la Cordillera Real y la zona subandina, en esta última corresponde a la disconformidad angular y hiato depositacional entre Chapiza y Hollín Inferior (Vallejo et al., 2021)

Paleogeografía del Aptiano Superior - Albiano Superior

Después del período de erosión de las rocas pre-cretácicas tiene lugar la depositación del sistema fluvial correspondiente a la Fm. Hollín Inferior. Se diferencian tres ambientes depositacionales definidos por White et al. (1995): en la parte basal se encuentran depósitos fluviales de relleno de valles aluviales sobre la superficie erosiva Pre-Hollín (Barragán et al., 2004). Le sigue la depositación de la parte principal de la Fm. Hollín que se caracteriza por depósitos de ríos trenzados desarrollados al Oeste de la cuenca (White et al., 1995) probablemente desde el Aptiano durante caídas del nivel del mar (Haq et al., 1987). Y en la parte superior, se da el cambio a ambientes distales de planicie aluvial costera tipo llanura de inundación influenciadas por la acción de mareas, y se abandona totalmente el sistema fluvial trenzado. Progresivamente se produce un cambio hacia un sistema detrítico de baja energía, donde se evidencian los efectos de la transgresión marina que define a Hollín Superior (Barragán et al., 2004), en donde se evidencian dos ambientes depositacionales: la parte inferior es de tipo clástico, de playa-deltaico-estuarino, y es cubierta por facies de plataforma marina somera en la parte superior, evidenciada con la presencia de abundante glauconita (Jaillard, 1997); es decir, la influencia continental decrece hacia el tope, por lo que existe una clara transgresión (Baby et al., 2004) hasta alcanzarse una transición a un sistema de prisma de alto nivel (HST), que queda registrado en la superficie de máxima inundación (MFS), que ocurre durante la depositación de la lutita basal de Napo Inferior en el Albiano Superior.

2 METODOLOGÍA

El presente estudio se realizó siguiendo cinco fases principales para cumplir con los objetivos establecidos:

Fase 1: Recopilación de la información existente

Esta etapa se basó en la recolección de libros, tesis, artículos científicos, y estudios previos con datos técnicos del área de estudio, mapas geológicos y topográficos, columnas estratigráficas y fotografías. Además, se hizo la revisión de los manuales de instrumentos a ser utilizados durante la realización del proyecto, principalmente en el laboratorio.

Fase 2: Trabajo de campo

Se realizó una campaña para la descripción y muestreo de los afloramientos, que incluyó:

- Utilización del taladro de roca con broca de diamante. El fluido de perforación fue agua sin aditivos.
- Toma de pequeños núcleos perforados (114 muestras) de longitudes variables, alrededor de 2.5 cm de diámetro y 5-7 cm de longitud.
- El trayecto muestreado fue a lo largo de la vía a la Casa de Máquinas de la hidroeléctrica Coca-Codo Sinclair, entre las coordenadas 227942E / 9986435N y 228893E / 9986431N. La longitud total muestreada fue de 1630 m.
- Los puntos de perforación se seleccionaron aplicando el método de Observación Científica, y siguiendo criterios geológicos: litológicos, estructurales, sedimentarios y estratigráficos, en base a los trabajos previos realizados en el mismo sitio por IIGE (2020), Vallejo et al. (2021) y Mariño (2015).

Fase 3: Análisis macroscópico de las muestras recolectadas

Con el fin de facilitar la observación macroscópica en las muestras de mano, esta fase incluye la limpieza y secado de las muestras para eliminar cualquier residuo de la perforación. El lavado de las muestras se realizó en base a agua y el secado se llevó a cabo en un horno industrial durante 30 minutos a una temperatura de 90°C.

Con la ayuda de una lupa 10x y ácido clorhídrico al 5%, se hizo el reconocimiento petrográfico de las muestras en las que se describió: color, componentes, tamaño de grano, estructuras y texturas sedimentarias, y tipo de cemento.

La descripción macroscópica permitió la posterior clasificación de las muestras por litofacies, siguiendo la columna estratigráfica propuesta por IIGE (2020), Vallejo et al. (2021) y Mariño (2015), a las cuales se le realizaron nuevas modificaciones.

Fase 4: Análisis en el laboratorio de las muestras recolectadas

Se realizó un análisis geoquímico a través de la técnica de Fluorescencia de Rayos X (XRF), para lo cual se llevó a cabo el siguiente tratamiento de las muestras:

I) Reducción del tamaño de la muestra. Parte de las muestras obtenidas se pulverizaron en un molino de laboratorio, de carburo de tungsteno, programado a una velocidad de 1000rpm durante 1 minuto, para 100mg de cada muestra. Mientras que, la parte restante de muestras fueron pulverizadas con mortero y pistilo de acero inoxidable.

Los molinos de carburo de tungsteno se utilizan a menudo en estudios de geoquímica orgánica, pero en el análisis de muestras con contenido geoquímico inorgánico, puede ocurrir contaminación de ciertos elementos traza incluyendo Co, Cu, W y otros. Mientras que, la molienda en mortero y pistilo de acero inoxidable puede resultar en la contaminación de Fe y probablemente un número de elementos traza.

II) Preparación de cápsulas de muestras XRF. Dichas cápsulas son dobles con extremos abiertos, constan de una copa 30.7mm de diámetro y 22.9 mm de alto que se cierra en un extremo con un anillo de borde dentado y polipropileno microporoso de 6 µm para permitir el paso de los rayos x; mientras que al otro extremo se cierra con una tapa que evita el desbordamiento. Dentro de la cápsula se coloca una porción homogenizada de muestra compactada y fijada con algodón. La preparación de las cápsulas se siguió en base a las recomendaciones de su fabricante Chemplex Industries Inc. y a la guía de Hall et al. (2012).

III) Fluorescencia de rayos X. Los datos se obtuvieron utilizando un dispositivo XRF portátil.

- **Dispositivos XRF portátiles (pXRF):** Pese a que los análisis de laboratorio XRF siguen siendo el estándar geoquímico para el suministro de la más alta calidad posible en el análisis de datos geoquímicos terrestres, los dispositivos pXRF tienen muchas ventajas sobre las técnicas tradicionales de laboratorio: la portabilidad, lo que permite la recopilación de datos in situ; poca preparación de las muestras, lo que facilita el proceso de escaneo; amplio rango dinámico y capacidad multielemento, permite una cuantificación precisa de muchos elementos; y la velocidad en las mediciones. Además, de ser una técnica no destructiva que permite múltiples mediciones de la misma muestra. Estos dispositivos se basan en la emisión de rayos X que es dominada por la teoría de la mecánica cuántica (sección 1.5.3.1.1). Cuanto más intensa es la emisión o fluorescencia, en mayor cantidad se encuentra el elemento a cuantificar. Para ello, es necesario estándares para hacer una comparación directa con la muestra a analizar, mediante una curva de calibración (Temitope y Timothy, 2018).

En el actual estudio se utilizó un pXRF Olympus Vanta, con un tubo de rayos X con un voltaje máximo del tubo de 40 kV. Las muestras se analizaron utilizando el modo de 3 haces de rayos x. Los elementos que se midieron corresponden a Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Pr, Nd, W, Au, Hg, Pb, Bi, Th, U; obtenidos en porcentaje en peso (wt%).

El procesamiento de los datos se realizó por lotes, cada 10 muestras se utilizó un blanco de sílice y un estándar de calibración proporcionados por el fabricante en una cápsula XRF similar con polipropileno microporoso para monitorear la contaminación. Luego se repitió el procedimiento para el siguiente conjunto de muestras sucesivamente.

Se realizaron 2 mediciones por muestra, variando la posición de la muestra con el área del detector del Vanta, para que los haces de rayos x atravesen la muestra a diferente ángulo. Las mediciones realizadas se obtuvieron de forma remota con Olympus Vanta Desktop App (Safe Mode), en donde pudieron ser exportadas a la base de datos creada.

Fase 5: Interpretación de los datos obtenidos en campo y laboratorio

La base de datos con la geoquímica realizada en cada muestra mediante el método de XRF que constituye el fundamento de estudios lito-geoquímicos en sedimentos, permitió analizar principalmente las concentraciones de elementos mayores y traza, mediante curvas de Concentración vs. Elevación vertical, que se correlacionaron con la columna estratigráfica modificada de los trabajos de Vallejo et al. (2021) y Mariño (2015), de la Fm. Chapiza y Hollín, en base a la sedimentología y estratigrafía descrita en las Fases 2 y 3.

Los elementos mayores fueron transformados de elementos a óxidos con los factores de conversión utilizados por el SGI Laboratorio de rayos X del Centro de Investigación, Tecnología e Innovación de la Universidad de Sevilla (Anexo III), y luego recalculados al 100% para fines gráficos.

En esta etapa las litofacies correspondientes a cada Formación se asociaron a su respuesta geoquímica con el ambiente de depósito, fuente de sedimentos y alteraciones, con ayuda de diagramas de discriminación de sedimentos, tanto binarios como terciarios, elaborados en los softwares Matlab R2020a y GCDkit, respectivamente.

3 RESULTADOS, DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

3.1.1 Análisis y definición de litofacies

En base a las partes expuestas de la Fm. Chapiza, Hollín Inferior y el miembro Alluvial Valley Fill en el corte Coca – Codo, se identificaron doce litofacies, que fueron definidas de acuerdo con las características litológicas similares, principalmente descritas en los trabajos previos de IIGE (2020), Vallejo et al. (2021) y Mariño (2015), así como también, de la descripción de muestras de mano recopiladas en la campaña de muestreo de este estudio.

La nomenclatura utilizada para designar cada facie fue renombrada de los trabajos previos mencionados, y consiste en las primeras letras de las características asociadas a cada facie, que se describen a continuación:

Tabla 2: Descripción de litofacies para la Fm. Chapiza, Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill

Equivalencia de facies de trabajos previos		Facies (trabajo actual)		Descripción
Vallejo et al. (2021)	FLS	AFL	Areniscas finas laminadas con limolitas	Areniscas de tamaño de grano fino, presentan delgadas láminas horizontales de limolitas grises a negras. Ocasionalmente presentan pequeños ripples.
Mariño (2015)	AFM	AML	Areniscas medias intercaladas con limolitas	Arenisca de grano medio, con granos redondeados a subredondeados; presenta intercalaciones milimétricas de limo negro.
Vallejo et al. (2021)	MCSX	AMG	Areniscas medias a gruesas	Areniscas con tamaño de grano medio a grueso, de granos subredondeados imbricados, presenta gradación normal, ocasionalmente contiene nódulos de siderita, son masivas y en el afloramiento muestran estratificación cruzada paralela y estratos granodecrecientes.
Mariño (2015)	CFM	CFM	Conglomerados finos masivos	Conglomerados de tamaño de grano fino a medio, con clastos subangulares; son masivos, poco cementados y sorteados regularmente.
Vallejo et al. (2021) IIGE (2020)	RM Litofacie-4	RB	Redbeds de lutitas limosas, limolitas, limolitas arenosas, multicolores	Lutitas limosas, limolitas, limolitas arenosas rojas, verdes y grises, con laminación horizontal y abundantes niveles masivos. En el afloramiento aparecen como secuencias de estratos de morfología mantiforme o periclinal, lateralmente continuos.

Vallejo et al. (2021)	AMCX	AkMG	Arcosas medias a gruesas	Arcosas de grano medio a grueso, que pueden ser conglomeráticas e incluyen estratificación cruzada, gradación normal y abundantes venas de cuarzo. Se intercalan con facies de Red beds (RB).
IIGE (2020)	Litofacie-6	ALFG	Areniscas y/o litoareniscas finas a gruesas	Facies de areniscas y/o litoareniscas de grano fino a grueso, ocasionalmente de grano muy fino en el Miembro Superior, con estratificación cruzada paralela y gradación normal. Son ricas en plagioclasa y fragmentos líticos de origen volcánico como andesitas y dacitas, y pocos granos de cuarzo. Las mediciones de paleocorrientes en los afloramientos indican una dirección de transporte N45-60°E.
IIGE (2020)	Litofacie-5	CMC	Conglomerados matriz a clasto soportados	Conglomerados de granos a gravas, oligomícticos, polimodales, matriz-soportados o clasto-soportados, con matriz limo-arenosa, y clastos imbricados de cuarzo, andesitas y dacitas, y gradación normal. Ocurren como esporádicos estratos métricos, canalizados (superficie de erosión basal, con morfología cóncava). Las mediciones de paleocorrientes indican una dirección de transporte de N60°E.
IIGE (2020)	Litofacie-7	AkLF	Arcosas y/o litoareniscas finas a muy finas	Arcosas y/o litoareniscas de grano fino a muy fino, con laminación no-paralela o transversal y gradación normal. Incluyen pequeños climbing-ripples. En el afloramiento forman estratos de morfología tabular que se intercalan con la facie CMC.
IIGE (2020)	Litofacie-4	DVF	Depósitos volcanoclásticos finos	Rocas volcanoclásticas verdosas, finas (ash), con clastos sedimentarios y graníticos, retrabajados y localmente foliados. El miembro Chapiza Superior en donde se ubican estas facies, también incluye flujos de lava de andesita y andesita basáltica, e intercalaciones de brechas volcánicas (BV).
IIGE (2020)	Litofacie-8	BV	Brechas volcánicas	Facies de brechas volcánicas rojas soportadas por matriz y fragmentos angulares volcánicos y clastos sedimentarios, los clastos se encuentran imbricados y la facie presenta gradación normal, e inversa en los niveles bajos. Las mediciones de paleocorrientes indican una dirección de transporte hacia el Este.
IIGE (2020)	Litofacie-4	ALRF	Areniscas limosas rojizas finas a muy finas	Areniscas de color rojo a anaranjado, y tamaño de grano muy fino a fino, presentan ripples y climbing ripples. Aparecen intercaladas con las facies de Red beds.

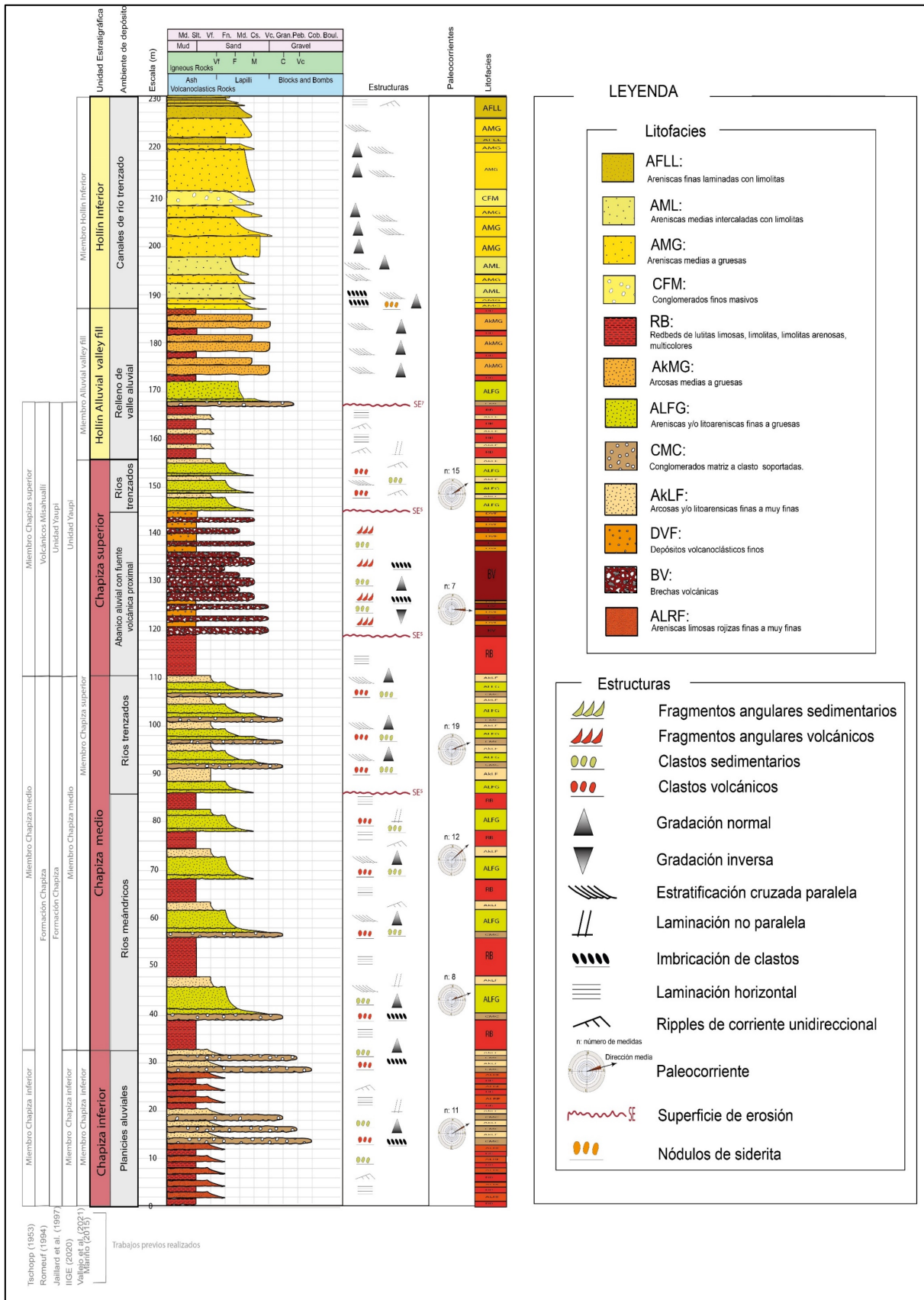


Fig. 15: Columna estratigráfica del afloramiento del corte Coca-Codo de la Fm. Chapiza, Alluvial Valley Fill, Hollín Inferior (modificado de IIGE (2020) y Vallejo et al. (2021)). Y construida a partir a la base bibliográfica recopilada de Tschopp (1953), Romeuf (1994) y Jaillard et al. (1997). La jerarquía de las superficies de erosión (SE) se definieron basados en Miall (1996) (Anexo V).

3.1.2 Interpretación de facies

Las facies identificadas en las Formaciones Chapiza y Hollín Inferior concuerdan con los elementos y características definidas para ambientes fluviales detalladas por Miall (1985).

La arquitectura fluvial de una cuenca se construye con una serie de elementos básicos que se definen por el tamaño de grano, composición, secuencia interna y la geometría externa que presentan, Miall (1985) sugiere que se pueden encontrar facies como: **(FI)** Arenas y lutitas con laminación y ripples; **(Gm)** Gravas masivas; **(Gms)** Gravas matriz soportadas; **(Gp)** Gravas con estratificación cruzada planar; **(Sh)** Arenas con laminación horizontal; **(SI)** Arenas con laminación cruzada de bajo ángulo; **(Sm)** Arenas masivas o con gradación normal; **(Sp)** Arenas con estratificación cruzada planar; **(Sr)** Arenas con estratificación cruzada debida a ripples; **(St)** Arenas con estratificación cruzada de surco.

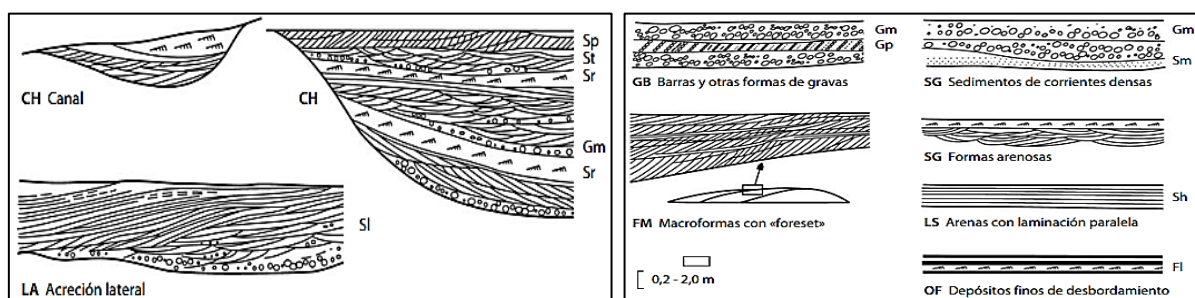


Fig. 16: Elementos básicos o arquitecturales fluviales (Miall, 1985).

En base a las facies análogas sugeridas por Miall (1985) para sistemas fluviales, se definieron los ambientes para los miembros de la Fm. Chapiza, Alluvial Valley Fill y Hollín Inferior, que comprenden una sucesión de sedimentos clásticos:

Miembro Chapiza Inferior: corresponde a las facies ALRF, RB, CMC, AkLF. La descripción original de Tschopp (1953) incluye en este Miembro intercalaciones de yeso y anhidrita observadas a la base de la Fm. Chapiza en pozo Tambococha-01, en el flanco oriental de la Cordillera de Cutucú (IIGE, 2020). Ordóñez et al. (2006) han interpretado a la presencia de estas evaporitas, como un paleoambiente marino somero restringido posiblemente a un lagoon de aguas tropicales a subtropicales, y de baja energía. Sin embargo, en el Corte Coca-Codo no se las ha encontrado, por lo que en la interpretación actual se sugiere que la Fm. Chapiza Inferior corresponde a un ambiente de planicies aluviales debido a las facies finas (lutitas y limolitas) que se han preservado.

Miembro Chapiza Medio: en la descripción original de Tschopp (1953), este miembro no presenta intercalaciones de evaporitas, pero sí incluye facies similares a las del Miembro Inferior (RB, CMC, AkLF), e incluye a las areniscas de la facie ALFG de grano más grueso. En el Miembro Medio las facies comparten tanto una arquitectura de Río Meándrico como Trenzado. Las facies de Red Beds desaparecen en el sistema fluvial trenzado.

El sistema meandriforme está dominado por un patrón de flujo helicoidal, lo que hace que los detritos se depositen en una capa inclinada dispuesta sobre el margen interno del meandro, generándose dentro del canal una estratificación cruzada (Arche, 2010). Dicha acreción provoca la excavación en el margen contrario, por lo que el canal se desplaza lateralmente y se mantiene la sección transversal. Por tanto, dentro del canal se produce sedimentación principalmente por acreción lateral (Arche, 2010). Las facies AkLF que presentan climbing-ripples sugieren además corrientes de movimiento rápido, probablemente atribuidas a crevasse splay.

