UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA

CARRERA DE GEOCIENCIAS

ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO DE LA FORMACIÓN HOLLÍN EN LA CANTERA PUNGARAYACU

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERA EN GEOCIENCIAS

AUTORA: MILAGROS ZAVALA MOREIRA

TUTOR: PhD. CORINA CAMPOS SERRANO

CO-TUTOR: PhD. OSWALDO JOSÉ GUZMÁN GUTIÉRREZ

Tena - Ecuador

2025

UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA CARRERA DE GEOCIENCIAS

ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO DE LA FORMACIÓN HOLLÍN EN LA CANTERA PUNGARAYACU

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:

INGENIERA EN GEOCIENCIAS

AUTORA: MILAGROS ZAVALA MOREIRA

TUTOR: PhD. CORINA CAMPOS SERRANO

CO-TUTOR: PhD. OSWALDO JOSÉ GUZMÁN GUTIÉRREZ

Tena - Ecuador

2025

Carrera de Geociencias

Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad

Tena, 13 de marzo de 2025

Yo, Milagros Zavala Moreira con documento de identidad 1003794821, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título: Ingeniero en Geociencias, son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en el presente documento son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.



Milagros Zavala Moreira

1003794821

Carrera de Geociencias

Autorización de publicación en el repositorio institucional

Tena, 13 de marzo de 2025

Yo, Milagros Zavala Moreira, con documento de identidad N° 1003794821, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: Análisis sedimentológico y estratigráfico de la Formación Hollín en la cantera Pungarayacu, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.



Milagros Zavala Moreira

1003794821

Carrera de Geociencias

Certificado de dirección de trabajo de titulación

Tena, 29 de enero de 2025

Certifico que el trabajo de titulación: “Análisis sedimentológico y estratigráfico de la Formación Hollín en la cantera Pungarayacu”, en la modalidad de: Artículo original en español y de manera optativa en inglés, adaptado a los parámetros y normas de una revista indexada fue realizado por, Milagros Zavala Moreira bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Firmado electrónicamente por:
CORINA CAMPOS SERRANO

Corina Campos Serrano

C.I: 1759458670

Firmado electrónicamente por:
OSWALDO JOSE GUZMAN GUTIERREZ

Oswaldo José Guzmán Gutiérrez

C.I: 175945861

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia por ser fuente inagotable de amor, apoyo moral y emocional, me han impulsado para enfrentar cada desafío y alcanzar mis metas.

A mis profesores Corina y Oswaldo por su calidez, paciencia, orientación y sabiduría en todo mi proceso de titulación y durante mi trayectoria académica, me han brindado las herramientas y el apoyo necesarios para finalizar con éxito este trabajo.

A todos mis profesores de Geociencias quienes me han guiado y aconsejado con sabiduría.

A Miguel, quien fue un cómplice en este proceso y quien jugó un papel fundamental en mi trabajo de campo, gracias por acompañarme y creer en mí.

Finalmente, a mí misma por perseverar, el proceso ha sido difícil pero no imposible, cada paso ha permitido mi crecimiento personal y autodescubrimiento.

TABLA DE CONTENIDO

PORTADA

Declaración de derecho de autor, autenticidad y responsabilidad..... ii

Autorización de publicación en el repositorio institucional..... iii

Certificado de dirección de trabajo de titulación..... iv

AGRADECIMIENTO..... v

TABLA DE CONTENIDO..... vi

ÍNDICE DE FIGURAS..... viii

RESUMEN..... ix

ABSTRACT..... x

1. Introducción..... 1

2. Contexto Geológico Regional..... 2

2.1. Cuenca Oriente..... 2

2.2. Formación Hollín..... 4

3. Metodología..... 6

4. Resultados..... 9

4.1. Descripción de Facies e Interpretación..... 9

4.1.1. Facies 1 (Arenisca gravosa)..... 9

4.1.2. Facies 2 (Conglomerado arenoso)..... 10

4.1.3. Facies 3 (Conglomerado arenoso con clastos de lodo)..... 11

4.1.4. Facies 4 (Arenisca con estratificación cruzada asintótica o planar).. 14

4.1.5. Facies 5 (Arenisca masiva)..... 15

4.1.6. Facies 6 (Arenisca laminada)..... 16

4.1.7. Facies 7 (Intercalación heterolítica de areniscas de grano fino, areniscas de grano muy fino limosas y lodolitas micáceas) 18