El patrón de un ambiente fluvial trenzado incluye características como: material de grano fino a grueso entre conglomerados y arenas, bajo contenido de matriz, estratificación cruzada, tendencia grano-decreciente, y canales aislados con morfología cóncava y lateralmente continua. Este miembro incluye canales que alcanzan hasta 25m de amplitud (IIGE, 2020) y son rellenados por depósitos de barra.

Miembro Chapiza Superior. - en este miembro se distingue la arquitectura de un ambiente de abanico aluvial con fuente volcánica proximal, así como de un sistema fluvial trenzado.

El abanico aluvial con fuente volcánica proximal incluye las facies RB, BV, DVF. La distribución granulométrica de los materiales terrígenos acumulados en forma conoide en los abanicos aluviales implica que los materiales de granulometría más fina se hallan localizados en zonas lejanas en donde existe una gradación granulométrica en decrecimiento (Arche, 2010). La litología mayoritaria en el área fuente, indica un abanico generado predominantemente por materiales arenosos y conglomeráticos, así como limolitas y lutitas, que se intercalan con rocas volcanoclasticas, por lo que sugiere una cercanía con el contemporáneo arco continental Misahuallí (Díaz et al., 2004).

La depositación de las facies ALFG, AkLF y CMC, similares a las facies del Miembro Medio son consistentes de igual manera con una arquitectura fluvial de un sistema trenzado, y corresponden a depósitos de barras longitudinales y laterales.

Alluvial Valley Fill Member. - Vallejo et al. (2021) sugiere que la sección subsiguiente de Chapiza Superior que se constituye de capas rojas (RB) a la base de la Fm. Hollín, y se intercalan con facies AkLF, AkMG separadas por aproximadamente por 6m de las facies ALFG y CMC, corresponden al relleno de valle aluvial, que consta de depósitos de areniscas y arcosas de canal fluvial y lutitas de planicie de inundación en un paleovalle.

Hollín Inferior. - El aumento del tamaño de grano y engrosamiento de los estratos de la sección superior del Alluvial Valley Fill a Hollín Inferior sugiere una evolución de un río

meándrico de carga suspendida a un río de carga mixta con predominio de arenas de un río trezado, debido a un aumento en la carga de sedimentos (Vallejo et al., 2021).

Las litofacies AMG, AML, CFM y AFLL observadas en Hollín Inferior, de arenas medias a gruesas hasta conglomerados, y matriz escasa; la unidireccionalidad de la estratificación cruzada, la tendencia granodecreciente de los estratos y la geometría cóncava de los canales (Mariño, 2015), son consistentes con un sistema fluvial trezado. Particularmente, AFLL corresponde a episodios intermitentes de acreción de barras laterales arenosas seguidas de velocidades de flujo reducidas y deposición tardía de arena y limo (Vallejo et al., 2021).

3.1.3 Evolución sedimentológica y relaciones estratigráficas

El tramo muestreado tiene una longitud total de 1630 m y la altura de la columna estratigráfica construida llega a ser de alrededor de 231m, e incluye a la Fm. Chapiza que descansa en discontinuidad sobre la Fm. Misahauquí, y a continuación de este contacto, se encuentran el intervalo de hasta 32m de espesor del Miembro Chapiza Inferior, de estratos mantiformes y lateralmente continuos, así como también esporádicos estratos canalizados de una morfología cóncava y base erosiva, rellenos con facies gruesas. Sobre dicho intervalo, se organizan 80m de canales aislados con superficies basales erosivas de 5to orden (Miall, 1996), morfologías cóncavas y lateralmente continuos, que son rellenos por depósitos de barra, correspondientes al Miembro Chapiza Medio. La secuencia clástica de 44m de espesor del Miembro Chapiza Superior suprayace al Miembro Medio con niveles mantiformes de volcanosedimentos, con superficies basales erosivas de 5to orden (Miall, 1996).

La Fm. Hollín se deposita en discordancia angular sobre la Fm. Chapiza, y sobre ésta, se ubican 32m de depósitos que rellenan superficies erosivas de paleovalles de 7mo orden (Miall, 1996) que corresponden al Miembro Alluvial Valley Fill a la base de la Fm. Hollín; y es seguida de un intervalo de 43m del Miembro Hollín Inferior que se constituye de un complejo de canales amplios cóncavos, con bases erosivas, y una arquitectura estratigráfica caracterizada por la apilación lateral y vertical de barras fluviales.

El presente trabajo concuerda con Litherland et al. (1994), Jaillard et al. (1997), Vallejo et al. (2021), y IIGE (2020), quienes interpretan a la Fm. Chapiza como una secuencia fluvio-aluvial, de cuencas de trasarco, así como con la interpretación de Shammugan et al. (2000), Mariño (2015) y Vallejo et al. (2021) quienes le asignan un ambiente de depósito fluvial al miembro inferior de la Fm. Hollín.

3.1.4 Geoquímica de muestras analizadas

La utilidad de la geoquímica en rocas detríticas es muy limitada, ya que se analizan conjuntamente elementos constitutivos de fases clásticas y diagenéticas, obteniéndose una información que mezcla el área fuente, la aportación de la propia cuenca de sedimentación y la diagénesis (Arche, 2010). Sin embargo, mediante el análisis de las asociaciones de minerales pesados se obtiene una paragénesis característica relacionada con determinadas litologías en origen (Arche, 2010). Así mismo, los cambios mineralógicos aportan con información para mejorar el control estratigráfico y lito-geoquímico.

3.1.4.1 Afinidades mineralógicas de elementos

Se empleó como técnica estadística los Coeficientes de Correlación (CC), y como técnica gráfica la variabilidad de elementos mayores en diagramas bivariantes, con el propósito de definir las afinidades mineralógicas basadas en la composición de los distintos elementos.

La información geoquímica y petrográfica de este trabajo, conjuntamente con la mineralogía por XRD de Mariño (2015) para la Fm. Hollín Inferior, y de Vallejo et al. (2021) para las Formaciones Hollín y Chapiza (Fig. 17), se pudo establecer ciertas afinidades principalmente de minerales pesados de elementos índice que tienen un alto grado de confianza, teniendo en cuenta que más de un elemento puede estar contenido en el mismo mineral; lo que facilita más adelante el análisis de proveniencia de los sedimentos.

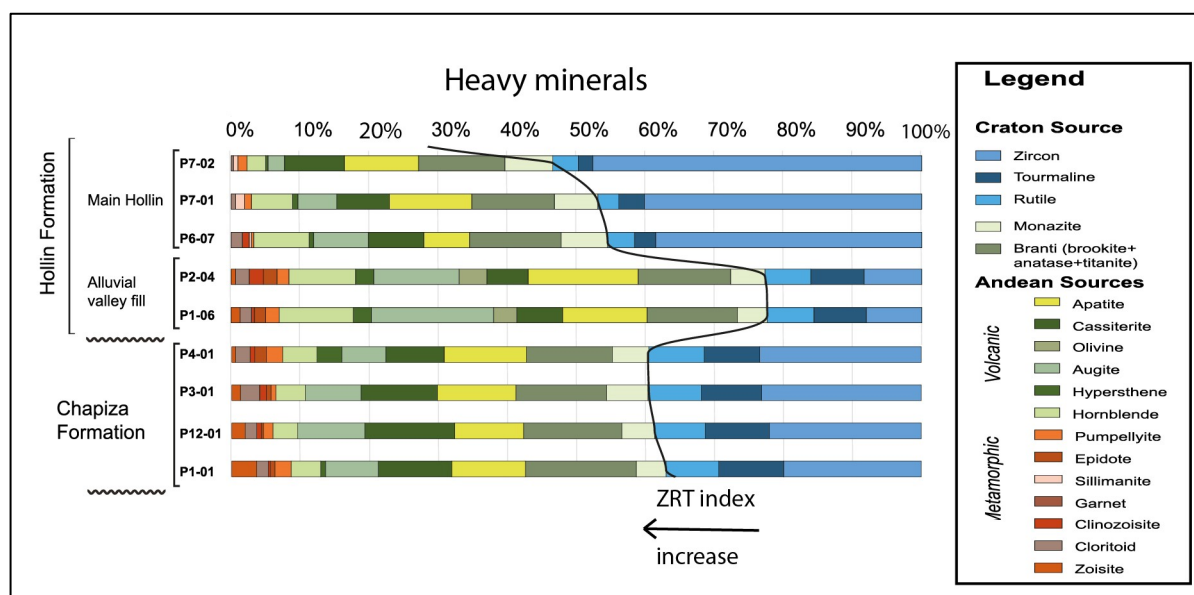


Fig. 17: Minerales pesados de las Formaciones Chapiza y Hollín (Modificado de Vallejo et al., 2021)

3.1.4.1.1 Análisis estadístico

Como regla general, los valores de Coeficientes de Correlación (CC) de más de 0.7 infieren un alto nivel de correlación entre dos elementos, 0.6-0.7 son de nivel moderado-alto, 0.5-0.6 un nivel moderado y por debajo de 0.5, un nivel bajo. Las mismas reglas se aplican a valores

negativos de CC. Por ejemplo, un CC inferior a -0,7 sugiere que los dos elementos tienen una fuerte asociación negativa (Craigie, 2018).

Tabla 3: Resultados del análisis del coeficiente de correlación para un grupo selecto de elementos, aplicados a las muestras obtenidas de la Fm. Chapiza, Alluvial Valley Fill y Hollín Inferior. Los recuadros seleccionados en rojo corresponden a altos niveles de correlación.

	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn	Fe	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ba	W	Pb	Th	U	
Mg	1,00																											
Al	-0,35	1,00																										
Si	-0,54	-0,79	1,00																									
P	0,40	0,25	-0,55	1,00																								
K	-0,56	0,53	-0,43	0,03	1,00																							
Ca	-0,12	0,61	-0,73	0,42	0,06	1,00																						
Ti	0,32	0,76	-0,68	0,25	0,20	0,55	1,00																					
Mn	0,77	0,03	-0,70	0,56	-0,16	0,43	0,20	1,00																				
Fe	0,70	0,41	-0,85	0,67	0,16	0,65	0,43	0,87	1,00																			
V	0,34	-0,08	-0,18	0,18	-0,20	0,14	0,40	0,34	0,31	1,00																		
Cr	0,19	-0,06	-0,31	0,20	0,13	0,04	0,16	0,26	0,38	0,24	1,00																	
Co	0,30	-0,84	0,77	-0,31	-0,46	-0,49	-0,73	-0,19	-0,49	-0,16	-0,17	1,00																
Ni	0,59	-0,01	-0,60	0,48	-0,17	0,19	0,22	0,73	0,85	0,26	0,58	-0,27	1,00															
Cu	0,25	-0,09	-0,18	0,15	-0,02	-0,14	-0,04	0,27	0,21	0,17	-0,06	0,09	0,03	1,00														
Zn	0,16	-0,22	-0,29	0,23	-0,05	-0,24	0,06	0,38	0,42	0,10	0,11	0,06	0,53	0,12	1,00													
As	0,22	0,21	-0,26	0,54	0,10	0,08	0,29	0,19	0,24	0,09	0,30	-0,37	0,18	0,01	0,02	1,00												
Rb	-0,62	0,56	-0,40	-0,02	0,97	0,04	0,26	-0,21	0,11	-0,22	0,09	-0,46	-0,20	-0,08	-0,04	0,12	1,00											
Sr	0,18	0,35	-0,51	0,36	0,24	0,46	0,43	0,39	0,46	0,27	0,64	-0,36	0,37	0,10	0,02	0,41	0,19	1,00										
Y	-0,08	0,60	-0,42	0,10	0,14	0,42	0,76	-0,02	0,11	0,04	0,02	-0,62	-0,11	-0,10	-0,01	0,25	0,23	0,26	1,00									
Zr	-0,45	0,22	0,10	-0,21	-0,18	-0,19	0,49	-0,43	-0,35	-0,10	-0,23	-0,37	-0,39	-0,15	-0,18	0,05	-0,09	-0,13	0,70	1,00								
Nb	-0,59	0,39	0,11	-0,32	-0,01	-0,36	0,67	-0,43	-0,44	-0,14	-0,17	-0,27	-0,32	-0,21	-0,20	-0,03	0,11	-0,08	0,77	0,81	1,00							
Mo	-0,28	0,02	0,08	0,33	-0,44	-0,18	0,23	-0,39	-0,22	-0,19	-0,13	-0,32	-0,13	-0,83	-0,10	0,20	-0,35	-0,18	0,39	0,72	0,18	1,00						
Ba	-0,06	0,05	-0,25	0,20	0,52	0,08	0,19	0,10	0,29	-0,11	0,19	0,05	0,26	0,15	0,03	0,07	0,42	0,20	-0,02	-0,18	-0,25	-0,30	1,00					
W	-0,20	-0,86	0,91	-0,30	-0,57	-0,64	-0,65	-0,43	-0,62	-0,10	-0,16	0,93	-0,36	0,01	-0,17	-0,30	-0,56	-0,40	-0,46	-0,12	-0,02	-0,11	-0,04	1,00				
Pb	0,11	0,11	0,01	-0,14	-0,05	-0,13	0,27	0,04	-0,09	0,04	0,14	-0,12	-0,04	0,06	-0,03	0,22	-0,03	0,11	0,29	0,28	0,32	0,03	0,02	-0,07	1,00			
Th	-0,02	0,45	-0,02	-0,19	0,05	-0,07	0,59	-0,19	-0,34	-0,06	-0,11	-0,38	-0,26	-0,10	-0,24	-0,06	0,14	0,13	0,85	0,71	0,79	0,06	-0,14	-0,13	0,24	1,00		
U	-0,09	0,63	0,06	-0,15	0,00	-0,24	0,74	-0,36	-0,39	-0,13	-0,17	-0,48	-0,19	-0,20	-0,39	0,07	0,18	0,31	0,81	0,69	0,86	0,35	-0,23	0,16	0,35	0,85	1,00	

De los resultados obtenidos en la Tabla 3, se producen altos valores de CC entre los pares de elementos de: Mg-Mn, lo que sugiere que tienen afinidades mineralógicas con minerales de arcilla y cloritoide, al igual que Mn-Fe. Los altos valores de CC entre Mg-Fe explican la presencia de minerales de arcilla, siderita, olivino, augita, hiperstena, hornblenda, y cloritoide,

Los altos valores entre Mn-Ni se relacionan con minerales de arcilla y probablemente carbonatos que pueden haber precipitado de fluidos penetrantes, lo mismo ocurre con Fe-Ni. Mientras que, K-Rb se relacionan no solo con minerales de arcilla, sino también feldespatos y micas.

Los elementos Al-Ti y Nb-Th también producen valores altos de CC, esto puede parecer extraño ya que el Al está concentrado, casi exclusivamente, en minerales arcillosos, mientras que Ti, Nb y Th están asociados con minerales pesados. Una razón probable para esto es que los minerales pesados que contienen Ti, Nb y Th se concentran junto con minerales arcillosos con Al, en arena fina, limo y arcilla. El Th se puede vincular con zircón o minerales pesados que contienen Ti y Nb. De igual manera, el Th junto con Y se asocia con monacita y apatito, e inclusive pueden estar ligados a Y y U. Las afinidades entre Th-U así como Th-Zr se relacionan con la presencia de zircones, pero también el Zr en la asociación Zr-Mo constituye afinidad con minerales arcillosos.

Otros minerales pesados que se enlistan en la Fig. 17 como el Rutilo y el ensamblaje Brookita + Anatasa + Titanita (Branti) presentan afinidad con Nb y Ti. La presencia de dichos minerales

pesados encontrados tanto en Chapiza como en Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill, se concentran por lo general en fracciones como arena fina, limo y arcilla, y explican los altos valores CC de Ti - Y, Ti - U, Y - Zr, Y - Nb, Zr - Nb.

Las afinidades mineralógicas relacionadas al wolframio (Si-W y Co-W) denotan la existencia de wolframita asociada a gangas como el cuarzo y minerales metálicos como cobalto e inclusive cobre y molibdeno.

3.1.4.1.1 Análisis gráfico

Con los diagramas binarios que indican la variabilidad de los elementos mayores, es posible reconocer importantes asociaciones positivas y negativas que permiten establecer vínculos elemento-mineral, incluso con más precisión que las técnicas estadísticas.

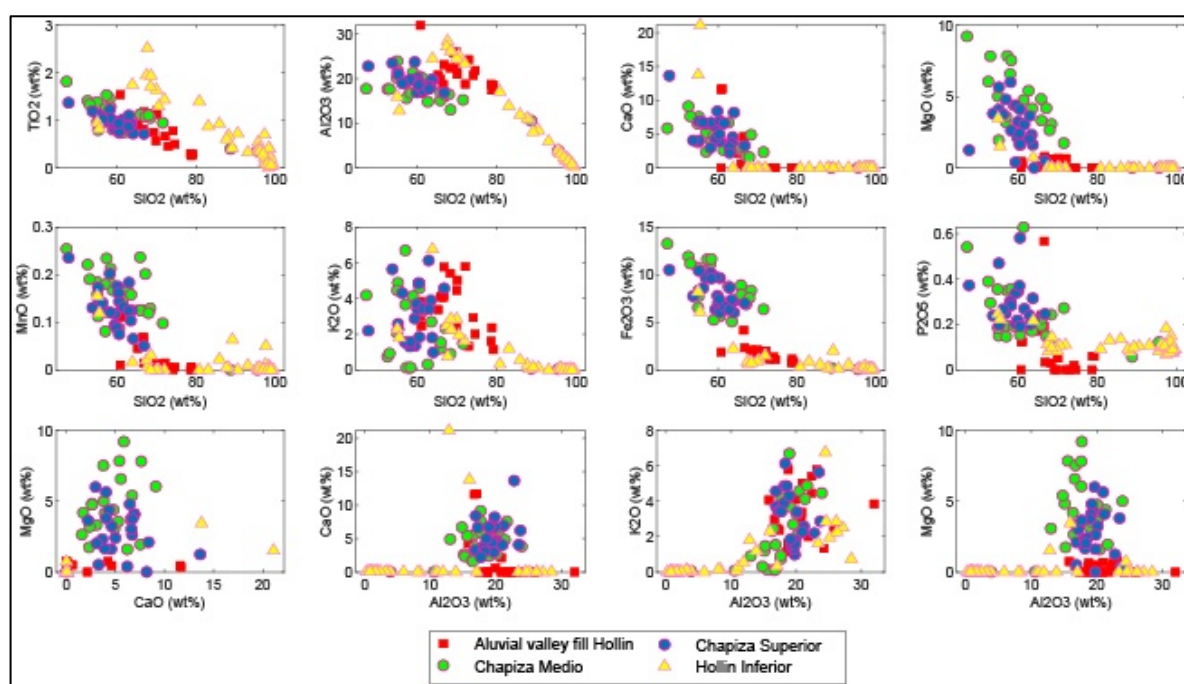


Fig. 18: Diagramas binarios utilizados para establecer afinidades mineralógicas de elementos

Las muestras se concentran en tres grupos en función de su contenido en SiO₂. El grupo principal está formado por rocas ácidas, con unos contenidos en SiO₂ que varían entre 60%-100%, correspondientes a las areniscas cuarzosas de Hollín Inferior. Los materiales de Alluvial Valley Fill Member tienen mayor dispersión composicional, en un intervalo de variación de SiO₂ entre 60% y 80%; y el tercer grupo, de la Fm Chapiza se ubica en rangos de SiO₂ < 70%. El intervalo de variación de SiO₂ entre las muestras del segundo y tercer grupo es muy pequeño.

La correlación de los álcalis con el sílice no es clara, sin embargo, las correlaciones negativas del TiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO, y Fe₂O₃, son indicativos de la presencia de plagioclasa /

feldespato, minerales ferromagnesianos y minerales pesados con afinidad a materiales finos. El aluminio presenta un contenido relativamente alto ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$) en las rocas de la Fm. Chapiza y Alluvial Valley Fill, al tratarse de minerales de arcilla y limo; mientras que, para las rocas de Hollín Inferior el contenido en Al_2O_3 varía desde valores muy cercanos a 0% y 30%.

El comportamiento del CaO respecto al SiO_2 , no muestra una tendencia significativa en las muestras de Hollín Inferior, y los outliers que se producen pueden significar valores anómalos en la medición. En los miembros Chapiza Superior y Medio se observa el mayor contenido en CaO, así como las muestras que se encuentran dentro de Alluvial Valley Fill; la ligera tendencia negativa confirma la presencia de piroxenos como augita, y anfíbol como hornblenda provenientes de una fuente andina volcánica (Fig. 17), además de minerales metamórficos de fuente andina como pumpelita, epidota, zoisita (Fig. 17). Por otro lado, la variación MgO respecto al CaO es casi inexistente en Hollín Inferior y muy baja en Alluvial Valley Fill, mientras que en los dos miembros de la Fm. Chapiza se evidencia una clara dispersión; Chapiza Medio se enriquece en MgO y sugiere mayor abundancia de los minerales de fuente andina volcánica ya que todos presentan Mg en comparación con los provenientes de una fuente andina metamórfica que no todos presentan este elemento en su estructura mineral.

El agotamiento del CaO ocurre a medida que el SiO_2 incrementa, lo que representa que las muestras de Hollín Inferior empobrecidas en Ca tienen mayor contenido de Si que concentra principalmente en minerales de cuarzo; mientras que, la dispersión de CaO y MgO respecto a Al_2O_3 sugiere coexistencia de Ca y Mg con minerales de arcilla en Alluvial Valley Fill pero principalmente en Chapiza.

El P_2O_5 indica una reducción frente al aumento de SiO_2 , lo que representa que puede estar no sólo concentrado en minerales de arcilla y carbonatos, sino también en minerales pesados como zircón, monacita y apatito, que están presentes en mayor abundancia en los miembros de Chapiza pero también en concentraciones $<0.2\text{wt}\%$ en Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill.

Finalmente, la tendencia positiva de álcalis (K_2O vs. Al_2O_3) indica tanto la afinidad con arcillas como con feldespatos, o a su vez que el mineral arcilloso que contiene K es la illita. Así mismo, las muestras que presentan proporciones relativamente bajas de K y altas concentraciones de minerales arcillosos que contienen Al, pueden contener caolinita.