4.1.8. Facies 8 (Intercalación heterolítica de lodolitas y areniscas finas a medias) 18

4.1.9. Facies 9 (Carbón) 21

4.2. Asociación de Facies 24

4.2.1. Asociación de Facies 1 24

4.2.2. Asociación de Facies 2 24

4.2.3. Asociación de Facies 3 25

5. Discusión 26

5.1. Flujo hiperpícnico como mecanismo de depositación 26

5.2. Sistemas Depositacionales y Elementos arquitecturales en la sección basal de la Formación Hollín 28

5.2.1. Zona Proximal – Canal Principal 29

5.2.2. Zona Intermedia - Canales Distributarios 29

5.2.3. Zona Distal - Lóbulos 30

6. Conclusión 32

Referencias

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Columna tectonoestratigráfica y eventos geodinámicos que controlaron el desarrollo de la Cuenca Oriente.	4
Figura 2.	Área de Estudio.	8
Figura 3.	Esquema del levantamiento de información.....	9
Figura 4.	Cuerpos en la sección basal de la Formación Hollín.	12
Figura 5.	Características de las facies conglomeráticas.....	13
Figura 6.	Características de las facies arenosas.	17
Figura 7.	Características de las facies heterolíticas.	20
Figura 8.	Características de la facies carbonosa.	22
Figura 9.	Sección estratigráfica de la Formación Hollín en la cantera Pungarayacu.....	23
Figura 10.	Clasificación de la asociación de facies.	26
Figura 11.	Depósitos deltaicos y modelo sedimentario de los depósitos de flujo hiperpícnico en la cantera Pungarayacu.	31

RESUMEN

La Formación Hollín se ha interpretado tradicionalmente como depósitos fluviales que evolucionan a marinos someros, sin embargo, los avances recientes en el entendimiento del sistema de transporte de sedimentos desde la plataforma hacia cuenca adentro sugieren revisar en detalle las secuencias sedimentarias interpretadas en este contexto. En el presente estudio se realizó un análisis sedimentológico y estratigráfico de la sección basal de la Formación Hollín, expuesta en la cantera Pungarayacu, provincia de Napo, Ecuador. Con un estudio sedimentológico detallado se identificó nueve facies sedimentarias principalmente siliciclásticas, clasificadas en tres conglomeráticas, tres arenosas, dos heterolíticas y una carbonosa. Estas facies se agruparon en tres asociaciones que presentan características de depósitos hiperpícnicos como: estratos con gradación inversa y normal, múltiples superficies de erosión interna y abundantes fragmentos leñosos, carbonosos y micas. El análisis sugiere que el miembro Inferior de la Formación Hollín fue depositado por un flujo hiperpícnico sostenido, generado durante eventos de crecidas extremas en ríos, en un ambiente de delta hiperpícnico litoral. Los sedimentos se distribuyeron en tres zonas: una proximal con el canal principal, una intermedia con canales distributarios y una distal representada por lóbulos. Este estudio resalta la complejidad de los depósitos de la Formación Hollín y el reconocimiento de la acción de flujos hiperpícnicos sostenidos cambia el panorama depositacional, resaltando la necesidad de realizar análisis sedimentológicos más detallados en esta formación y otras de la Cuenca Oriente.

Palabras clave: Formación Hollín, flujos hiperpícnicos, facies, Pungarayacu.

ABSTRACT

The Hollín Formation has traditionally been interpreted as fluvial deposits evolving to shallow marine, however, recent advances in the understanding of the sediment transport system from the shelf to the basin suggest a detailed review of the sedimentary sequences interpreted in this context. In the present study, a sedimentological and stratigraphic analysis of the basal section of the Hollín Formation, exposed in the Pungarayacu quarry, Napo Province, Ecuador, was carried out. A detailed sedimentological study identified nine sedimentary facies, mainly siliciclastic, classified into three conglomeratic, three sandy, two heterolithic and one carbonaceous. These facies were grouped into three associations that exhibit characteristics of hyperpycnic deposits such as: reverse and normal graded strata, multiple internal erosion surfaces and abundant woody, carbonaceous and mica fragments. The analysis suggests that the Lower member of the Hollín Formation was deposited by a sustained hyperpycnal flow, generated during extreme river flood events, in a hyperpycnal littoral delta environment. The sediments were distributed in three zones: a proximal one with the main channel, an intermediate one with distributary channels and a distal one represented by lobes. This study highlights the complexity of the Hollin Formation deposits and the recognition of the action of sustained hyperpycnal flows changes the depositional landscape, highlighting the importance of more detailed sedimentological analyses in this formation and others in the Oriente Basin.

Keywords: Hollín Formation, hyperpycnic flows, facies, Pungarayacu.

Revista a someter: Andean Geology

Enlace de la revista: http://www.andeangeology.cl/index.php/revista1

Análisis sedimentológico y estratigráfico de la Formación Hollín en la cantera Pungarayacu

Milagros Zavala Moreira [1*], Corina Campos [2], Oswaldo J. Guzmán [2]

1. Universidad Regional Amazónica Ikiam, parroquia Muyuna, Kilómetro 7 vía a Alto Tena, s/n, Tena, Napo, Ecuador.
2. Grupo de investigación en Ciencias de la Tierra y Clima. Universidad Regional Amazónica Ikiam, Tena, Napo, Ecuador

*Autor para correspondencia: milagros.zavala@est.ikiam.edu.ec

1. Introducción

La Formación Hollín, ampliamente estudiada por su importancia como reservorio petrolero (Canfield et al., 1982; Dashwood & Abbotts, 1990; Rivadeneira & Baby, 2004; Romero et al., 2019), ha sido interpretada tradicionalmente como un sistema que evolucionó desde ambientes fluviales a marinos someros debido a la transgresión del Albiano (Barragán et al., 2004). Algunos estudios han destacado su carácter fluvial-deltaico y marino (Barragán et al., 2004; Canfield et al., 1982; Higgs, 2002; Jaillard et al., 1997; Macellari, 1988; Rivadeneira & Baby, 2004; Romero et al., 2019, 2020; Shanmugam et al., 2000; Souza Cruz, 1989; Vallejo et al., 2021; White et al., 1995). Sin embargo, investigaciones recientes han incorporado nuevos enfoques relacionados con ambientes hiperpícnicos.

El estudio de Quiroz Cabascango (2021), resalta la influencia de flujos hiperpícnicos en el miembro Inferior de la Formación Hollín, cuestionando modelos tradicionales que ignoran eventos fluviales extremos (Mutti et al., 1996) y proponiendo una nueva dinámica sedimentaria.

Los flujos hiperpícnicos son corrientes de turbidez con una densidad aparente superior a la de los cuerpos de agua receptores. Son generados durante crecidas fluviales extremas (Mulder et al., 2003; Mulder & Alexander, 2001; Zavala et al., 2011; Zavala & Arcuri, 2016), sus depósitos se conocen como hiperpicnitas, y se han documentado en modernas y antiguas sucesiones geológicas (Bhattacharya & MacEachern, 2009; He et al., 2022; Irastorza et al., 2021; Mulder et al., 2003; Mulder & Chapron, 2011; Yan et al., 2020; Zavala & Pan, 2018). Las hiperpicnitas, aunque muy comunes, al estar relacionados directamente a un sistema fluvial, suelen ser malinterpretados como depósitos costeros o fluviales convencionales, pero

presentan características diagnósticas que permiten su reconocimiento (Irastorza et al., 2021; Mulder & Chapron, 2011; Mulder & Syvitski, 1995; Mutti et al., 1996; Zavala et al., 2011; Zavala & Arcuri, 2016; Zavala & Pan, 2018).

El objetivo de este trabajo es analizar las facies sedimentarias del miembro Inferior de la Formación Hollín, aflorantes en la cantera Pungarayacu, mediante la aplicación de nuevos conceptos sobre el transporte de sedimentos desde el continente hacia la cuenca (Zavala et al., 2006, 2011; Zavala & Pan, 2018).

Se realizará un análisis detallado para interpretar los procesos de transporte y depositación, proponiendo un modelo actualizado que refleje la complejidad y riqueza de esta formación. Los resultados contribuirán a la comprensión de la evolución paleogeográfica de la región y tendrán implicaciones en estudios sobre distribución de especies, análisis paleoclimáticos y exploración de recursos naturales. Asimismo, la información generada apoyará el turismo geológico y la geoconservación (Vera et al., 2023). El planteamiento de la posible presencia de hiperpicnitas en este trabajo, también abre puertas a futuras investigaciones que profundicen en la ocurrencia y características de estos depósitos en el contexto geológico ecuatoriano.

2. Contexto Geológico Regional

2.1.Cuenca Oriente

La Cuenca Oriente del Ecuador se ubica en la parte occidental de la Cuenca Amazónica, formando parte del sistema de cuencas de antepaís que se extiende de Colombia hasta Argentina. La cuenca guarda el registro geológico de varios ciclos tectónicos y sedimentarios que descansan sobre un basamento pre Cámbrico constituido de rocas ígneas y metamórficas (Díaz et al., 2004).