3.1.4.2 Esquemas de Correlación Químico-estratigráfica

Después de que las afinidades mineralógicas de los elementos son establecidas, el siguiente paso en químico-estratigrafía es definir la clasificación litológica y trazar los datos en forma de perfiles (Fig. 20, 21, 22).

3.1.4.2.1 Determinación de litologías

Los resultados del análisis químico de los elementos mayores muestran importantes variaciones en Si y Al principalmente (Fig. 18, 20). Esto se debe a la existencia de distintos tipos litológicos siliciclásticos, unos enteramente silíceos como areniscas cuarzosas, y otros en los que predominan la mezcla de componentes como areniscas limosas, además de limolitas, lutitas, conglomerados y volcanosedimentos, que han sido depositados en diferentes ambientes depositacionales.

Con la finalidad de ilustrar la existencia de estos tipos litológicos, se elaboró el diagrama CaO-Al₂O₃-SiO₂ (Fig. 19a), en el que se definen variedades de rocas con extremos de fangolitas y margas calcáreas. Para evitar confusiones, en este trabajo al igual que en Spalleti (2014), se denominan fangolitas a las rocas de grano fino con componentes terrígenos (lutitas, limolitas, areniscas finas a muy finas con componentes de tamaño limo, sedimentos y brechas volanoclásticas finas), y las litologías con componentes carbonáceos se nombran “margas”.

Dos muestras de Hollín Inferior, una del miembro Chapiza Superior y una de AVF son fangolitas margosas, pero propiamente se debe a la precipitación de carbonatos que ligeramente han cementado a las rocas por la conducción de fluidos en vetillas. En todos los demás casos, existe una marcada nube de puntos en el campo de fangolita con pequeñas variaciones de SiO₂ en las rocas de la Fm. Chapiza y AVF. Comparativamente, en el extremo SiO₂ se concentran las areniscas cuarzosas de Hollín Inferior, por lo que es posible discriminar las facies litológicas AFLL, AMF, AMG y CFM del campo de fangolitas.

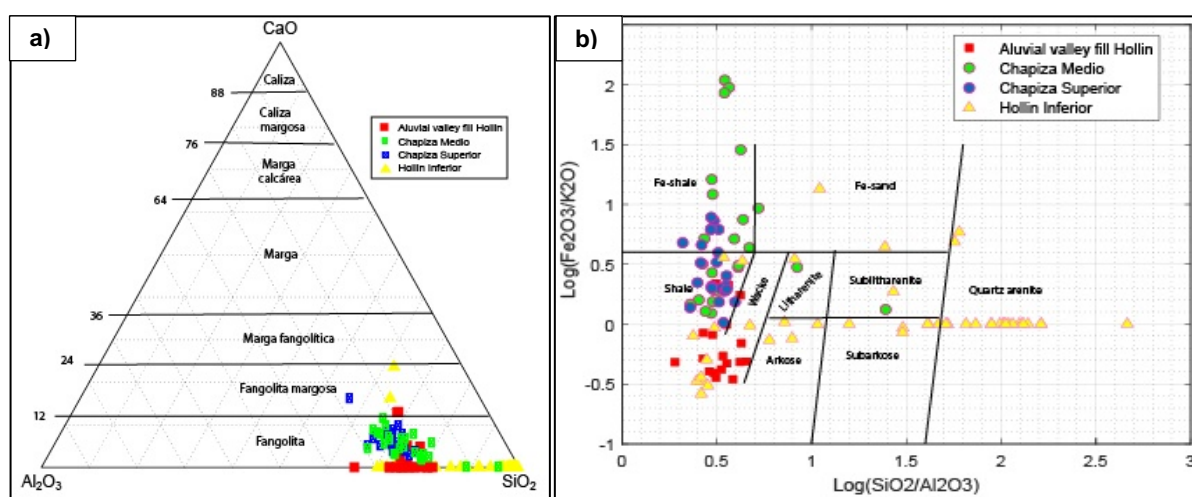


Fig. 19: Clasificación de las muestras analizadas de la Formación Chapiza, Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill y los tipos litológicos definidos en este trabajo, mediante: **a)** Diagrama ternario CaO-Al₂O₃-SiO₂ de discriminación de sedimentos finos y gruesos (Spalleti, 2014). **b)** Diagrama bivariado log(Fe₂O₃/K₂O) vs. log(SiO₂/Al₂O₃) para clasificación de areniscas y lutitas (Herron, 1988).

El contenido de SiO₂ y la relación SiO₂/Al₂O₃ son los criterios geoquímicos más utilizados para diferenciar y sedimentos inmaduros (Potter, 1978); que también reflejan la abundancia de contenidos de cuarzo, feldespato y arcilla, por lo que Pettijohn et al. (1972) proponen un

esquema de clasificación utilizando datos geoquímicos de roca entera, basado en $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ y $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$. Más recientemente, Herron (1988) modificó el diagrama de Pettijohn et al. (1972) para usar $\log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ a lo largo del eje Y en lugar de $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$, de tal forma que las arcosas podrían clasificarse con más éxito utilizando el parámetro (Fe/K). Ésta es también una medida de la estabilidad mineral ya que los minerales ferromagnesianos tienden a estar entre los minerales menos estables durante meteorización (Herron, 1988; Rollinson, 1993).

En la clasificación geoquímica de rocas siliciclásticas de Herron (1988), la Fm. Chapiza y AVF muestran contenido relativo de Fe_2O_3 y K_2O variable, mientras que el de SiO_2 y Al_2O_3 es más uniforme; en contraste, con Hollín Inferior que muestra mayor variabilidad en SiO_2 y Al_2O_3 . Dichas proporciones ubican las muestras del miembro Chapiza Superior preferentemente, en el campo de las lutitas, extendiéndose hacia lutitas ferruginosas en donde predominan las rocas de miembro Chapiza Medio; dos muestras de este último miembro se ubican entre litoarenita y sublitoarenita al presentar un ligero enriquecimiento de SiO_2 . Por otro lado, Hollín Inferior se encuentra ampliamente distribuida entre cuarzoarenita, sublitoarenita, litoarenita, subarcosa y arcosa. Dos muestras de Hollín Inferior atraviesan el campo de arenisca ferruginosa por la presencia de minerales ferromagnesianos de fuente andina volcánica (Fig. 17); por otro lado, las muestras de Hollín Inferior que se ubican en el campo de lutitas, no está constituidas exclusivamente de arcillas, sino que corresponden a areniscas intercaladas con abundantes limos de la litofacie AML.

Alluvial Valley Fill no concentra directamente toda su nube de puntos dentro del campo de wackes ni arcosas, sin embargo, la descripción petrográfica original (Tabla 2, Fig. 15) apunta hacia el campo de arcosas y otras de ellas se ubican en el campo de lutitas que forman la litofacie de Red Beds.

3.1.4.2.2 Perfiles, quimio-zonas y límites quimio-estratigráficos

Una vez determinadas las afinidades mineralógicas, se busca asociarlas a cada sección de la columna estratigráfica para conocer en dónde están distribuidos ciertos minerales. De tal forma, es posible separar litologías incluyendo perfiles de concentración vs. elevación vertical, para elementos mayores, traza y REE. En las Fig. 20, 21 y 22 se identifican cinco quimio-zonas QZ1, QZ2, QZ2, QZ3, QZ4 y QZ5 en orden estratigráfico ascendente.

3.1.4.2.2.1 Perfiles de elementos mayores

Los elementos mayores en QZ1 presentan tendencias aplanadas y particularmente picos en la facie ALFG con un incremento en Al y K por la existencia de feldespato, y P concentrado

en carbonatos que han precipitado en vetillas. QZ2 cambia la tendencia hacia fluctuaciones positivas de mayor valor en K y ligeramente en Al en relación a QZ1, asociadas directamente con las facies AkLF por su incremento en feldespato potásico, al contrario, los picos negativos relacionados con Ti, Mg, Mn, Fe y P que muestran las facies arenosas ALFG están vinculados a la reducción de minerales ferromagnesianos en comparación a QZ3 que presenta mayor contenido de éstos en brechas volcánicas (BV) y volcanosedimentos finos (DVF) por el aporte de una fuente andina volcánica. Las facies conglomeráticas CMC de QZ2 tienen picos positivos en Al y Ti por la matriz limo-arenosa que los constituyen; además, los clastos de andesitas y dacitas contienen minerales ferromagnesianos explican los picos de Mg y Fe.

La transición de QZ2 a la quimio-zona QZ3, por su parte, muestra un incremento de Al y Ti en las capas rojas (RB) y una reducción de Si debido a que se componen de material arcilloso y limoso con afinidades hacia minerales pesados, mientras que el pico en Fe apunta hacia lutitas ferruginosas (Fig. 19b).

QZ4 muestran diversas fluctuaciones por las continuas intercalaciones de capas rojas (RB) tanto con AkLF como con AkMG con picos positivos en K y Al debido a la presencia de feldespatos en estas arcosas; particularmente, el Si registra picos no solo por el material silíceo de dichas areniscas feldespáticas, sino también por las vetas de cuarzo que atraviesan estas facies.

Por su parte, QZ5 muestra importantes variaciones en Si al tratarse de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso (AMG). La relación con Al es inversa, por lo que los picos negativos de Si corresponden a picos positivos de Al, al igual que Ti, lo que se debe al contenido de arcillas y limos que intercalan las areniscas de las facies AFLL y AML. La facie conglomerática fina CFM, es menos silícea y también indica una reducción de Mn y Fe.

El contenido de Mg muestra un incremento en las quimio-zonas QZ1, QZ2, QZ3 y se corresponde con las curvas de Fe, puesto que las facies de la Fm. Chapiza son más ferromagnesianas en relación con Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill, debido a que proviene de una fuente andina volcánica (Fig. 17). Por su parte, QZ5 ocasionalmente presenta nódulos de siderita en las facies AMG (Fig. 15) a la base de Hollín Inferior, lo que sugeriría un aumento en Fe y Mg.

Las curvas de Ca son un caso particular debido a que no representa el tipo litológico total, sino al relleno de poros con precipitados de fluidos de composición carbonatada. En contraste, la curva de P no se relaciona con fosfato biogénico como lo es habitualmente, sin embargo, se concentra en minerales pesados como monacita y apatito, y principalmente en minerales arcillosos e incluso carbonatos, de las facies de los miembros de la Fm. Chapiza. Mientras que, el Mn es indicador de facies arcillosas con predominio en AVF y la Fm. Chapiza.

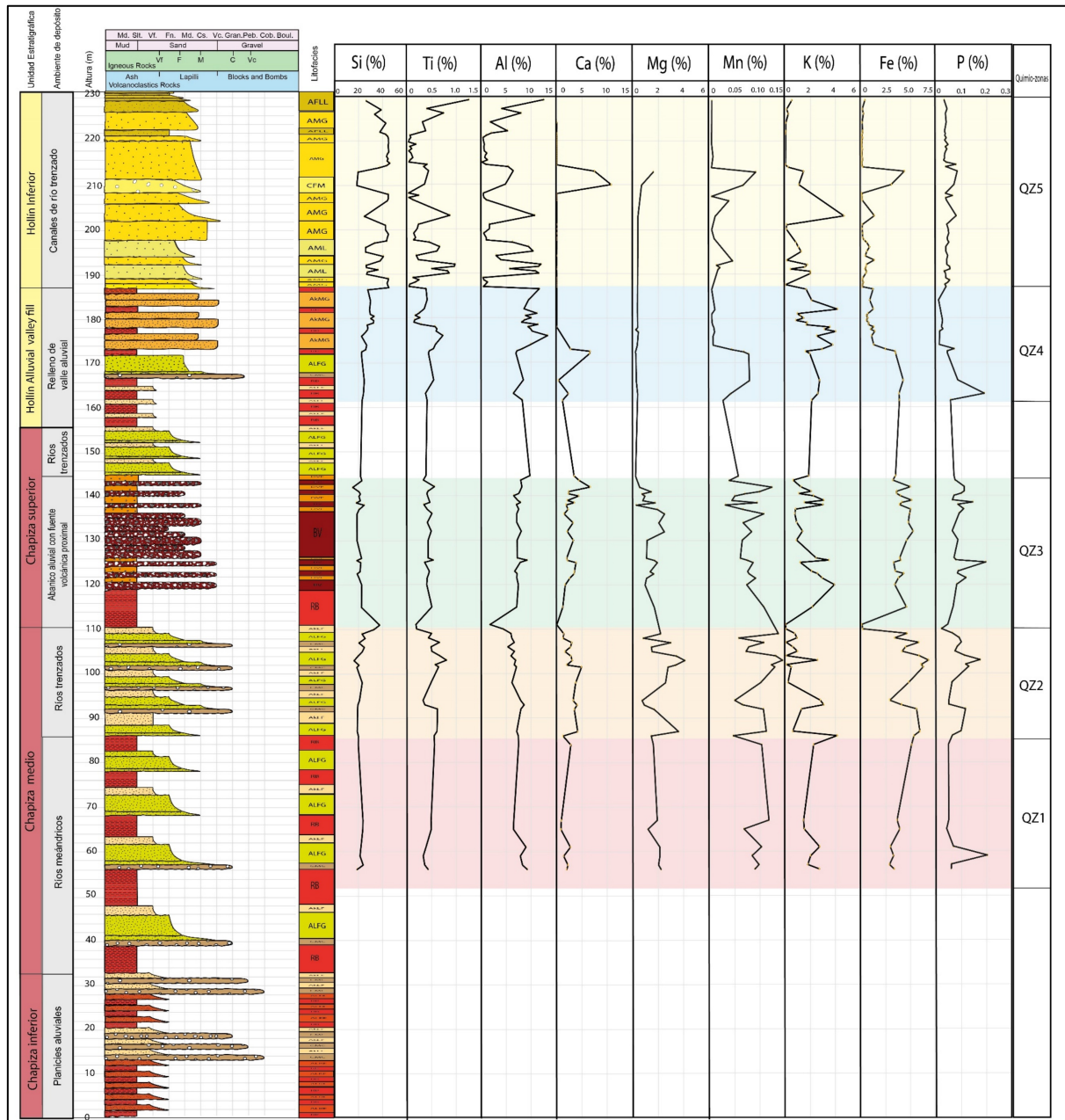


Fig. 20: Perfiles de elementos mayores trazados para la columna estratigráfica de la Fm. Hollín Inferior, Alluvial Valley Fill y Chapiza.

3.1.4.2.2 Perfiles de elementos traza y REE

La Fig. 21 muestra un grupo selecto de elementos traza y REE con composiciones significativas en los resultados obtenidos de XRF. Los elementos clave para análisis de proveniencia son los que tienen mayor probabilidad de asociarse casi exclusivamente con minerales pesados e incluyen Zr, Ti, Nb, Cr, Y, Th y HREE. Estos son considerados elementos que no se ven afectados en gran medida por meteorización depositacional/diagénesis, ya que son fuertemente inmóviles (Craigie, 2018). Otros elementos como V, Mo, Ni, Cu, Co y Zn, se analizan en esta sección por ser sensibles a redox. La afinidad mineralógica de estos minerales se detalla en el Anexo I.

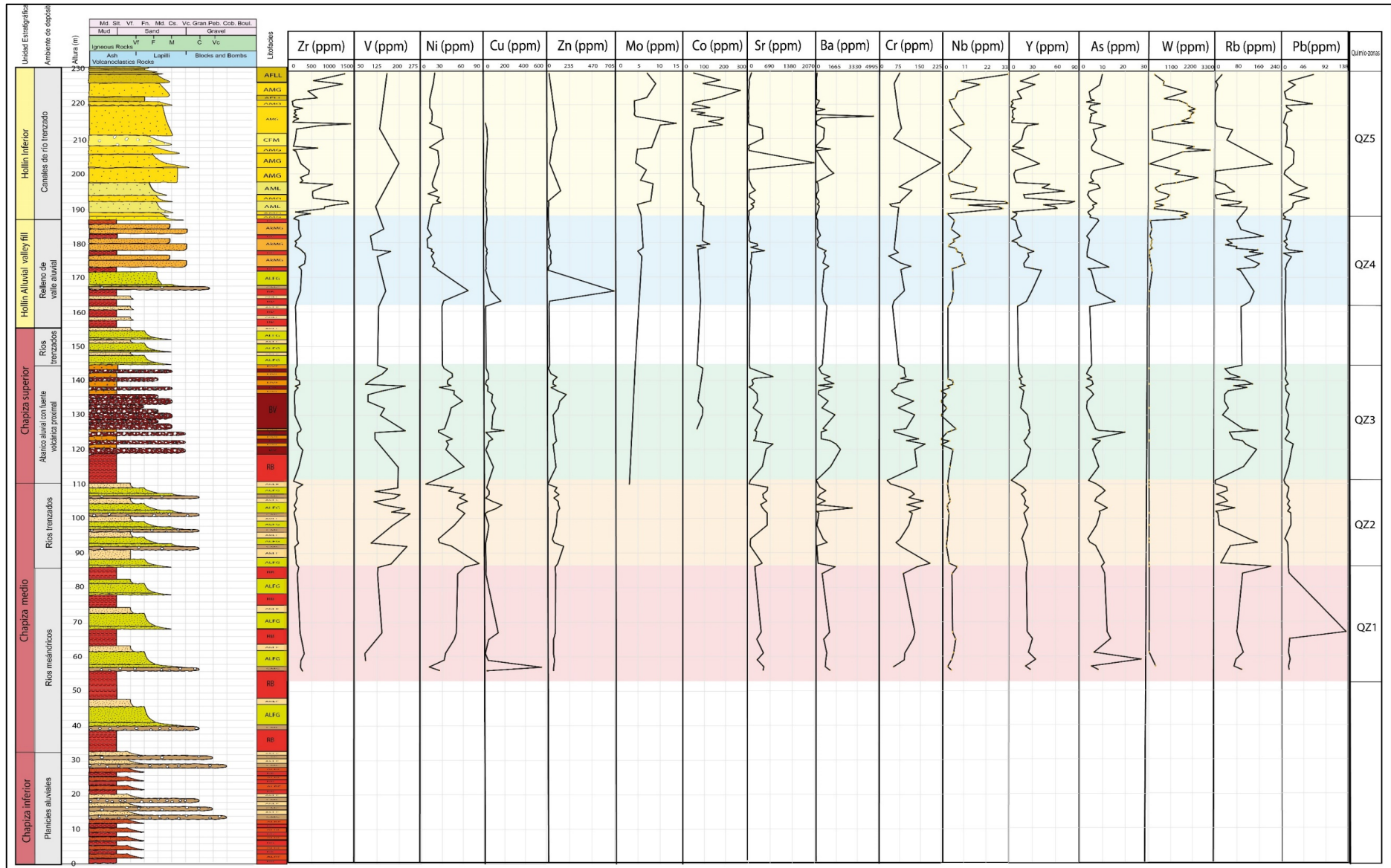


Fig. 21: Perfiles de elementos traza para la columna estratigráfica de la Fm. Hollín Inferior, Alluvial Valley Fill y Chapiza

Las cinco quimio-zonas definidas en la Fig. 20 marcan los mismos límites de los perfiles de elementos traza y REE. La quimio-zona QZ1 muestra curvas con composiciones significativas continuas de Sr y Rb en todo el intervalo y tiene afinidad con feldespatos, minerales de arcilla, micas e inclusive carbonatos en el caso del Sr. Los picos importantes de As en la litofaciedad ALFG, se relacionan metales como el Cu, que se encuentra en las vetillas de carbonato, más no con arcillas por la reducción de Rb en esta misma facie.

QZ2 presenta notables picos en las curvas de V y Ni que se corresponden entre sí, indicando posibles condiciones óxicas en la depositación, mientras que los picos en Rb y Sr sobre todo en las facies AkLF están ligadas a la composición de feldespatos potásicos que supera a las arcosas AkMG de QZ4 en donde los picos positivos composicionales son más bajos.

Las fluctuaciones de QZ3 y QZ2 son muy similares, sin embargo, el límite quimio-estratigráfico entre ambas zonas se define por el pico negativo bastante evidente entre las arcosas AkLF y los materiales finos de Red Beds, principalmente en V, Ni, Sr, Ba, Cr, Y, As y Rb. Particularmente, V y Ni en las litofacies de QZ3 se mantienen variando como en QZ2, indicando que las condiciones paleorreodox fueron las mismas que los niveles estratigráficos más bajos. Los materiales volcánicos y volcanoclásticos de este nivel tienen en su matriz material de tamaño arcilla que en podría tratarse de caolinita de acuerdo con la composición de Al (Fig. 23), o a su vez illita por la concentración de K.

Las quimio-zonas QZ4 y QZ5 muestran un aumento en Zr, Mo, Co, Cr, Nb, Y, y Rb indicando que las areniscas de Hollín Inferior, y las arcosas y capas rojas de Alluvial Valley Fill, que presentan niveles finos, tienen mayor afinidad con elementos pesados como zircón, rutilo, monacita, Branti y Apatito, provenientes de una fuente cratónica (Fig. 17).

Las curvas de V y Ni se corresponden entre sí, como lo hace Cu y Zn, para mostrar las condiciones oxidantes del ambiente de depósito, al igual que Mo y Co a pesar de no presentar concentraciones en QZ1 y QZ2.

El Ba no constituye un elemento clave para la determinación de proveniencia. Su aparición en resultados geoquímicos habitualmente está relacionado a contaminación en aditivos de perforación (barita), sin embargo, en el caso actual la perforación no incluyó aditivos, por lo que sus altas concentraciones pueden explicarse a que estuvo disuelto en el agua y se combinó rápidamente con sulfato o carbonato, que ocurren naturalmente en el agua y se transforma a sulfato de bario (barita) y carbonato de bario que son los compuestos de bario que se encuentran con mayor frecuencia en el suelo y el agua.

La existencia de As se explica con la fuente volcánica de la que provienen varios de los minerales que se distribuyen tanto en Hollín Inferior como en Alluvial Valley Fill y Chapiza en

donde muestra un pico importante en los volcánicos del miembro Chapiza Superior.

Las concentraciones de Pb en presente estudio no se vinculan a la presencia de sulfuro de plomo, la galena, y otros minerales como carbonato de plomo o cerusita, sino que se encuentra asociado a varios minerales de U y Th, ya que proviene directamente de la desintegración radiactiva (Fig. 23)

Finalmente, el W muestra elevadas concentraciones en la quimio-zona QZ5, alcanzando incluso 3102 ppm, producto de la presencia de minerales pesados como wolframita asociada fuertemente con cuarzo, el mismo que se encuentra en abundancia en las litofacies cuarzosas de Hollín Inferior, así mismo, se corresponde con los espectros de Co y Mo, con los que también tiene afinidad. También es importante considerar que la molienda en Carburo de Tungsteno (revisar sección 2) suele representar ejemplos de contaminación, por lo que no se recomienda el análisis completo del W para propósitos quimio-estratigráficos.

3.1.4.2.2.3 Perfiles de Synthetic Gamma Ray y ratios de elementos

Los ratios normalmente involucran elementos asociados con minerales pesados (Craigie, 2018) y en casi todos los estudios realizados sobre sedimentos clásticos, se utilizan para reconocer quimio-zonas y modelar fuente/proveniencia, así como tamaño de grano, ambiente depositacional y/o meteorización/diagénesis, paleorredox, humedad, entre otros (Tabla 1).

La relación Si/Al es un buen indicativo de tamaño de grano ya que el Si se concentra en cuarzo, mientras que Al está asociado con minerales arcillosos. Por el contrario, las tendencias trazadas para Ti/Al son muy similares, sugiriendo una relación inversa entre Ti y tamaño de grano, ya que Ti normalmente se concentra en minerales pesados que generalmente se encuentran asociación con Al en las fracciones de arcilla, limo y finos. Por otro lado, los ratios de Zr/Th, Nb/Ti, Nb/Y, Rb/K y Zr/Ti están vinculados a la determinación de la fuente/proveniencia; mientras que, la relación V/Cr se asocia a los cambios en las condiciones paleorredox al igual que Ni/Co, y Mg/Ca a las condiciones de humedad.

En este estudio, las altas proporciones de Si/Al se concentran en las facies cuarzosas de Hollín Inferior, lo que corresponde a tamaño de grano mayores y menor proporción de material fino en relación a AVF y Chapiza, lo que a su vez se evidencia con los bajos valores de Ti/Al. Los ratios Zr/Th, Nb/Ti, Nb/Y y Zr/Ti muestran una clara correspondencia en sus espectros; los picos más altos se ubican en QZ4 y QZ5, con mayor abundancia de minerales pesados, sobre todo zircón, rutilo y Branti en las areniscas AMG de Hollín Inferior.

Los bajos valores de Rb/K se mantienen a lo largo de todo el espectro, pero particularmente, en QZ2 esta relación incrementa debido al enriquecimiento en arcillas como illita respecto al feldespato potásico (Fig. 23). Los picos de V/Cr y Ni/Co muestran condiciones de depositación

oxidantes, con los valores más altos en los miembros de Chapiza y Alluvial Valley Fill, principalmente en las facies de Red Beds, y disminuyen hacia Hollín Inferior.

Finalmente, la relación Mg/Ca inferior a 2.5 de la Fm. Chapiza y AVF es típica de un clima seco. El pico producido a la base de Hollín Inferior sugiere un cambio hacia condiciones más húmedas en el entorno de deposición en un corto periodo de tiempo.

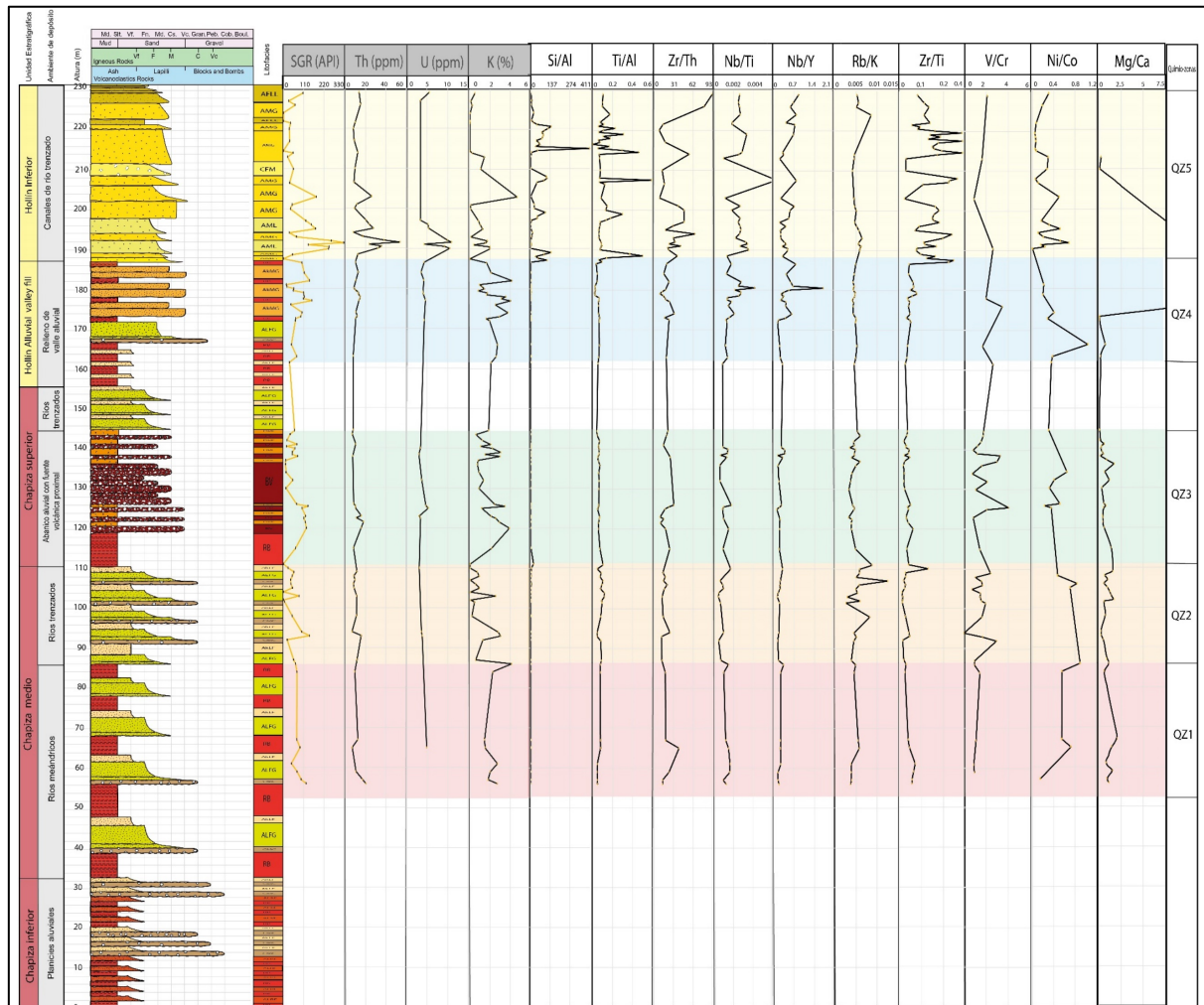


Fig. 22: Perfiles de Synthetic Gamma Ray (SGR), Gamma Ray Espectral (Th, U, K), y ratios de elementos clave trazados para la columna estratigráfica de la Fm. Hollín Inferior, Alluvial Valley Fill y Chapiza.

Otra verificación de la calidad de los datos implica el trazado de perfiles de rayos gamma sintético, análogos a los obtenidos con wireline en pozos, y son calculados mediante:

$$\text{SGR} = (16 \text{ K}) + (8 \text{ U}) + (4 \text{ Th})$$

Ecuación 1: Gamma Ray Sintético (Craigie, 2018)

Que permite grabar las concentraciones de masa individuales de los tres componentes radiactivos de la radiación gamma total: Th, U (en ppm) y K (en wt%) y son convertidas a unidades API (Ellis y Singer, 2007). Uno de los usos de esta descomposición es proporcionar una señal GR total menos la contribución de uranio, lo que puede representar un índice más representativo de los minerales arcillosos de la lutita, al eliminar efectos de las lutitas

orgánicas o del depósito de sales de uranio en las fracturas (Ellis y Singer, 2007).

De esta forma, la Fig. 22 ilustra los perfiles de la descomposición de Gamma Ray Sintético, en donde los valores más bajos de SGR coinciden con las facies arenosas, mientras que los picos positivos corresponden a las facies finas y mixtas. Particularmente, el pico más alto se encuentra a la base de Hollín Inferior, en la facie AML, que presenta menor contenido U y K pero un incremento en Th de hasta casi 60 ppm, y se debe a las intercalaciones de limos negros presentes en esta facie.

Del miembro Chapiza Medio a Hollín Inferior el contenido de K tiene diversas fluctuaciones desde 0-6% de contenido, mientras que Th y U muestran tendencias relativamente aplanadas en las quimio-zonas QZ1, QZ2, QZ3 y QZ4. De tal manera que, están influenciados en menor medida por U que tiene poca asociación con minerales arcillosos. Se puede ver que la actividad en la señal SGR se debió a fluctuaciones de K y Th. La Fig. 23 ayuda a la interpretación de la señal SGR.

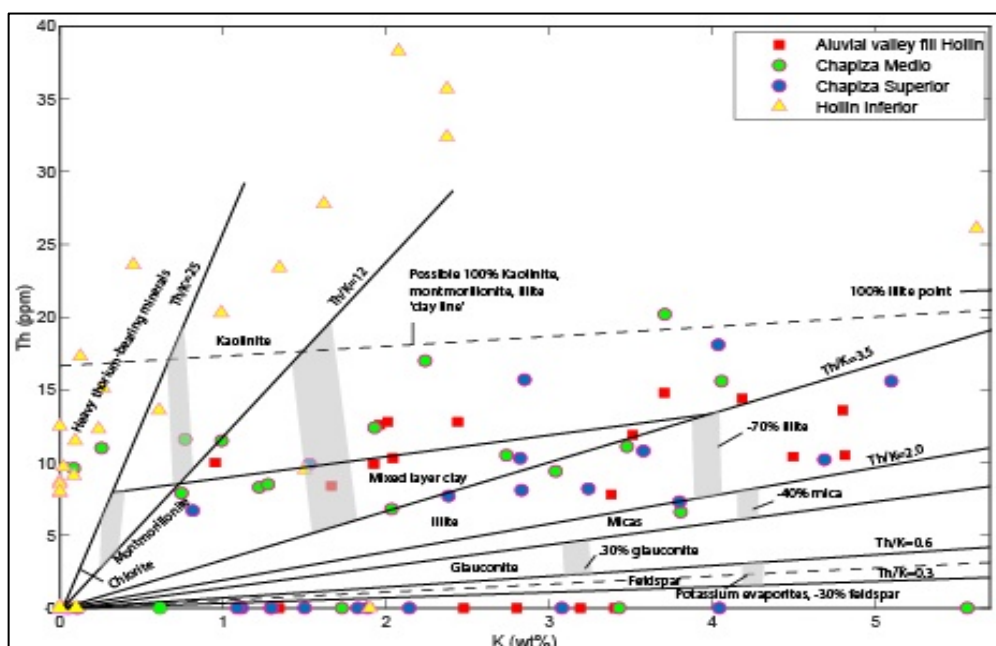


Fig. 23: Identificación de minerales de Th y K (Schlumberger, 1985)

Las muestras de Hollín Inferior indican que el contenido de Th y K está relacionado con arcilla caolinita y minerales pesados de Th como zircón, monacita y apatito. Por otro lado, las muestras de Alluvial Valley Fill tiene mayor dispersión que en el primer caso, y cinco de ellas están relacionadas con illita, y las restantes con una mezcla de arcillas caolinita, montmorillonita e illita, al igual que los miembros Chapiza Medio y Superior que inclusive dos de sus muestras se asocian con micas. Las muestras con nulo contenido de Th y un contenido variable de K se ubican en el campo de los feldespatos.

3.1.4.2.2.4 Interpretación de quimio-zonas

Las cinco quimio-zonas definidas de acuerdo con las variaciones en las curvas de elementos

mayores, traza, REE, Gamma Ray Sintético y ratios de elementos, son la respuesta geoquímica de la litología de cada Formación.

Una vez integrada la información estratigráfica, sedimentológica y geoquímica quedan definidos los cambios en el ambiente de sedimentación de la Formación Chapiza y la sección inferior de la Formación Hollín (Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill).

La quimio-zona QZ1 corresponde a un ambiente de depositación de río meándrico, que conjuntamente con QZ2 de un ambiente de ríos trenzados, constituyen al miembro Chapiza Medio. La geoquímica de la quimio-zona QZ3 constituye al ambiente de abanico aluvial con fuente volcánica proximal del miembro Chapiza Superior.

El relleno de valle aluvial de Hollín Alluvial Valley Fill Member se describe por las fluctuaciones correspondientes a la quimio-zona QZ4; mientras que, QZ5 por su parte, constituye el ambiente de canales fluviales de Hollín Inferior.

La dificultad de muestreo en la transición de Chapiza Superior a Alluvial Valley Fill no permitió definir una nueva quimio-zona, sin embargo, al tratarse de un ambiente de río trenzado al igual que Chapiza Medio, se esperarían fluctuaciones similares. Así mismo, la base de la Fm. Chapiza correspondiente al miembro Chapiza Inferior, no constituye ninguna quimio-zona por ausencia de muestreo, no obstante, está formada de capas rojas, niveles de arcosas y conglomerados igualmente presentes en los miembros suprayacentes, por lo que la firma geoquímica mostraría similares tendencias.

3.1.4.2.3 Modelo en Proveniencia

Los minerales pesados detallados con las concentraciones de los elementos en las secciones anteriores, al no verse afectados en gran medida por meteorización depositacional / diagénesis, permiten el análisis de proveniencia de los sedimentos que los contienen.

El presente trabajo concuerda con la información de Vallejo et. al (2021) que determinan mediante la Fig. 17, que para la Fm. Chapiza, las muestras analizadas presentan un índice Zircón-Turmalina-Rutilo (ZTR) alto de 37-39%, junto con altas cantidades de minerales volcánicos, apatita (10–12%), piroxenos (8–10%), hornblenda (3–5%), y menores cantidades de minerales metamórficos (6–8%). La asociación de estos minerales sugiere un importante aporte de una fuente ígnea, específicamente de fuente andina volcánica.

Alluvial Valley Fill muestra un índice ZTR de 23%, minerales volcánicos como apatita (12–16%), olivino (3–4%), piroxeno (15–20%) y hornblenda (9 – 10%). Y en menor medida

minerales metamórficos (7 – 8%). Esta asociación mineralógica sugiere una fuente mixta (andina metamórfica y volcánica) con una entrada volcánica que domina.

Hollín Inferior, presenta un índice ZTR que varía entre 45 - 53%. Los minerales volcánicos disminuyen, incluyendo apatita (6–11%), piroxeno (2–8%) y hornblenda (2–8%). Como también lo hacen los minerales metamórficos (1–3%). Para esta asociación mineralógica sugieren una fuente cratónica dominante con un menor input volcánico y metamórfico.

3.1.4.2.4 Fuente

Las asociaciones minerales (Apatito, biotita, brookita, hornblenda, monacita, rutilo titanita, turmalina, zircón) descritas en el análisis de proveniencia y en la Tabla 4 indican una fuente andina volcánica para la Fm. Chapiza, una fuente mixta con una entrada volcánica dominante para Alluvial Valley Fill, y una fuente cratónica dominante con input volcánico y metamórfico bajo para Hollín Inferior. Por lo que en el diagrama clasificatorio de rocas volcánicas de Floyd y Leveridge (1987) y de Winchester y Floyd (1977) se ubican todas las muestras tomadas para determinar la composición de la que derivan.

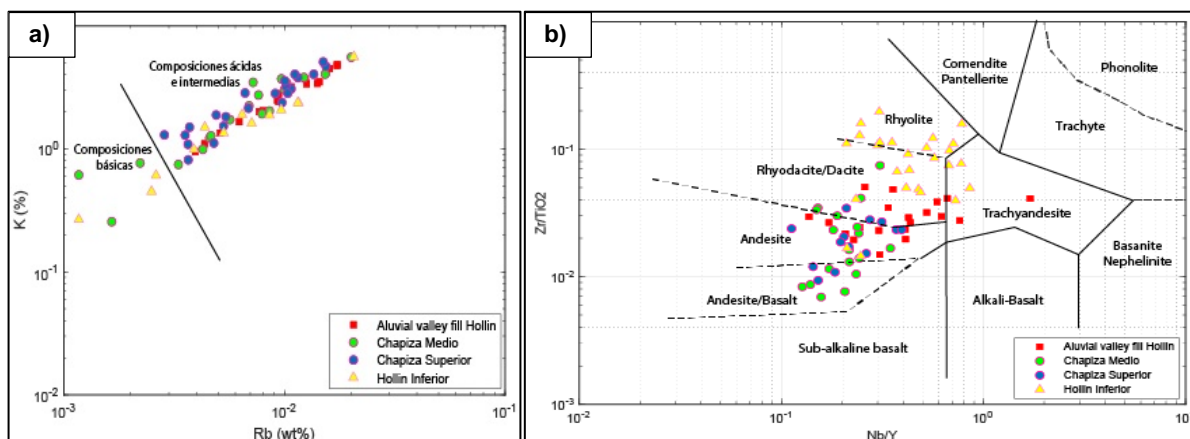


Fig. 24: Clasificación de las muestras analizadas de la Formación Chapiza, Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill y la afinidad litológica con la fuente de los sedimentos definida en este trabajo, mediante: **a)** Distribución de K y Rb en las rocas analizadas (Floyd y Leveridge, 1987). **b)** Diagrama bivariado Zr/TiO_2 vs. Nb/Y (Winchester y Floyd, 1977).

Las cuatro Unidades del estudio presentan componentes volcánicos y metamórficos, en mayor o menor medida; la Fig. 24 muestra la afinidad litológica con la fuente de los sedimentos preferencialmente volcánicos, sin embargo, el componente metamórfico se asume proviene de un protolito de composición análoga a la volcánica. En la distribución de K vs. Rb se aprecia de manera general una localización preferencial en el campo de las rocas con composición intermedia a ácida, a excepción de tres muestras de Hollín Inferior y tres de del miembro Chapiza Medio (Fig. 24a).

De acuerdo con las relaciones de Zr/TiO_2 y Nb/Y las rocas correspondientes a Alluvial Valley

Fill provienen predominantemente de una fuente andesítica hacia riodacítica/dacítica. Los miembros de la Fm. Chapiza son principalmente de composición intermedia a intermedia/básica y se encuentran distribuidas entre andesitas y andesitas basálticas; particularmente, los depósitos volcanoclásticos finos (DVF) y brechas volcánicas (BV) de del miembro Chapiza superior (Tabla 2) incluyen clastos de andesita y andesita basáltica, que explican la ubicación de dichas muestras en estos campos. Mientras que, las muestras de Hollín Inferior se corresponden a una fuente cratónica con input de sedimentos de composición intermedia a intermedia/ácida, es decir entre riodacita/dacita a riolita.

Las muestras que se ubican el campo de traquiandesita presentan mayor contenido de feldespatos alcalinos y augita, en relación con las demás de su unidad respectivamente.

Tabla 4: Asociaciones más significativas de minerales pesados relacionadas con determinados tipos de rocas de procedencia, propuestas por Feo-Codecido (1956). Modificado de Pettijohn et al. (1972)

Asociación	Área fuente
Apatito, biotita, brookita, hornblenda, monacita, rutilo titanita, turmalina (rosa), zircón	Rocas ígneas ácidas
Casiterita, dumortierita, fluorita, granate, monacita, moscovita, topacio, turmalina (azul), wolframita, xenotima	Pegmatitas graníticas
Augita, cromita, dióxido, hiperstena, ilmenita, magnetita, olivino, picotita, pleonasta	Rocas ígneas básicas
Andalucita, condrotita, corindón, granate, flogopita, estauroлита, topacio, vesuvianita, wolastonita, zoisita	Rocas de metamorfismo de contacto
Andalucita, cloritoide, epidota, granate, glaucófana, cianita, sillimanita, estauroлита, titanita, zoisita-clinozoisita	Rocas de metamorfismo dinamoтérnico
Barita, óxidos-hidróxidos de hierro, leucoxeno, rutilo, turmalina (granos redondeados), Zircón (granos redondeados)	Sedimentos reciclados

3.1.4.2.5 Ambiente de depositación

El diagrama ternario de $MgO-Fe_2O_3-(SiO_2/Al_2O_3)$ categoriza y discrimina el ambiente de depositación de rocas siliciclásticas. Las muestras se distribuyen en el campo de sedimentos no marinos (Fig. 25), y se basa en el supuesto de que la mezcla de MgO , Fe_2O_3 y SiO_2/Al_2O_3 está relacionada con la presencia de aluminosilicatos y sílice no biogénico contenidos en detritos terrígenos.

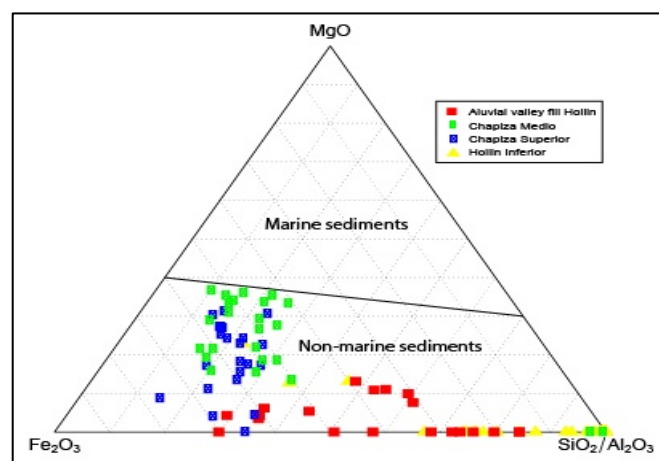


Fig. 25: Clasificación de las muestras analizadas de la Formación Chapiza, Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill y los tipos litológicos definidos en este trabajo, mediante **b)** Diagrama ternario $Fe_2O_3-MgO-SiO_2/Al_2O_3$ de discriminación de sedimentos marinos y no-marinos (Ratcliffe et al., 2007)

La mayor variación de Fe_2O_3 y MgO está vinculada a los miembros de la Fm. Chapiza, que además muestran menor contenido de SiO_2 con pequeñas variaciones entre sí. El caso de Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill difiere de la Fm. Chapiza a razón de mayores cambios en la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; particularmente, Hollín Inferior se concentra en el extremo silíceo de acuerdo con las areniscas cuarzosas media a gruesas, mientras que las muestras principalmente de Alluvial Valley Fill se reducen en la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ por el aumento de aluminosilicatos de minerales de arcilla (Fig. 21).