La secuencia estratigráfica de la cuenca se divide en tres series: la Pre - Cretácica, con depósitos de rift del Triásico tardío y Jurásico temprano; la Cretácica, constituida por las formaciones Hollín, Napo y Tena basal, desarrolladas bajo distintos ciclos sedimentarios y eustáticos, y la Cenozoica, caracterizada por el relleno sedimentario clástico producto de la orogenia andina (Baby et al., 2014; Barragán et al., 2004).

El desarrollo de la cuenca fue influenciado por distintos episodios tectonoestratigráficos desde el Devónico, pasando por períodos de rifting, compresión y extensión trasarco, hasta la formación de la cuenca de antepaís durante el Aptiano con los depósitos de la Formación Hollín. Durante el Albiano, la transgresión marina global y deformaciones compresivas marcaron el inicio de una sedimentación controlada por bajas tasas de subsidencia. Desde el Cretácico tardío hasta el Cenozoico, importantes eventos tectónicos y la acreción de terrenos provocaron la división de la cuenca en tres dominios tectónicos, que incluyen el sistema Subandino, el corredor Sacha Shushufindi y el sistema Capirón Tiputini (Baby et al., 2014; Díaz et al., 2004).

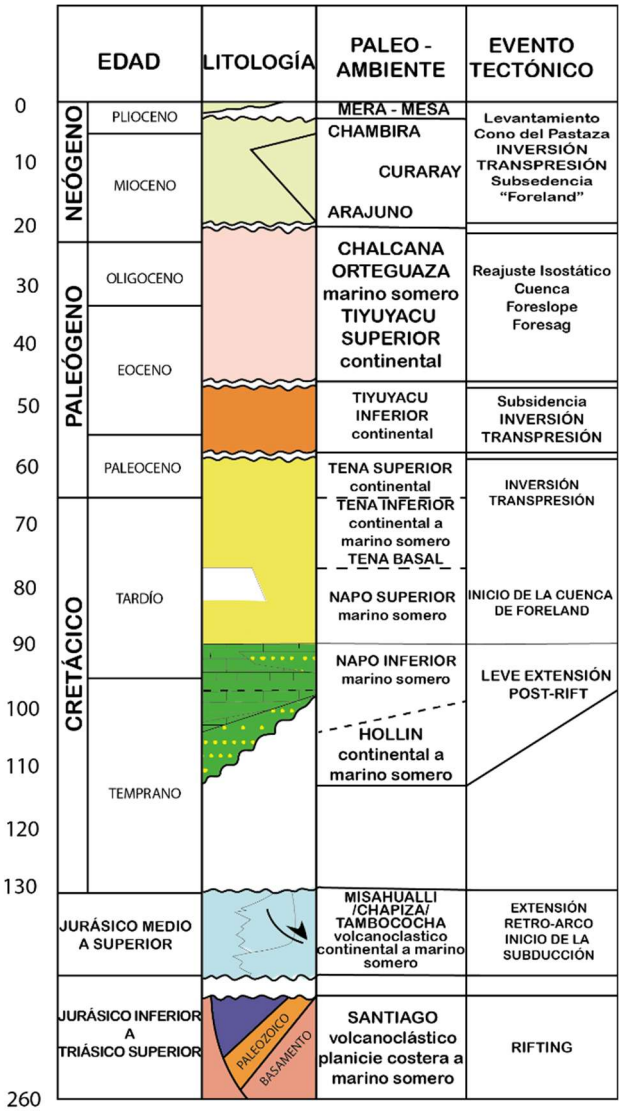

Figura 1. Columna tectonoestratigráfica y eventos geodinámicos que controlaron el desarrollo de la Cuenca Oriente. Modificado de Baby et al. (2014).

2.2.Formación Hollín

Históricamente la Formación Hollín ha sido descrita como areniscas cuarzosas porosas, de grano fino a grueso, de espesores métricos, caracterizada por presentar estratificación cruzada, ondulada e intercalación con lutitas. Esta formación, descansa en discordancia sobre terrenos volcánicos y volcanoclásticos de edad paleozoica y jurásica (Canfield et al., 1982; Jaillard et al., 1997; Shanmugam et al., 2000; Tschopp, 1953; Wasson & Sinclair, 1927).