3.1.4.2.6 Cambios en Paleorredox

Los elementos afectados por cambios en paleorredox son normalmente Mn, Mo, Cu, Ni, Co, Zn, P y U (Craigie, 2018). Los gráficos binarios de la Fig. 26 son utilizados para evaluar las condiciones paleorredox; en este sentido, Mo vs. Ni/Co agrupa a las muestras en condiciones óxicas. Mientras que V/Cr vs. Ni/Co, indica que los sedimentos de tipo no-marino (Fig. 25) fueron depositados en un ambiente bajo condiciones oxidantes a disóxicas

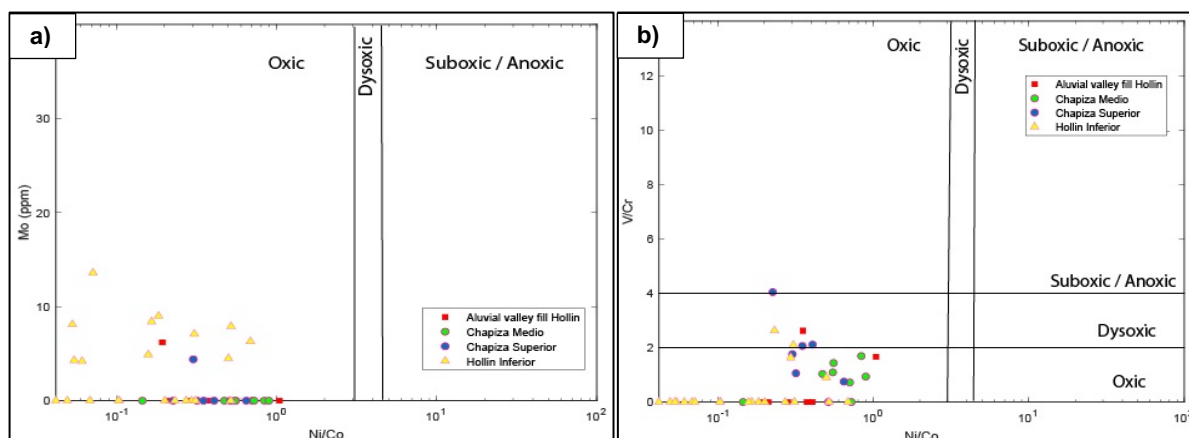


Fig. 26: Clasificación de las muestras analizadas de la Formación Chapiza, Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill y sus cambios paleorredox en el ambiente definidos en este trabajo, mediante los diagramas bivalentes: **a)** Mo Vs. Ni/Co; **b)** V/Cr vs. Ni/Co (Rimmer, 2004)

Si se analiza la evolución del ambiente, pareciera apreciarse algunas inconsistencias en los resultados. Evaluando las Fig. 22 y 26 en relación a los índices de la Fig. 27, se evidencia que Ni/Co cuyos valores obtenidos son <1 , indica que la cuenca se encontraba en un ambiente óxico durante de la depositación de la Fm. Chapiza a Hollín Inferior. Mientras que el índice V/Cr <2 indica iguales condiciones óxicas, sin embargo, hay muestras que se distribuyen entre valores 2-4 dentro del campo de ambiente disóxico, lo que sugiere que la cuenca ha transitado en períodos cortos, desde una condición óxica a disóxica durante el Jurásico Superior al Cretácico Inferior. Estas discrepancias pueden presentarse por factores como el tamaño de grano y el contenido de carbonatos de los sedimentos que pueden alterar los valores de los índices de paleoxigenación (Ernst, 1970). Con lo que se concluye que se requieren de otros antecedentes para caracterizar las condiciones del ambiente depositación.

Algunos factores descritos en Craige (2018) que también deben ser considerados para determinar si las condiciones de depósito corresponden a ambientes óxicos son:

- El color registrado en las lutitas varía entre gris claro, verde, rojo y violeta.
- El empobrecimiento en U, V, Cu, Co, Mo, Zn y Ni generalmente tipifica abundancia de O. El Cr puede también usarse para este propósito, pero se debe tener en cuenta que este elemento es relativamente estable y mucho menos susceptible a cambios en paleorredox
- Ausencia de fósiles y materia orgánica.

Estos factores guardan relación con las descripciones petrográficas y geoquímicas de las muestras del presente estudio, por lo que la Fm. Chapiza, Alluvial Valley Fill y Hollín Inferior se depositaron en condiciones óxicas, típicas de un clima árido o seco, así como lo indica la relación $Mg/Ca < 2.5$ de la Fig.22.

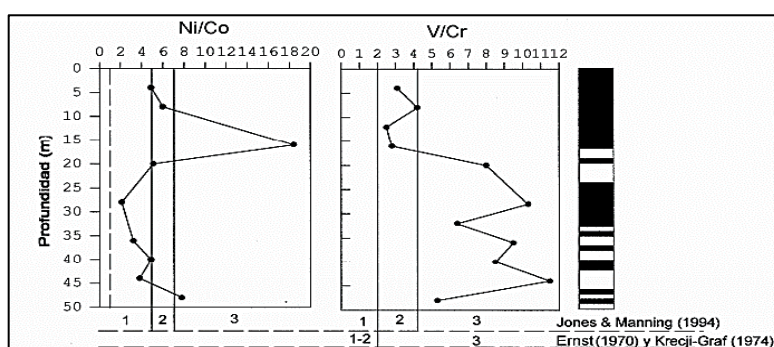


Fig. 27: Índices Ni/Co y V/Cr en uno de los testigos de Valdés et al. (2000). Se ilustra la clasificación para cada índice: 1 óxico, 2 disóxico, y 3 subóxico/anóxico. La línea discontinua en Ni/Co corresponde a la relación que tiene en la pirita, típica de ambientes reductores (Jones y Manning, 1994). La terminología empleada referente a la oxigenación corresponde a Tyson y Pearson (1991).

3.1.4.2.7 Meteorización

Si bien se aprecia que las muestras de Hollín Inferior poseen un mayor nivel de meteorización con valores mayores a 4 en la relación Th/U, al igual que dos muestras de la Fm Chapiza. La creciente tendencia a la meteorización de Hollín Inferior ocurre sobre todo en minerales con elementos móviles como el K en los feldespatos, que llegan a convertirse en minerales de arcilla, por su alta movilidad.

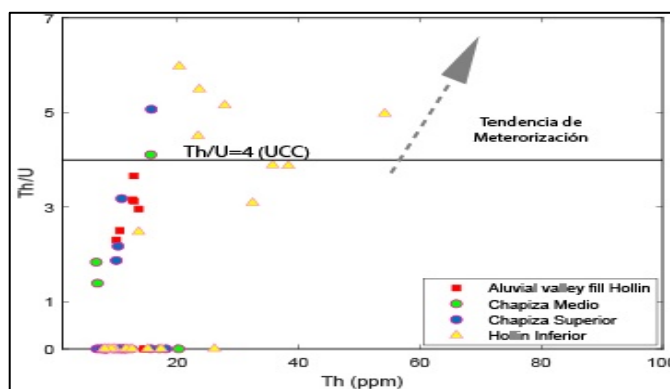


Fig. 28: Clasificación de las muestras analizadas de la Formación Chapiza, Hollín Inferior y AVF y su tendencia a la meteorización mediante el diagrama bivariable Th/U vs. Th (McLennan et al., 1993)

3.2 Conclusiones

- En el estudio del afloramiento del corte Coca-Codo Sinclair de la Fm. Chapiza y la sección inferior de Hollín (miembro Alluvial Valley Fill y Hollín Inferior), se identificaron 12 facies, entre las que se distinguen, 2 facies conglomeráticas CFM y CMC; 5 facies arenosas AFLL, AML, AMG, ALFG y ALRF; una facie limosa-lodosa RB; 2 facies arcóscicas AkMG y AkLF; una facie volcanoclástica DVF; y una facie volcánica BV.
- Debido a que el Miembro Chapiza Inferior se encuentra cubierto por abundante vegetación, la exposición de sus facies y geometrías, y consecuentemente el muestreo de la secuencia completa de la Fm. Chapiza se vio afectado; sin embargo, la información de IIGE (2020) en el mismo afloramiento, que detalla estratos mantiformes, canalizados, cóncavos y rellenos de las facies CMC, AkLF, y RB, permite sugerir un ambiente de planicies aluviales. Respecto a la geoquímica de este miembro, se infieren comportamientos cercanos a los espectros de la quimio-zona QZ1, por la similitud en sus facies.
- Las facies RB, ALFG, AkLF y CMC son parte del miembro Chapiza Medio y se interpretan como un ambiente fluvial, en el que se distingue una arquitectura de río meándrico como trezado, que corresponden a las quimio-zonas QZ1 y QZ2 respectivamente.
- El miembro Chapiza Superior correspondiente a un ambiente fluvio-aluvial dividido en dos subambientes: a la base, los sedimentos terrígenos de las facies RB, DVF y BV, se refieren a una arquitectura de un abanico aluvial con proximidad a una fuente volcánica por los niveles de volcanosedimentos. Dicho subambiente corresponde a la quimio-zona QZ3. La similitud de las facies CMC, ALFG y AkLF al tope de este intervalo, con las facies de del miembro Chapiza Medio sugieren la influencia de un río trezado; a pesar de que no le fue asignada una quimio-zona por ausencia de muestreo, se esperarían espectros similares a los de QZ2.
- Las capas rojas (RB), y las facies AkLF, CMC, ALFG y AkMG corresponden a un ambiente de relleno de valle aluvial, del miembro Alluvial Valley Fill (quimio-zona QZ4) que consta de depósitos de canal fluvial y lutitas de planicie de inundación en un paleovalle.
- Hollín Inferior está dominado por arenas de las facies AMG, AML, AFLL y CFM, de un río trezado de carga mixta, en el que sobresalen canales cóncavos rellenos de barras fluviales apiladas lateral y verticalmente.
- En el análisis geoquímico se aprecian variaciones composicionales entre las rocas de diferentes tamaños de grano, así como por el tipo de litología, esencialmente, sobre la base de las proporciones de Fe_2O_3/K_2O y SiO_2/Al_2O_3 con la que se ha logrado una clara discriminación entre lutitas/limolitas y lutitas ferruginosas que dominan la Fm. Chapiza; cuarzoarenitas, sublitoarenitas, litoarenitas, subarcosas y arcosas de Hollín Inferior; y, arcosas y lutitas de Alluvial Valley Fill. El Si y los componentes inmóviles tales como Th,

Zr, W, Nb e Y se presentan con mayores proporciones en las areniscas de Hollín Inferior; en tanto que el Sr por su afinidad con el Ca aumenta su proporción en las facies lodosas/limosas de la Fm. Chapiza y aquellas muestras con vetillas de relleno carbonático. Los valores elevados de Al, Ti y Rb se explican por la presencia de minerales de arcilla, algunas encontradas en las capas finas de la Fm. Chapiza y AVF, y otros de ellos por alteración de componentes primarios como K en las areniscas de Hollín Inferior. Las concentraciones de Pb se encuentran asociadas a varios minerales de U y Th, ya que proviene directamente de la desintegración radiactiva, como en arcillas y limos que muestran mayores fluctuaciones positivas en las quimio-zonas QZ1, QZ2, QZ3 y QZ4 en el Gamma Ray sintético y espectral, y en la particular en la facie AML de QZ5 por la abundancia de limos negros que intercalan dichas areniscas de Hollín Inferior.

- El análisis geoquímico de elementos con afinidad hacia minerales pesados define un aporte de sedimentos relacionado con una fuente andina volcánica dominante en la Fm. Chapiza; una mezcla de fuente andina metamórfica y volcánica dominante para el miembro Alluvial Valley Fill; y, una fuente cratónica dominante con un menor aporte volcánico y metamórfico para Hollín Inferior. Los sedimentos relacionados con procedencia volcánica están vinculados al arco volcánico continental contemporáneo de Misahuallí.
- Las facies provenientes de la fuente volcánica son el producto de la erosión de un arco volcánico de composición intermedia-básica a intermedia-ácida, que indican que el set de muestras analizadas del miembro Alluvial Valley Fill corresponde a andesitas y riolitas/dacitas. Los miembros de la Fm. Chapiza son principalmente andesitas y andesitas basálticas. Mientras que, las muestras de Hollín Inferior provienen de una fuente de riolítica/dacítica a riolítica.
- La Fm. Chapiza, y los miembros Alluvial Valley Fill y Hollín Inferior de la Fm. Hollín se clasifican como sedimentos no-marinos, de ambiente fluvial y/o fluvio-aluvial, bajo condiciones oxidantes del Jurásico Superior al Cretácico Inferior que pudieron haber transitado a condiciones disóxicas en cortos periodos de tiempo. Las condiciones óxicas en la depositación de la Fm. Chapiza se reafirma con el color gris claro, rojo y violeta de las lutitas; con el empobrecimiento en U, V, Cu, Co, Mo, Zn, Ni y Cr; con la ausencia de fósiles y materia orgánica preservada; así como con los ratios $Ni/Co < 5$ y $V/Cr < 2$. Los datos de geoquímica ($Mg/Ca < 2.5$) indican también que las facies detríticas continentales de estas Formaciones fueron depositadas en un clima seco seguido durante la fase de del miembro Chapiza Superior por una actividad volcánica subaérea de Misahuallí muy intensa.
- La tendencia a la meteorización ($Th/U > 4$) disminuye en Chapiza y Alluvial Valley Fill, pero incrementa en Hollín Inferior sobre todo por la ocurrencia de elementos móviles como K

en los feldespatos.

- Los cambios en los ambientes de depositación son entendidos mediante la evolución del marco geodinámico durante el Jurásico Superior al Cretácico Inferior, en medio del cual se originan las Fm. Chapiza y los miembros Hollín Inferior y Alluvial Valley Fill. Durante el Jurásico Superior cuando la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana ocurría hacia el NE se habría formado el arco volcánico de Misahuallí; este episodio pudo haber provocado un tectonismo de tipo extensional, al cual están asociadas estructuras de semi-graben en el trasarco que fueron rellenadas parcialmente por depósitos clásticos del sistema fluvio-aluvial de la Fm. Chapiza (Vallejo et al., 2021) durante un período de regresión con un vulcanismo contemporáneo, en ~160 a 132 Ma. Le sigue un evento de deformación en el Cretácico Inferior (~120 Ma), que ocasiona el levantamiento y exhumación de las rocas pre-cretácicas de la Cordillera Real y la zona subandina, formándose la disconformidad angular y hiato depositacional entre la Fm. Chapiza y Hollín Inferior (Vallejo et al., 2021); luego de lo cual, tiene lugar la depositación del miembro Alluvial Valley Fill en abanicos aluviales derivados del oeste, al que le sigue el sistema fluvial trenzado de Hollín Inferior derivado principalmente del cratón Amazónico con una dirección NNW (Vallejo et al., 2021), probablemente desde el Aptiano durante una caída regional del nivel del mar (Haq et al., 1987).

3.3 Recomendaciones

- La mayor limitación de XRF es que los elementos más ligeros que Na (número atómico=11) no pueden ser analizados, por lo que se recomienda realizar análisis geoquímico complementario de XRD para distinguir con exactitud los compuestos sólidos de cada litología, inclusive los ensamblajes minerales con contenido de Na, ya que éste se considera en diferentes diagramas de discriminación de sedimentos.
- Realizar análisis petrográfico de láminas delgadas para complementar al análisis macroscópico y geoquímico, con la finalidad de obtener una descripción detallada y más general de la composición de los ensamblajes minerales.
- Levantar el estudio de las formaciones restantes que afloran en el corte Coca - Codo, para establecer una serie estratigráfica local completa.
- Ampliar el mismo análisis en diversos puntos aflorantes de la zona subandina y de la Cuenca para una reconstrucción regional más a detalle.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allaby, M. (Ed.). (2013). *A dictionary of geology and earth sciences*. Oxford University Press.
- Alvarado, A. (2012). *Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur*. Tesis Doctoral, Universidad de Grenoble, 259 p.
- Arche, A. (2010). *Facies, sedimentología y análisis de cuencas sedimentarias. Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, II, 15-52p
- Aspden, J., Rundle, C., Viteri, F., Bermudez, R., Harrison, S. (1990). *Edades Radiométricas del Batolito de Zamora - río Mayo*: Boletín Geológico Ecuatoriano, v, I, p. 85-88.
- Baby, P., Bernal, C., Christophoul, F., Valdez, A. (1998). *Modelo estructural y ciclos tectono-sedimentarios de la cuenca Oriente*. Convenio Petroproducción-ORSTOM, Informe interno, 77 p.
- Baby, P., Rivadeneira, M., Barragán, R. (2013). *La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo* (3 ed.). Quito, Ecuador: Travaux de l'Institut Francais des Etudes Andines
- Barragán, R., Ramírez, F., Baby, P. (1997). *Evidence o fan Intra-plate "Hot Spot" under the Ecuadorian Oriente basin during the Cretaceous Tectonic Evolution*. VI Simposio Bolivariano, Cartagena de Indias, Colombia.
- Barragán, R., Christophoul, F., White, H., Baby, P., Rivadeneira, M., Ramirez, F., Rhodes, J. (2004). *Sequential stratigraphy of the Cretaceous of the Eastern Basin of Ecuador*. In: Baby, P., Rivadeneira, M., Barragán, R. (Eds.), *The Eastern Basin: Geology and Oil*, 1GG. Travaux de l'Institut Francais des Etudes Andine, pp. 45–68
- Bridge, J. (1993). *The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers*. BestyBristow eds. Braided Rivers. Geol. Soc. London, Sp. Publ. 75, 13-71p
- Catuneanu, O, William, E., Christopher, G., Kendall, et al. (2011). *Sequence Stratigraphy: Methodology and Nomenclature*. Newsletters on Stratigraphy 44(3): 173–245.
- Christophoul, F. (1998). *Comisión Zona Gualaquiza, Carretera Méndez - Patuca - Santiago - Morona y Cerro Macuma*. Petroproducción – ORSTOM, 41p.
- Christophoul, F., Burgos, J., Baby, P., Soula, J., Bes De Berc, S., Dávila, C., Rosero, M., Rivadeneira, M. (2004). *Dinámica de la Cuenca de Ante-País Oriente desde el Paleógeno*. La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo: Trabajo del Instituto Francés de Estudios Andinos, tomo 144. 93-113

- Craigie, N. (2018). *Chemostratigraphy and its application in integrated reservoir correlation*. In Applied Techniques to Integrated Oil and Gas Reservoir Characterization (pp. 73-115). Elsevier.
- Díaz, M., Baby, P., Rivadeneira, M., Christophoul, F. (2004). *El Pre-Aptense en la Cuenca Oriente ecuatoriana*. En Baby, P., Rivadeneira, M. y Barragán R. La Cuenca Oriente: Geología y petróleo (pp. 31-52) Quito: Travaux de l'Institut Français d'Études Andines.
- Ellis, D., y Singer, M. (2007). *Well logging for earth scientists: Dordrecht The Netherlands: Springer Science and Business Media B.V*, p. 692p.
- Ernst, T. (1970). *Geochemical facies analysis*. 152 p. Elsevier Press, Amsterdam
- Escobar, V. (2016). *Generación de un Modelo Geológico de la Formación Hollín en un Campo del Bloque 61 de la Cuenca Oriente del Ecuador*. Quito: EPN. 231 p.
- Faucher, B., y Savoyat, E. (1973). *Esquisse géologique des Andes de l'Equator*. Revue géographie physique géologie dynamique. 15, 115-142.
- Feo-Codecido, G. (1956). *Heavy-mineral techniques and their application to Venezuelan stratigraphy*. AAPG Bull., 40, 984-1000.
- Floyd, P., y Leveridge, B. (1987). *Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones*. Journal of the Geological Society of London 144: 531-542.
- Freire, P. (2012). *Interpretación y uso de registros eléctricos a hueco abierto en el pozo XXX para encontrar arenas productoras a determinada profundidad en el campo Sacha*. Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Tecnólogo de Petróleos. Escuela de Tecnología de Petróleos. Quito: UTE. 171 p.
- Goldschmid, K. (1941). *Geological Compilation on the Cutucú - Macuma – Cangaima Region*. SHELL Geological Report, p. 131
- Goosens, P., y Rose, W. (1973). *Chemical composition and age determination of tholeiitic rocks in the Basic Igneous Complex, Ecuador*. Geological Society of America Bulletin, v. 84, 1043-1052p.
- Govett, G., y Nichol, I. (1979). *Litho geochemistry in mineral exploration; in Geophysics and Geochemistry in the Search of Metallic Ores*; Peter J. Hood, editor; Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, p. 339-362

- Griem, W. (2020). *Apuntes Geología: Sedimentología - Ambiente terrestre*. Geovirtual2.cl. <https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap05a.htm>
- Gutscher, M., Malavieille, J., Lallemand, S., Collot, J. (1999). *Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision*. Earth and Planetary Science Letters, 168(3), 255-270.
- Hall, E., Buchar, A., Bonham-Carter, F. (2012). Camiro Project 10E01 (Phase 1). *Quality Control Assessment of Portable XRF Analysers: Development of Standard Operating Procedures, Performance on Variable Media and Recommended Uses*. Canadian Mining Industry Research Organization
- Hall, M., y Calle, J. (1982). *Geochronological control for the main Tectono-Magmatic events of Ecuador*. Earth Science Review, v. 10, 215-239p.
- Haq, U., Hardenbol, J., Vail, R. (1987). *Chronology of sea levels since the Triassic*. Science, 235, 1156-1167.
- Herron, M. (1988). *Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data*. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 58, No. 5, 820-829.
- Holbrook, J. (2001). *Origin, genetic interrelationships, and stratigraphy over the continuum of fluvial channel-form bounding surfaces: an illustration from middle Cretaceous strata, south eastern Colorado*. Sed. Geol., 144, 179–222.
- IIGE. (2020). *Memoria técnica Del Mapa De El Reventador Escala 1: 100 000*. Quito-Ecuador.
- Jaillard E., Soler P., Carlier G., Mourier T. (1990). *Geodynamic evolution of the Northern and Central Andes during early to middle Mesozoic times: a Tethyan model*. Journal of the Geological Society, London, V. 147, 1009-1022
- Jaillard, E., (1997). *Stratigraphic and Sedimentological Synthesis of the Cretaceous and Paleogene of the Eastern Basin of Ecuador*. Final report of the Orstom-Petroproduction, Petroproduction, Quito, Ecuador, p. 158
- Jones B, y D Manning. (1994). *Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones*. Chemical Geology 111: 111-129.
- Juteau, T., Megard, F., Raharison, L., Whitechurch, H. (1977). *Les assemblages ophiolitiques de l'occident équatorien: nature pétrographique et position structurale*. Bulletin Societe Geologique de France, v. 19, 1127-1132p.

- Kerr, A., Aspden, J., Tarney, J., Pilatasig, L. (2002). *The nature and provenance of accreted oceanic terranes in western Ecuador: geochemical and tectonic constraints*. Journal of the Geological Society, 159(5), 577-594.
- Krecji-Graf K. (1975). *Geochemical facies os sediments*. Soil Science 119: 20-23.
- Lebrat, M., Megard, F., Dupuy, C., Dostal, J. (1987). *Geochemistry and tectonic setting of pre-collision Cretaceous and Paleogene volcanic rocks of Ecuador*. Geological Society of America Bulletin, v. 99, 569-578p.
- Litherland, M., Aspden, J., Jemielita, R. (1994). *The Metamorphic Belts of Ecuador*. Overseas Memoir No 11. 147.
- Litherland, M., y Aspden, J. (1992). *Terrane-boundary reactivation: a control on the evolution of the Northern Andes*: Journal of S. Am. Earth Sci., v. 5, 71-76p.
- Luzieux, D., Heller, F., Spikings, R., Vallejo, C., 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(3-4), 400-414.
- Madero, H., Rueda, J., Ortiz, A., Colegial, J. (2010). *Análisis Estratigráfico para las Arenas de la Formación Mugrosa en Área Piloto del Campo Llanito*. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/download/1007/3707?inline=1#:~:text=Los%20crevasse%20splay%20son%20ambientes,canal%20corresponden%20a%20dep%C3%B3sitos%20progradacionales>
- Mariño, E. (2015). *Identificación y caracterización de facies de la Formación Hollín en un afloramiento ubicado en el Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair, provincia de Napo*. Bachelor's thesis. Quito.
- Marocco, R. (2009). *Texto del curso dictado en abril-mayo del 2008 en el IRD de Lima*, disponible en: <http://ingenieriageofisica.com/introduccion-a-laestratigrafia-secuencial/>
- McLennan, S., Hemming, S., McDaniel, D., Hanson, G. (1993). *Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics*. Geological Society of America, Special Paper 284: 21-40
- Miall, A. (1985). *Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits*. Earth Sci. Rev., 22, 261-308.
- Miall, A. (1996). *The Geology of Stratigraphic Sequences*. Springer, Berlin. 433p

- Miall, A. (2014). *Fluvial depositional systems* (Vol. 14, p. 316). Cham: Springer International Publishing.
- National Cooperative Soil Survey. (2016). "Glossary of Landform and Geologic Terms" (PDF). National Soil Survey Handbook—Part 629.
- National Cooperative Soil Survey. (2016). "Glossary of Landform and Geologic Terms" (PDF). National Soil Survey Handbook—Part 629.
- Navarrete, E. (2017). *Apuntes de estratigrafía y sedimentación*. Escuela Politécnica del Litoral. Guayaquil. 232 p.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy*. 2nd ed. Chichester, UK; Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell
- Ordóñez, M., Jiménez, N., Suárez, J. (2006). *Ecuadorian micropaleontology*. Petroproduction. Cuito, Ecuador, p. D80.
- Pearce, T., Wright, D., Cope, S., Moody, R. (1993). *Chemostratigraphy: a new tool for the correlation of ancient sequences*. Abstracts; AAPG International Conference and Exhibition, The Hague, Netherlands, October 17-20, 1993. AAPG Search and Discovery Article #90900.
- Pettijohn, F., Potter, P., Siever, R. (1972). *Sand and Sandstones*. Springer-Verlag, Berlin.
- Potter, P. (1959). *Facies model conference*. Science 129, 1292-1294p
- Potter, P. (1978). *Petrology and chemistry of modern big river sands*. Journal of Geology, 86, 423–449.
- Ramírez, D. (2007). *Modelo depositacional de la Arenisca U en el centro Nor-occidente de la Cuenca Oriente*. Quito: EPN. 186 p.
- Ratcliffe, K., Morton, A., Ritcey, D., Evenchick, C. (2007). *Whole-rock geochemistry and heavy mineral analysis as petroleum exploration tools in the Bowser and Sustut basins, British Columbia, Canada*. Bull Can Petrol Geol 55(4):320–336
- Reading, H., y Levell, B. (1996). *Controls on the sedimentary record In: Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy* (Ed. Reading, H.G.). Blackwell Science, Oxford; 5–36
- Rimmer, S. (2004). *Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (U.S.A.)*. Chemical Geology 206: 373-391

- Rivadeneira, M., Baby, P. (1999). “*La Cuenca Oriente: Estilo tectónico, etapas de deformación y características geológicas de los principales Campos de Petroproducción*”, Resultado parcial en el marco del convenio de Petroproducción-IRD (EX – ORSTOM)., 88pp
- Rivadeneira, M., Baby, P., Barragán, R. (2004). *La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo*. Tomo 144 de la colección “Travaux de ‘Institut Français d’Études Andines” (3ra. Edición).
- Rivadeneira, M., y Sánchez, H. (1989). *Consideraciones Geológicas del Pre-aptense en la Cuenca Oriente*.
- Rollinson, H. (1993). *Using geochemical data. Evaluation, presentation, interpretation*, 1.
- Romero, C., Romero, D., Montesdeoca, V., Calero, E., Carrillo, V., Gramal, A. (2019). *Reconstruyendo el pasado del planeta: El registro estratigráfico y sedimentológico de la Formación Tena en la carretera Tiwintza–Puerto Morona*. Revista Científica GeoLatitud, 2(2), 2-13.
- Romeuf, N. (1994). *Volcanisme jurassique et metamorphisme en Equateur et au Perou, caracteristique petrographiques, mineralogiques et geochimiques, implications géodynamiques*. Doctor. Thesis. Universite Aix-Marseille III, p. 506
- Schlumberger. (1985). *Interpretation charts*. Schlumberger, New York
- Shanmugam, G., Poffenberger, M., Toro, J. (2000). *Tide dominated estuarine facies in the Hollin and Napo (“T” and “U”) formations (Cretaceous), Sacha field, Oriente Basin, Ecuador*. AAPG Bulletin, v. 84, 652-682p.
- Spalletti, L., Schwarz, E., Veiga, G. (2014). *Geoquímica inorgánica como indicador de procedencia y ambiente sedimentario en sucesiones de lutitas negras: los depósitos transgresivos titonianos (Formación Vaca Muerta) de la Cuenca Neuquina, Argentina*. Andean geology, 41(2), 401-435.
- Temitope D., y Timothy O. (2018). *Fluorescencia de rayos X (XRF) en la investigación de la composición de los materiales terrestres: una revisión y una descripción general*, *Geología, ecología y paisajes*, 2: 2, 148-154, DOI:10.1080/24749508.2018.1452459
- Trenkamp, R., Kellogg, J., Freymueller, J., Mora, P. (2002). *Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations*. J. S. Am. Earth. Sci. 15, 157-171
- Tschopp H. (1953). *Oil Explorations in the Oriente of Ecuador*. AAPG, Vol. 37 N°10, 2303-2347p.

- Tucker, M. (2003). *Sedimentary Rocks in the Field*. 3rd ed. The Geological Field Guide Series. West Sussex, England; Hoboken, NJ: J. Wiley
- Tyson, R., y Pearson, T. (1991). *Modern and ancient continental shelf anoxia: an overview*, 58: 1-24. En: R. Tyson and T. Pearson (eds), *Modern and ancient continental shelf anoxia*. Geological Society, London.
- Valdés, J., López, L., LoMónaco, S., Ortlieb, L. (2000). *Condiciones paleoambientales de sedimentación y preservación de materia orgánica en bahía Mejillones del Sur (23° S), Chile*. *Revista de biología Marina y Oceanografía*, 35(2), 169-180.
- Vallejo, C., Almagor, S, Romero, C, Herrera, J., Escobar, V., Spikings, R., Winkler, W., Vermeesch, P. (2019). *Sedimentology, Provenance and Radiometric Dating of the Silante Formation: implications for the Cenozoic Evolution of the Western Andes of Ecuador.*, *Minerals* 2020, 10, 929; doi:10.3390/min10100929
- Vallejo, C., Romero, C., Horton, B., Spikings, R., Gaibor, J., Winkler, W., 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.
- Vallejo, C., Spikings, R., Luzieux, L., Winkler, W., Chew, D., Page, L. (2006). *The early interaction between the Caribbean Plateau and the NW South American Plate*. *Terra Nova*, 18(4), 264-269
- Wasson, T., y Sinclair, J. (1927). *Geological explorations east of the Andes in Ecuador*. *AAPG Bull.*, 11,1253-1281.
- Weindorf, D., Bakr, N., Zhu, Y. (2014). *Advances in portable X-ray fluorescence (PXRF) for environmental, pedological, and agronomic applications*. *Advances in agronomy*, 128, 1-45. Weller, J. (1960). *Stratigraphic principles and practice*. Harper.
- Weltje, G., y Tjallingii, R. (2008). *Calibración del núcleo XRF escáneres para el registro geoquímico cuantitativo de sedimentos núcleos: Teoría y aplicación*. *Cartas científicas del planeta tierra*, 274(3-4), 423-438
- White, H., Spöcker, R., Ramirez, F., Rodas, J., Bonilla, G. (1995). *Reservoir Characterization of the Hollin and Napo Formations, Western Oriente Basin Petroleum basins of South America*: AAPG Memoir 62,573-596.
- Winchester, J., y Floyd, P. (1977). *Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements*. *Chemical geology*, 20, 325-343.

Witt, C., y Bourgois, J. (2009). *Relaciones entre la evolución de la cuenca del Golfo de Guayaquil-Tumbes y el escape del Bloque Nor-Andino*. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 95-106. ISBN-978-9978-92-737-3.

Yépez, A. (2020). *Sedimentología y estratigrafía secuencial de la Formación Hollín en el campo Palo Azul - Bloque 18 de la Cuenca Oriente*. Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero en Geología. Carrera de Ingeniería en Geología. Quito: UCE. 132 p.

5 ANEXOS

ANEXO I

Resumen de elementos: Asociaciones minerales (Craigie, 2018).

Elemets	Mineralogical Afinitities
Zr	Zircon
Hf	
Nb	Rutile, anatase, titanite titanomagnetite, magnetite ilmenite
Ta	
Ti	
Y	
Cr	Mainly xenotime, monazite and apatite
Th	Mainly chrome spinel, titanite, titanomagnetite, magnetite ilmenite
HREE	Heavy minerals, particularly monazite, zircon and apatite, and clay minerals
LREE	Affinities with heavy minerals
MREE	In general LREE are most abundant in clay minerals and feldspars, whilst MREE exist in heavy minerals, though this rules does not hold true in every study
U	Zircons, monazites, xenotimes and apatites. And organic matter, with redox influence
P	Zircons, monazites, xenotimes and apatites, and mainly biogenic phosphate. However, some P may be concentrate in carbonate and clay minerals
Mo	Pyrite, Fe-oxyhydroxides, carbonate and/or clay minerals
Cu	
Co	
Ni	
Zn	
Si	
Al	Mainly quartz, but part of any silicate mineral
Ga	Mainly clay minerals (particularly kaolinite, with less amounts with feldspars) associated
K	Feldspars, micas and clay minerals (especially illite)
Rb	
Cs	Clay minerals and feldspars
Sc	
V	Mainly clay minerals. It is also noteworthy that V is adsorbed onto clay minerals in anoxic conditions.
Ca	Mainly calcite and dolomite, though high levels of Ca are also linked with gypsum and anhydrite. In addition to this less amounts of Ca may be associated with smectites and plagioclase feldspar
Mg	Mainly dolomite, calcite, and/or clay minerals (particularly chlorite)
Fe	Various clay and carbonate minerals, and pyrite
Mn	
Na	Mainly plagioclase feldspar, though some Na is be associated with halite and/or clay minerals (e.g. smectite)
Ba	Drilling additives (in the form of barite)
Sr	Mainly drilling additives and carbonate minerals, though some Sr may be associated with feldspars and clay minerals
Be	Uncertain mineralogical affinities
W	
Tl	
Pb	
	<i>U and Th minerals</i>

ANEXO II

Detalle de muestras tomadas.


Muestra	Zona	X (m)	Y (m)	Z (m)	Altura columna estratigráfica (m)	Facies	Unit
H066	18S	227928	9986418	982	229	AFLL	Hollin Inferior
H001	18S	227942	9986435	983	227	AFLL	Hollin Inferior
H065	18S	227928	9986418	982	226	AMG	Hollin Inferior
H064	18S	227928	9986418	982	224	AMG	Hollin Inferior
H063	18S	227928	9986418	982	222	AFLL	Hollin Inferior
H062	18S	227928	9986418	982	221.5	AFLL	Hollin Inferior
H061	18S	227928	9986418	982	221	AMG	Hollin Inferior
H060	18S	227918	9986377	976	220.5	AMG	Hollin Inferior
H059	18S	227918	9986377	976	220	AMG	Hollin Inferior
H058	18S	227918	9986377	976	219.5	AMG	Hollin Inferior
H057	18S	227898	9986334	973	219	AMG	Hollin Inferior
H056	18S	227898	9986334	973	218.5	AMG	Hollin Inferior
H055	18S	227898	9986334	973	218	AMG	Hollin Inferior
H054	18S	227875	9986281	968	217.5	AMG	Hollin Inferior
H053	18S	227875	9986281	968	217	AMG	Hollin Inferior
H052	18S	227875	9986281	968	216.5	AMG	Hollin Inferior
H051	18S	227875	9986281	968	216	AMG	Hollin Inferior
H050	18S	227870	9986262	967	215.5	AMG	Hollin Inferior
H049	18S	227870	9986262	967	215	AMG	Hollin Inferior
H048	18S	227870	9986262	967	214.5	AMG	Hollin Inferior
H047	18S	227870	9986262	967	214	AMG	Hollin Inferior
H046	18S	227854	9986252	907	213	CFM	Hollin Inferior
H045	18S	227854	9986252	907	210	CFM	Hollin Inferior
H044	18S	227854	9986252	907	208	AMG	Hollin Inferior
H043	18S	227854	9986252	907	207.5	AMG	Hollin Inferior
H042	18S	227854	9986252	907	207	AMG	Hollin Inferior
H041	18S	227854	9986252	907	206.5	AMG	Hollin Inferior
H040	18S	227849	9986234	964	203	AML	Hollin Inferior
H039	18S	227849	9986234	964	201	AMG	Hollin Inferior
H038	18S	227849	9986234	964	200	AMG	Hollin Inferior
H037	18S	227846	9986206	964	199	AMG	Hollin Inferior
H036	18S	227846	9986206	964	198	AMG	Hollin Inferior
H035	18S	227846	9986206	964	197.5	AML	Hollin Inferior
H034	18S	227846	9986206	964	197	AML	Hollin Inferior
H033	18S	227846	9986206	964	196	AML	Hollin Inferior
H032	18S	227846	9986206	964	195	AML	Hollin Inferior
H031	18S	227845	9986192	965	194	AMG	Hollin Inferior
H030	18S	227845	9986192	965	193	AMG	Hollin Inferior
H029	18S	227845	9986192	965	192	AMG	Hollin Inferior
H028	18S	227845	9986192	965	191.5	AML	Hollin Inferior

H027	18S	227845	9986192	965	191	AML	Hollin Inferior
H026	18S	227845	9986192	965	190.5	AML	Hollin Inferior
H025	18S	227845	9986192	965	190	AML	Hollin Inferior
H024	18S	227845	9986192	965	189	AMG	Hollin Inferior
H023	18S	227845	9986192	965	188.5	AMG	Hollin Inferior
H021	18S	227839	9986167	960	188	AMG	Hollin Inferior
H022	18S	227836	9986144	958	187.5	AMG	Hollin Inferior
H020	18S	227866	9986123	956	187	AMG	Hollin Inferior
A019	18S	227866	9986123	956	186.5	RB	Aluvial valley fill
A018	18S	227866	9986123	956	184	AkMG	Aluvial valley fill
A017	18S	227866	9986123	956	182	RB	Aluvial valley fill
A016	18S	227866	9986123	956	181	AkMG	Aluvial valley fill
A015	18S	227884	9986127	944	180.5	AkMG	Aluvial valley fill
A014	18S	227884	9986127	944	180	AkMG	Aluvial valley fill
A013	18S	227884	9986127	944	179.5	AkMG	Aluvial valley fill
A012	18S	227884	9986127	944	179	AkMG	Aluvial valley fill
A011	18S	227884	9986127	944	178.5	AkMG	Aluvial valley fill
A010	18S	227884	9986127	944	178	RB	Aluvial valley fill
A009	18S	227898	9986139	956	177.5	RB	Aluvial valley fill
A008	18S	227898	9986139	956	177	RB	Aluvial valley fill
A007	18S	227898	9986139	956	176	AkMG	Aluvial valley fill
A006	18S	227898	9986139	956	174	AkMG	Aluvial valley fill
A005	18S	227898	9986139	956	173	RB	Aluvial valley fill
A004	18S	227898	9986139	956	172.5	RB	Aluvial valley fill
A003	18S	227898	9986139	956	172	RB	Aluvial valley fill
C132	18S	227912	9986151	962	166	RB	Aluvial valley fill
C133	18S	227912	9986151	962	163	RB	Aluvial valley fill
C134	18S	227912	9986151	962	161.5	AkLF	Aluvial valley fill
C131	18S	227938	9986203	953	144.5	DVF	Chapiza Superior
C130	18S	227938	9986203	953	143.5	BV	Chapiza Superior
C129	18S	227968	9986236	949	142	DVF	Chapiza Superior
C128	18S	227968	9986236	949	141	BV	Chapiza Superior
C127	18S	227968	9986236	949	140.5	BV	Chapiza Superior
C126	18S	228003	9986265	946	140	DVF	Chapiza Superior
C125	18S	228003	9986265	946	139	DVF	Chapiza Superior
C124	18S	228039	9986311	930	138.5	BV	Chapiza Superior
C123	18S	228057	9986360	913	138	DVF	Chapiza Superior
C122	18S	228057	9986360	913	137	DVF	Chapiza Superior
C149	18S	228077	9986411	917	136	BV	Chapiza Superior
C121	18S	228074	9986420	907	134	BV	Chapiza Superior
C120	18S	228074	9986420	907	132	BV	Chapiza Superior
C119	18S	228074	9986420	907	130	BV	Chapiza Superior
C118	18S	228095	9986457	904	126	DVF	Chapiza Superior
C117	18S	228173	9986482	894	125.5	BV	Chapiza Superior
C116	18S	228173	9986482	894	125	BV	Chapiza Superior

C115	18S	228216	9986513	904	123	DVF	Chapiza Superior
C114	18S	228205	9986548	896	122.5	BV	Chapiza Superior
C113	18S	228348	9986505	888	121.5	DVF	Chapiza Superior
C112	18S	228385	9986527	978	120	BV	Chapiza Superior
C111	18S	228422	9986545	869	115	RB	Chapiza Superior
C110	18S	228460	9986547	866	111	AkLF	Chapiza Medio
C109	18S	228490	9986533	862	110	AkLF	Chapiza Medio
C148	18S	228526	9986523	868	109	AkFG	Chapiza Medio
C147	18S	228526	9986523	868	108	AkFG	Chapiza Medio
C108	18S	228535	9986531	857	107	CMC	Chapiza Medio
C107	18S	228535	9986531	857	106	CMC	Chapiza Medio
C146	18S	228541	9986522	867	105	ALFG	Chapiza Medio
C145	18S	228541	9986522	867	104	ALFG	Chapiza Medio
C144	18S	228561	9986523	865	103	ALFG	Chapiza Medio
C143	18S	228577	9986532	863	102	ALFG	Chapiza Medio
C142	18S	228577	9986532	863	101.5	CMC	Chapiza Medio
C141	18S	228603	9986527	863	98	ALFG	Chapiza Medio
C139	18S	228646	9986533	862	94	ALFG	Chapiza Medio
C138	18S	228646	9986533	862	93	ALFG	Chapiza Medio
C137	18S	228646	9986533	862	92	CMC	Chapiza Medio
C105	18S	228573	9986473	859	87	ALFG	Chapiza Medio
C106	18S	228573	9986473	859	86	RB	Chapiza Medio
C140	18S	228603	9986527	863	84	RB	Chapiza Medio
C136	18S	228893	9986431	862	67	RB	Chapiza Medio
C153	18S	228890	9986435	857	65	RB	Chapiza Medio
C135	18S	228893	9986431	862	61	ALFG	Chapiza Medio
C152	18S	228890	9986435	857	59	ALFG	Chapiza Medio
C151	18S	228890	9986435	857	57	CMC	Chapiza Medio
C150	18S	228890	9986435	857	56	CMC	Chapiza Medio

ANEXO III

Factores de conversión de elementos a óxidos (Citius)

	<p style="font-size: small;">Centro de Investigación, Tecnología e Innovación Universidad de Sevilla Avda. Reina Mercedes, nº 4-B, 41012 Sevilla, Spain</p>
SGI LABORATORIO DE RAYOS X	
FACTORES DE CONVERSIÓN DE ELEMENTOS A ÓXIDOS MÁS COMUNES	
Factor	Óxido
1,8895	Al ₂ O ₃
1,3203	As ₂ O ₃
1,0406	Au ₂ O
3,2201	B ₂ O ₃
1,1165	BaO
2,7753	BeO
3,6641	CO ₂
1,3992	CaO
1,2284	CeO ₂
1,1713	Ce ₂ O ₃
1,2715	CoO
1,4616	Cr ₂ O ₃
1,0602	Cs ₂ O
1,2518	CuO
1,1477	Dy ₂ O ₃
1,1435	Er ₂ O ₃
1,1053	EuO
1,1579	Eu ₂ O ₃
1,2865	FeO
1,4297	Fe ₂ O ₃
1,3442	Ga ₂ O ₃
1,1526	Gd ₂ O ₃
1,4408	GeO ₂
8,9530	H ₂ O
1,1793	HfO ₂
1,1455	Ho ₂ O ₃
1,2046	K ₂ O
1,1728	La ₂ O ₃
2,1525	Li ₂ O
1,1372	Lu ₂ O ₃
1,6583	MgO
1,2912	MnO
Factor	Óxido
1,5825	MnO ₂
1,3883	Mn ₃ O ₄
1,5004	MoO ₃
1,3480	Na ₂ O
1,4305	Nb ₂ O ₅
1,1664	Nd ₂ O ₃
1,2725	NiO
2,2914	P ₂ O ₅
1,0772	PbO
1,1703	Pr ₂ O ₃
1,0936	Rb ₂ O
2,4971	SO ₃
1,1971	Sb ₂ O ₃
1,5338	Sc ₂ O ₃
2,1393	SiO ₂
1,1596	Sm ₂ O ₃
1,2696	SnO ₂
1,1826	SrO
1,2211	Ta ₂ O ₅
1,1510	Tb ₂ O ₃
1,1379	ThO ₂
1,6680	TiO ₂
1,5010	Ti ₂ O ₃
1,1421	Tm ₂ O ₃
1,1344	UO ₂
1,1792	U ₃ O ₈
1,7852	V ₂ O ₅
1,2610	WO ₃
1,2699	Y ₂ O ₃
1,1387	Yb ₂ O ₃
1,2447	ZnO
1,3508	ZrO ₂

ANEXO IV

Ejemplo análogo de la aplicación del análisis de elementos de arquitectura estratigráfica a un campo específico estudio, en este caso un acuífero del Triásico en Alemania (de Hornung y Aigner (1999)). Tomado de Miall (2014)

symbol	element	characterization	geometry	lithology				
				sed. str.	grain size			
				c	s	fs	ms	cs
CH(b)	Channel (bed load)	Coarse-grained sandy bedforms, multilateral and multistory amalgamated channel complexes. Weakly developed fining-up trends.						
CH(m)	Channel (mixed load)	Often massive sandbodies. Also alternating layers of silty, fine-grained and coarse-grained sandy bedforms. Clear fining-up trends.						
CH(s)	Channel (suspended load)	Consists mainly of silt and clay. Rarely thin fine-grained sandy bedforms. No visible fining-up trends.						
LA	Lateral accretion	Inclined, alternating layers of silt and clay with fine-grained and coarse-grained sandy bedforms, often irregular bedding contacts. Clear overall fining-up trend.						
AC	abandoned channel	Consists mainly of silt and clay. Rarely thin fine-grained sandy bedforms. No visible fining-up trends. Could be reactivated as a channel.						
LV	Levee	Inclined layers of sand, alternating with silty fine sands. Often overall coarsening-up trend.						
CS	Crevasse splays + sheet floods (LS)	Very coarse to fine sands. Could be amalgamated to thicker packages. Ripple crossbedded or low-angle crossbedded. Bedforms mostly missing. Mostly clear fining-up trends.						
FF	Floodplain, Paleosols Overbanks	Horizontal laminated clay and silt. Contains ± developed paleosols, desiccation cracks.						
LC	Lacustrine sediments	Dolomitic limestones, dark clays/silts and submerged crevasse sandsheets, alternating multistorey and multilateral.						

ANEXO V

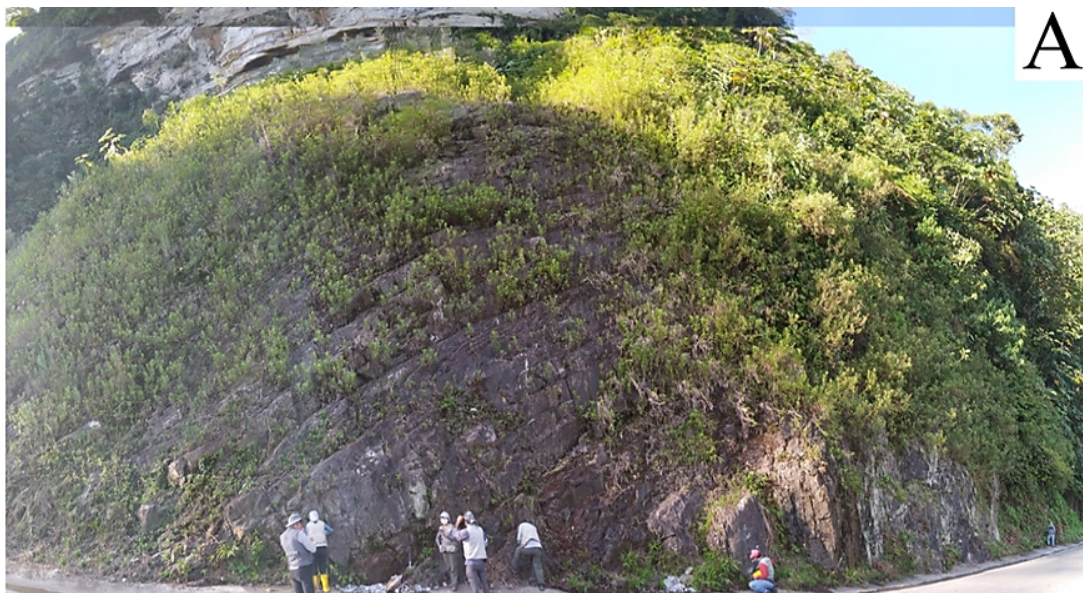
A) La jerarquía de canales y valles en los límites de la secuencia fluvial (Miall, 2014).

B) Esquema de la jerarquía de los elementos arquitectónicos, modificado de Miall (1996) y Holbrook (2001).

Type or rank (terminology from Holbrook 2001)	Bounding surface rank (Miall 1996)	Sedimentation rate scale (Miall, in press)	Time scale (years)	Processes	Driving mechanism	A
Nested channel cuts	4	5	10^0-10^1	Seasonal to 10-year flood	Normal climatic events	
Channel scours	5	6	10^2-10^3	Channel avulsion	Autogenic valley-floor aggradation	
Channel-belt (b allosub-member)	6	7	10^3-10^4	Channel-belt avulsion, river capture	Autogenic valley-fill; shifts in river due to climatic or tectonic events	
Nested valley (nv allosub-member)	7	7-8	10^3-10^5	Channel-belt avulsion, river capture	Shifts in river due to climatic or tectonic events	
Valley-fill	8	9	10^5-10^6	Channel-belt avulsion, river capture	Shifts in river due to climatic or tectonic events	
Sequence boundary	9	9-12	10^5-10^7	Regional changes in ratio of accommodation to sedimentation	Major tectonic or climatic changes	

ANEXO VI

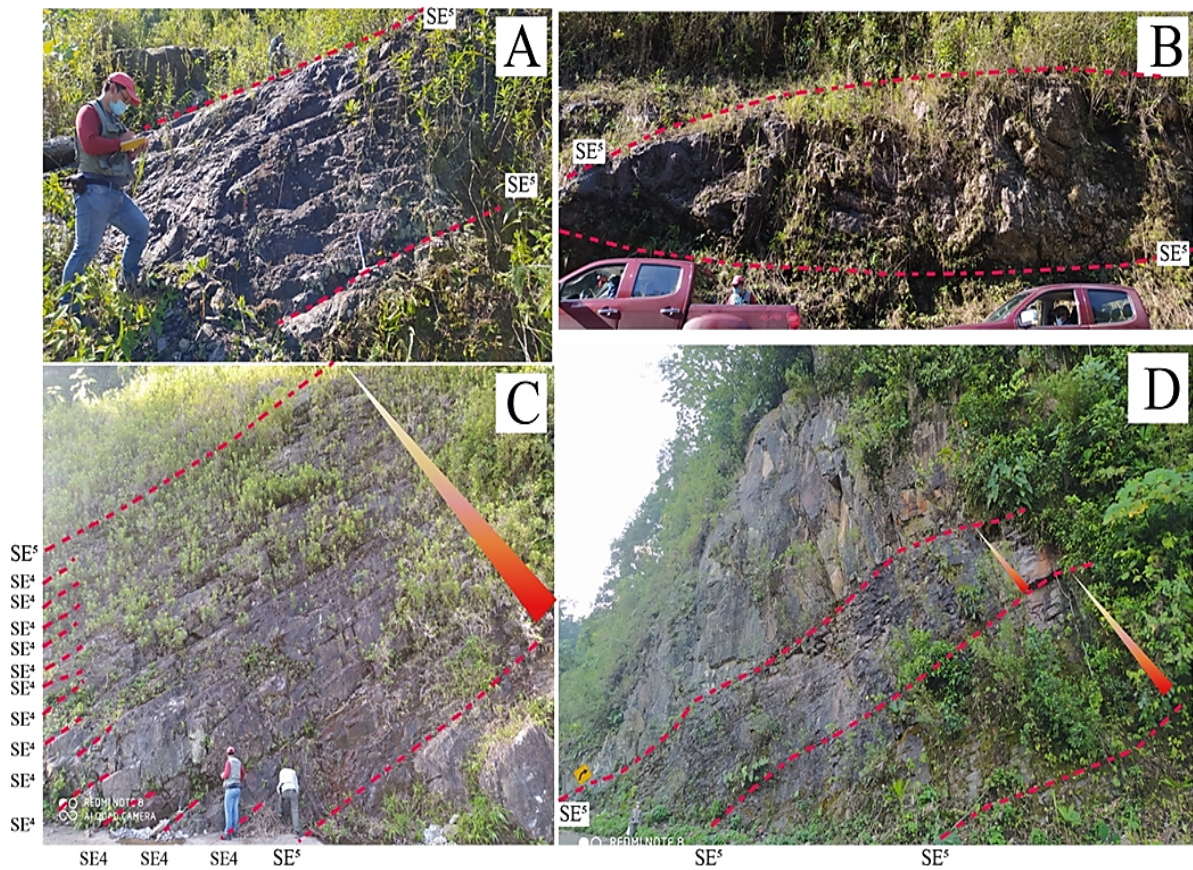
Afloramientos tipo de la Formación Chapiza, Corte Coca-Codo Sinclair: **A)** Secuencias estrato-decrecientes de arcosas estratificadas; **B)** Canales y barras fluviales (IIGE, 2020)





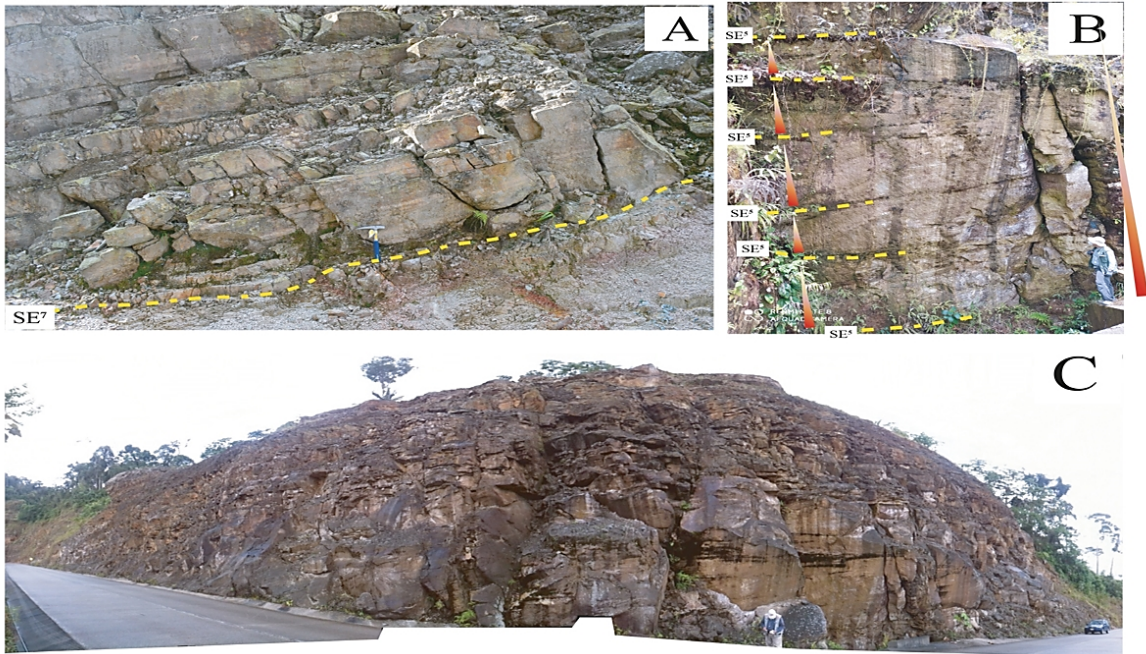
ANEXO VII

Arquitectura estratigráfica de la Formación Chapiza, Corte Coca-Codo Sinclair: **A)** Planicie de inundación limo-arenosa; **B)** Canal relleno por depósitos de acreción lateral; **C)** Depósitos de acreción vertical; **D)** Planicies arenosas y canales fluviales (IIGE, 2020)



ANEXO VIII

Afloramientos tipo y arquitectura estratigráfica del Miembro Inferior de la Formación Hollín, Corte Coca-Codo Sinclair: **A)** Formación Hollín sobreyaciendo en discordancia angular a la Formación Chapiza; **B)** Apilación vertical de barras fluviales; **C)** Afloramiento tipo del Miembro Inferior de la Formación Hollín (IIGE, 2020)



ANEXO IX

Muestras de mano correspondientes a la Litofacie AFLL – Hollín Inferior



ANEXO X

Muestras de mano correspondientes a la Litofacie AML – Hollín Inferior



ANEXO XI

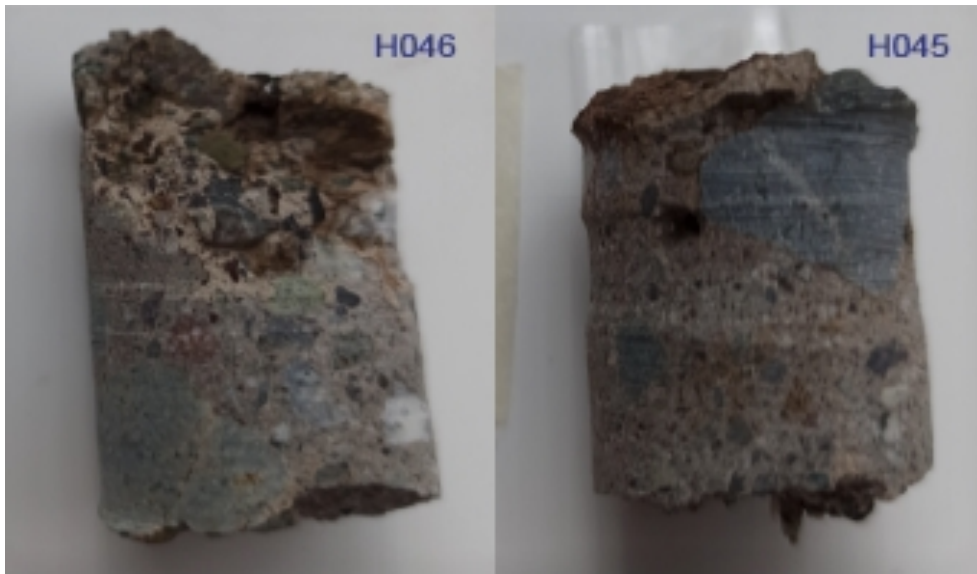
Muestras de mano correspondientes a la Litofacie AMG – Hollín Inferior





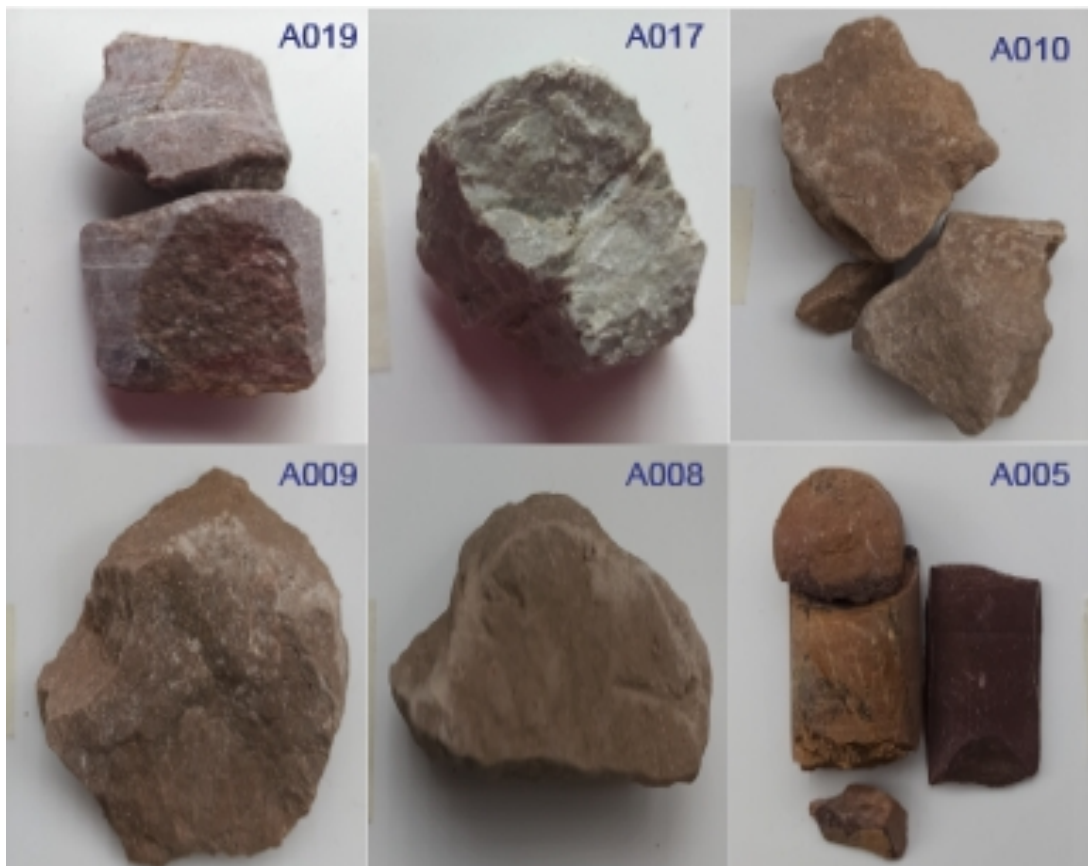
ANEXO XII

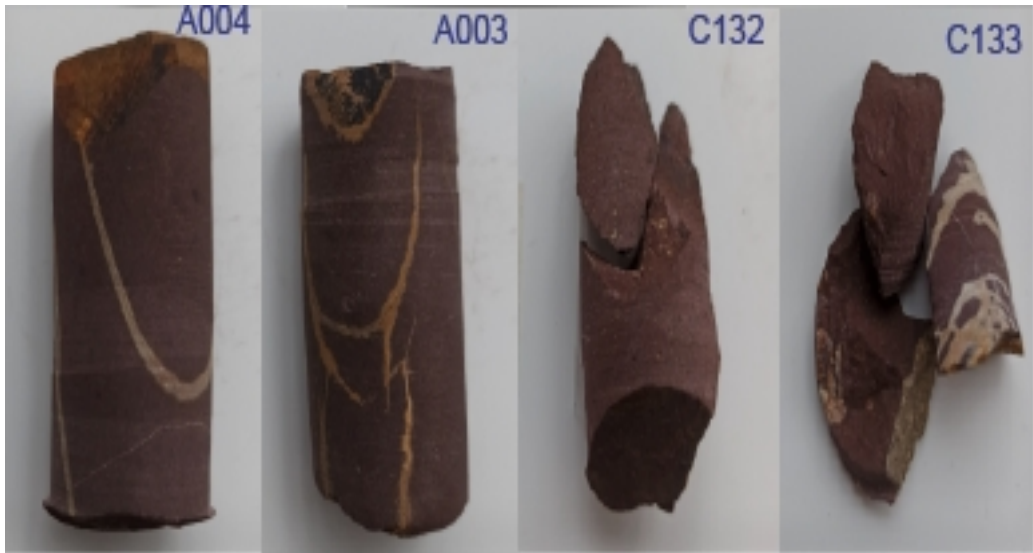
Muestras de mano correspondientes a la Litofacie CFM – Hollín Inferior



ANEXO XIII

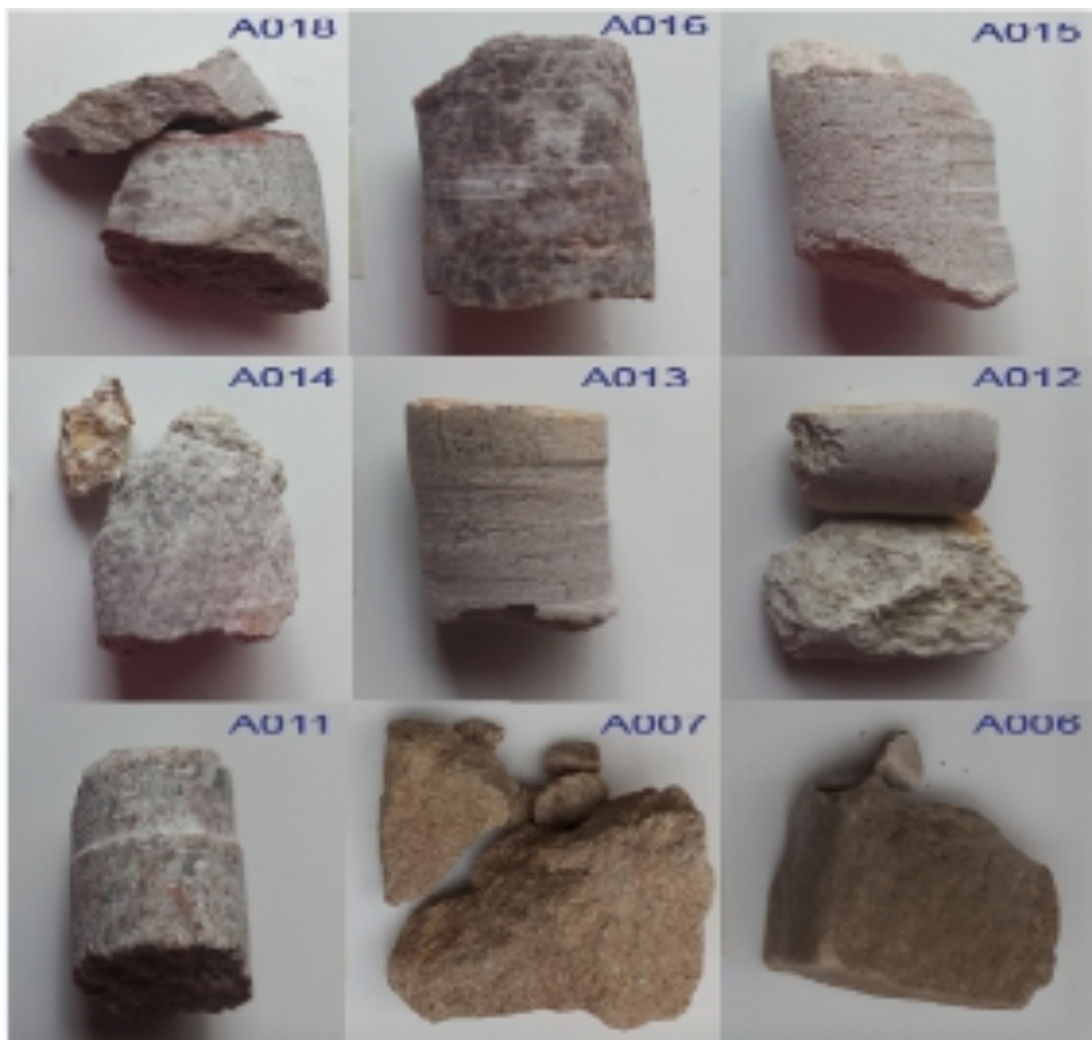
Muestras de mano correspondientes a la Litofacie RB – Alluvial Valley Fill





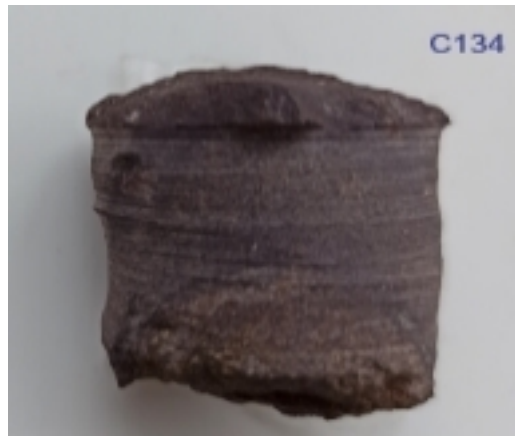
ANEXO XIV

Muestras de mano correspondientes a la Litofacie AkMG – Alluvial Valley Fill



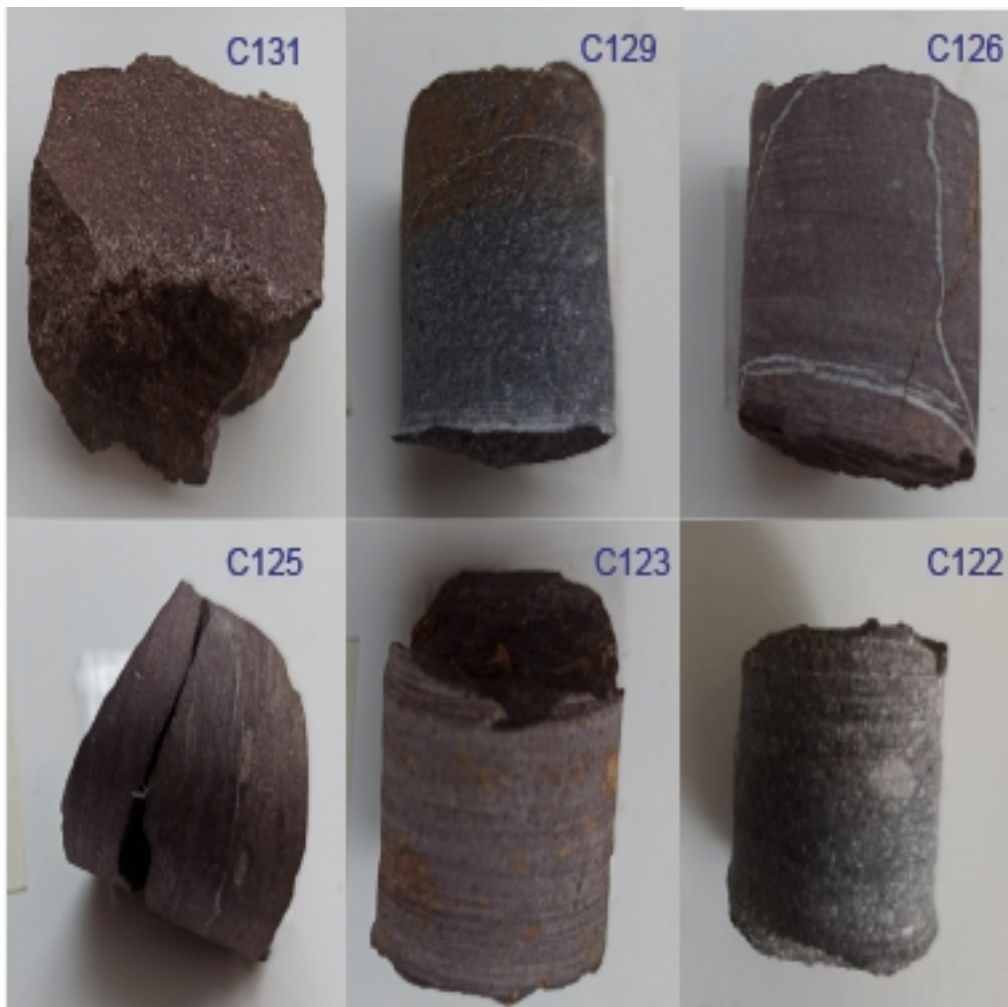
ANEXO XV

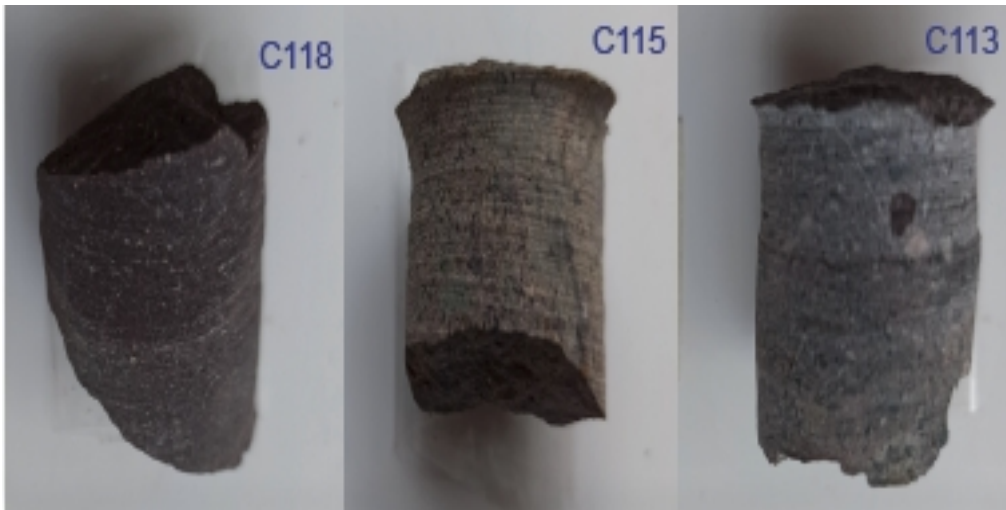
Muestras de mano correspondientes a la Litofacie AkLF – Alluvial Valley Fill



ANEXO XVI

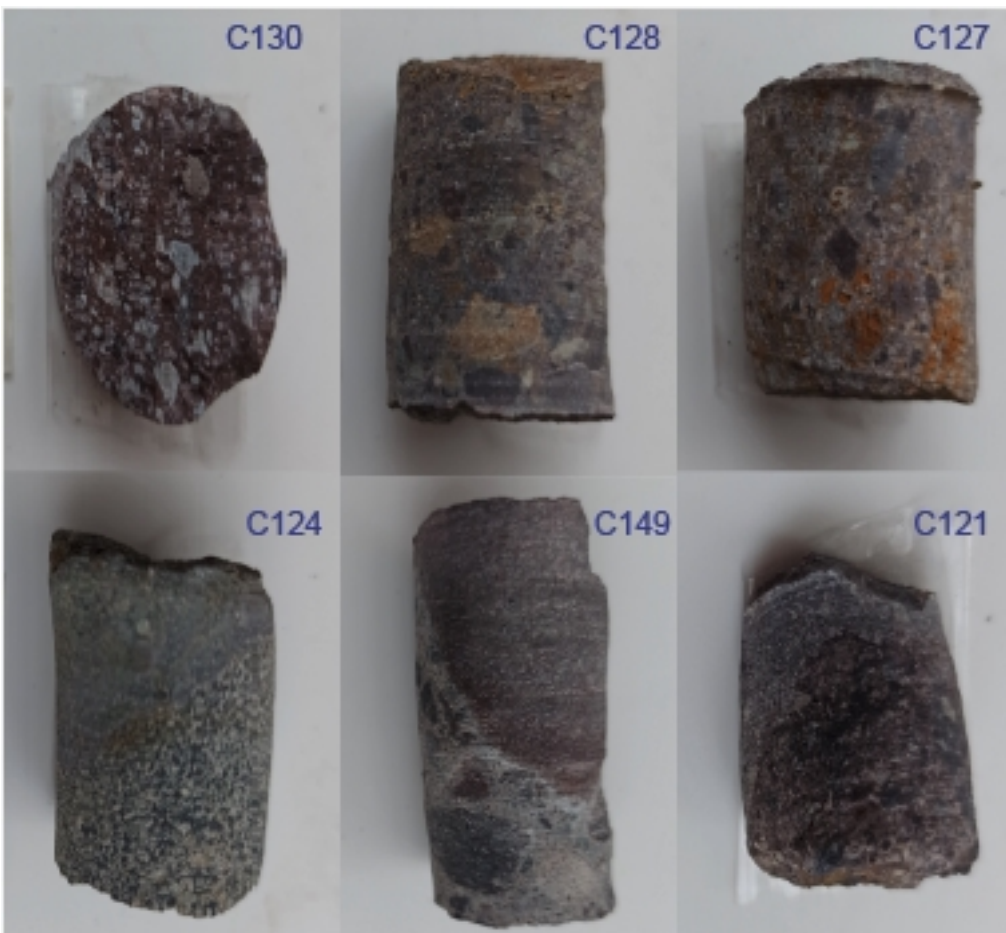
Muestras de mano correspondientes a la Litofacie DVF – Chapiza

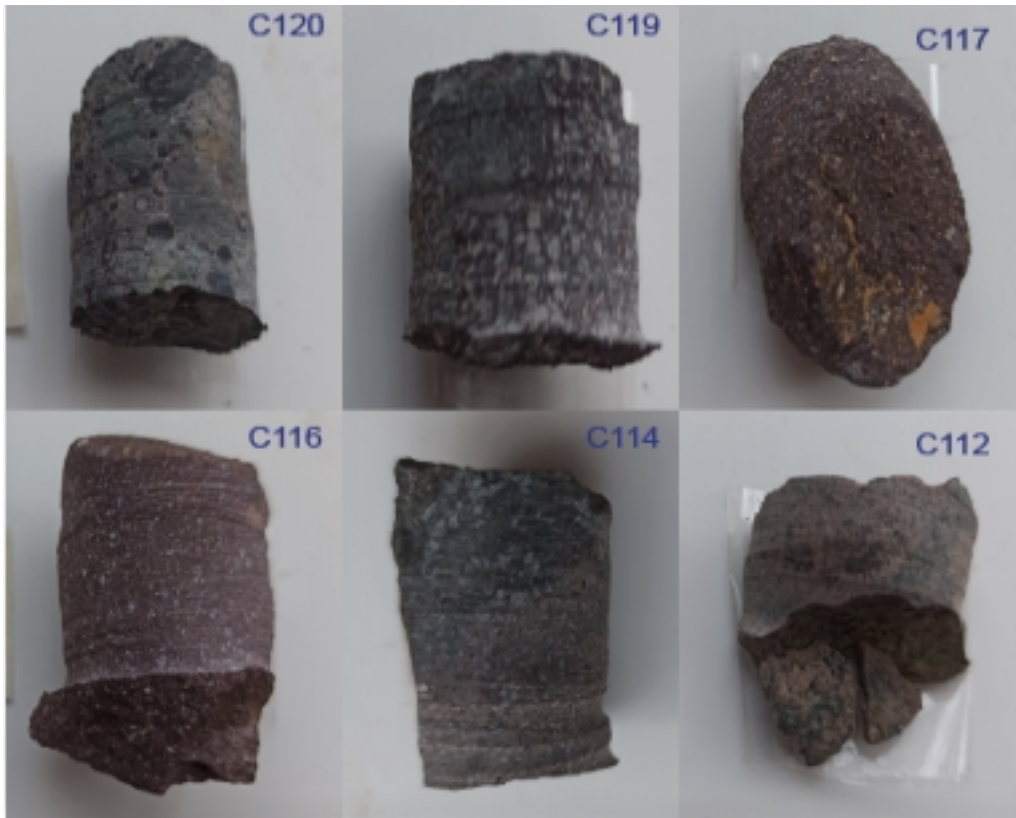




ANEXO XVII

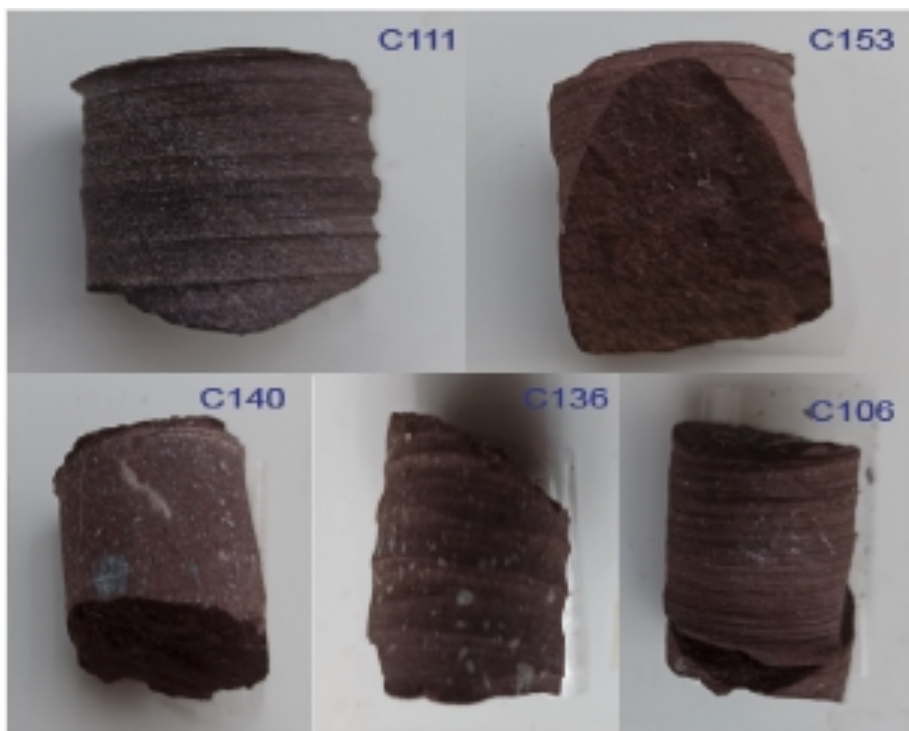
Muestras de mano correspondientes a la Litofacie BV- Chapiza





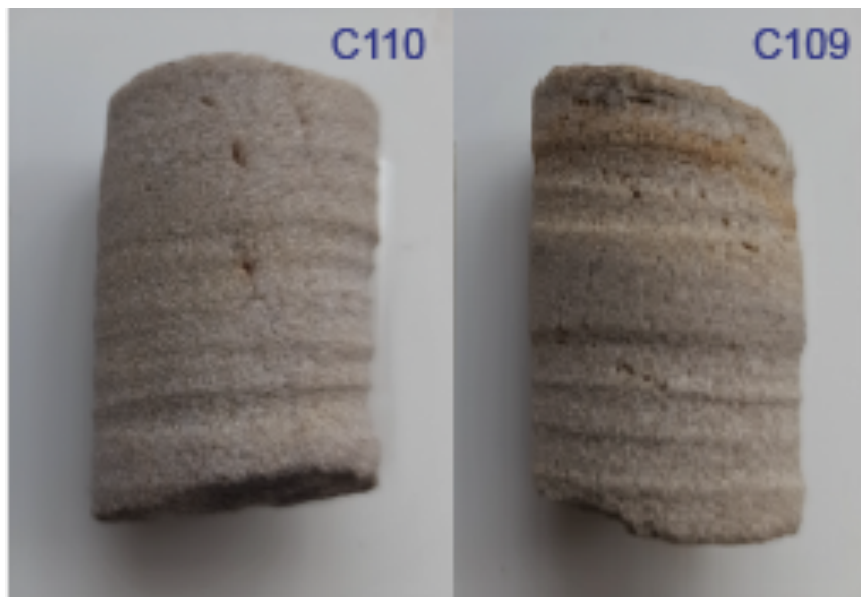
ANEXO XVIII

Muestras de mano correspondientes a la Litofacie RB- Chapiza



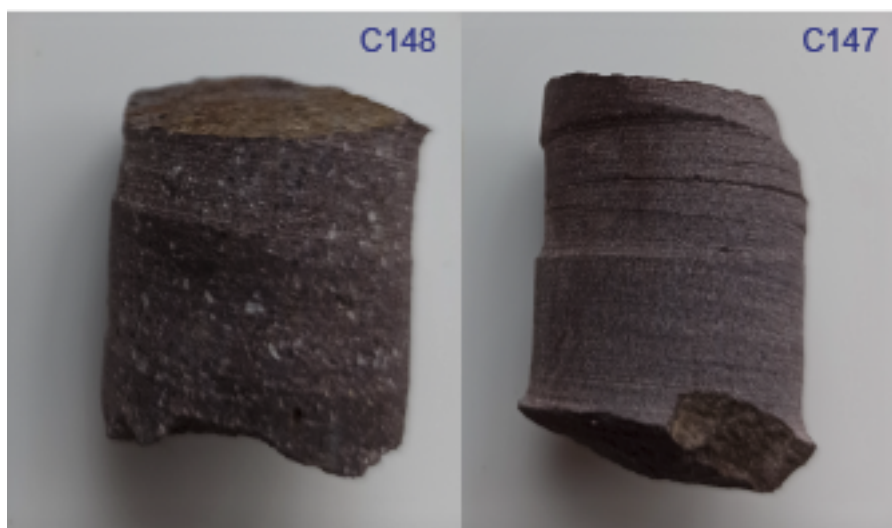
ANEXO XIX

Muestras de mano correspondientes a la Litofacie AkLF– Chapiza



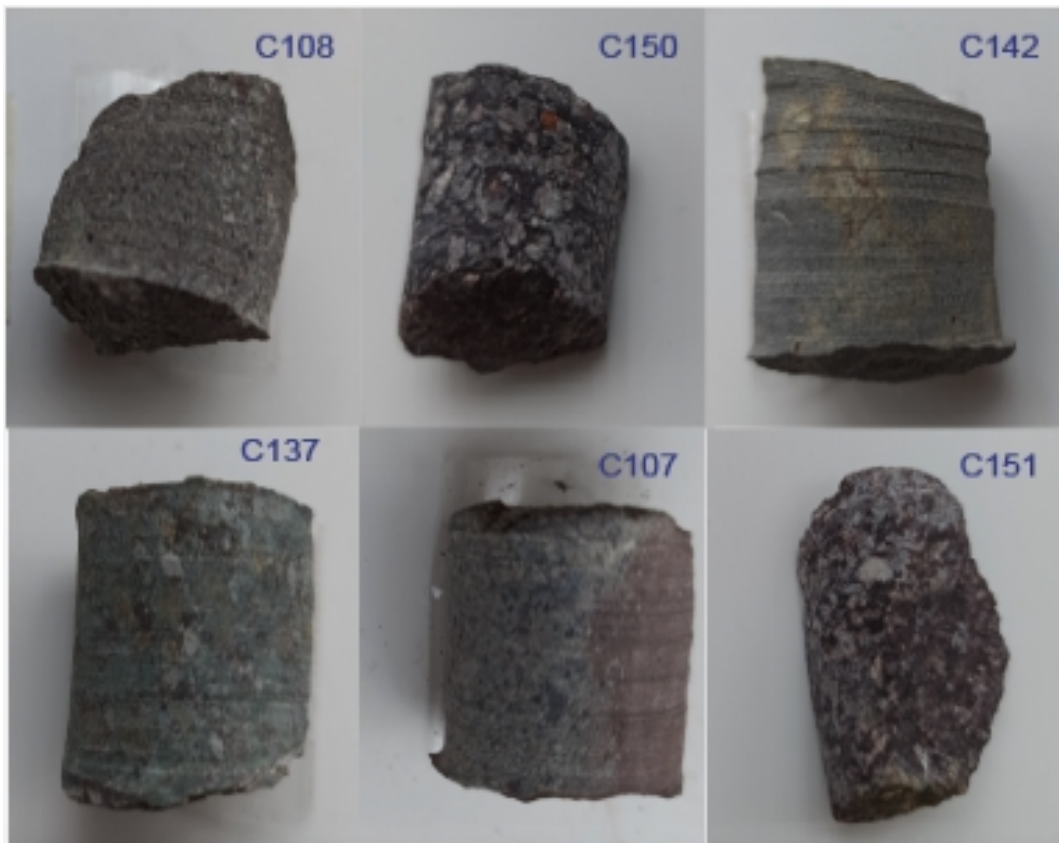
ANEXO XX

Muestras de mano correspondientes a la Litofacie AkFG– Chapiza



ANEXO XXI

Muestras de mano correspondientes a la Litofacie CMC– Chapiza



ANEXO XXII

Muestras de mano correspondientes a la Litofacie ALFG– Chapiza