Se han reconocido dos miembros para la Formación Hollín; el miembro Hollín Principal también conocido como miembro Hollín Inferior y el miembro Hollín Superior. Los miembros en conjunto presentan espesores que varían desde cero hasta alrededor de los 300 m, disminuyendo su espesor en dirección este y noreste (White et al., 1995). Los análisis de proveniencia realizados indican que el miembro Inferior muestra un intenso predominio de fuente cratónica con un aporte ígneo menor, mientras que el miembro Superior sugiere una fuente predominantemente cratónica (Barragán et al., 2004; Canfield et al., 1982; Rivadeneira & Almeida, 2014; Rivadeneira & Baby, 2004; Romero et al., 2020; Shanmugam et al., 2000; Vallejo et al., 2021). La edad estimada para la Formación Hollín, a través de datación U – Pb en circones (Vallejo et al., 2021), se ha determinado en ~120 Ma.

La Formación Hollín, abarca una variedad de ambientes y subambientes de depositación a lo largo de sus miembros. Aunque la evolución del sistema fluvial a marino es un consenso general, existen discrepancias en las características específicas y procesos de depositación, lo que ha generado debate (Barragán et al., 2004; Higgs, 2002; Macellari, 1988; Shanmugam et al., 2000; Souza Cruz, 1989). El miembro Inferior está dominado por un sistema fluvial trenzado, con canales de alta a media energía depositando areniscas gruesas y lutitas finas en llanuras de inundación, con dirección de transporte N-NO. Por otro lado, el miembro Superior marca el abandono del sistema fluvial y la aparición de facies transicionales y marinas someras con transporte bidireccional E-NE y S-SO, se sugieren deltas con depósitos arenosos, frentes deltaicos con sedimentos intercalados, zonas prodeltaicas con lutitas finas, playas y barras litorales caracterizadas por areniscas finas, plataforma somera con depósitos más finos y calizas bioclásticas, y ambientes estuarinos con sedimentos finos y capas orgánicas (Jaillard et al., 1997; Rivadeneira & Almeida, 2014; Romero et al., 2019; Vallejo et al., 2021; White et al., 1995).

3. Metodología

El área de estudio se localiza en la provincia de Napo, 10 km al este de la intersección de Narupa, avanzando por la carretera E20, en las coordenadas 0.70642857 S, 77.74328430 O.

El análisis sedimentológico y estratigráfico de la formación se realizó mediante la observación directa y detallada de cada estrato en el afloramiento. Las características sedimentológicas fueron registradas y medidas estrato por estrato, y se representaron gráficamente a escala 1:20. A partir de estas observaciones, se construyó una columna estratigráfica compuesta, desde el contacto basal de la Formación Hollín con la Formación Misahuallí, en una sección adecuada, continua y no deformada.

Durante el trabajo de campo la recolección de muestras de roca se realizó con un intervalo de muestreo basado en las variaciones texturales, siendo predominantemente centimétrico. Se enfatizó la descripción detallada de la litología, textura, geometría de los cuerpos, así como los tipos de contacto, continuidad lateral y estructuras sedimentarias observadas. También, se evaluó el grado de impregnación de hidrocarburos mediante una escala visual de cuatro niveles, que incluye; muy impregnado, moderadamente impregnado, ligeramente impregnado y sin impregnación. Esta condición, así como el avanzado estado de meteorización en algunas secciones, dificultaron la apreciación de las estructuras sedimentarias y limitaron la calidad de las imágenes capturadas, las cuales no reflejan fielmente muchas de las características sedimentarias observadas in situ.

El análisis sedimentológico se llevó a cabo en el Laboratorio de Ciencias de la Tierra de la Universidad Regional Amazónica Ikiam, donde se realizó un estudio detallado de la textura de las muestras de roca, utilizando un estereomicroscopio y un micrómetro para una observación más precisa.

Las rocas clásticas fueron clasificadas utilizando el esquema de clasificación de areniscas de

Pettijohn et al. (1987) y el diagrama triangular de clasificación de mezclas de grava, lodo y arena propuesto por Folk (1980). Para la textura, se hizo uso de la escala de tamaño de grano de sedimentos clásticos de Udden (1914) y Wentworth (1922), junto con el diagrama de estimación visual de porcentajes y escogimiento de Mansfield & Harrell (1985) y los diagramas de estimación visual de redondez y esfericidad de Pettijohn et al. (1987).

Las descripciones macroscópicas del afloramiento, complementadas con el análisis microscópico, se emplearon para la identificación de facies. El análisis de facies se fundamentó en la evaluación de los litotipos, las estructuras sedimentarias y los procesos de transporte y depositación del sedimento, lo que permitió determinar el ambiente sedimentario en el que se formó la actual roca.

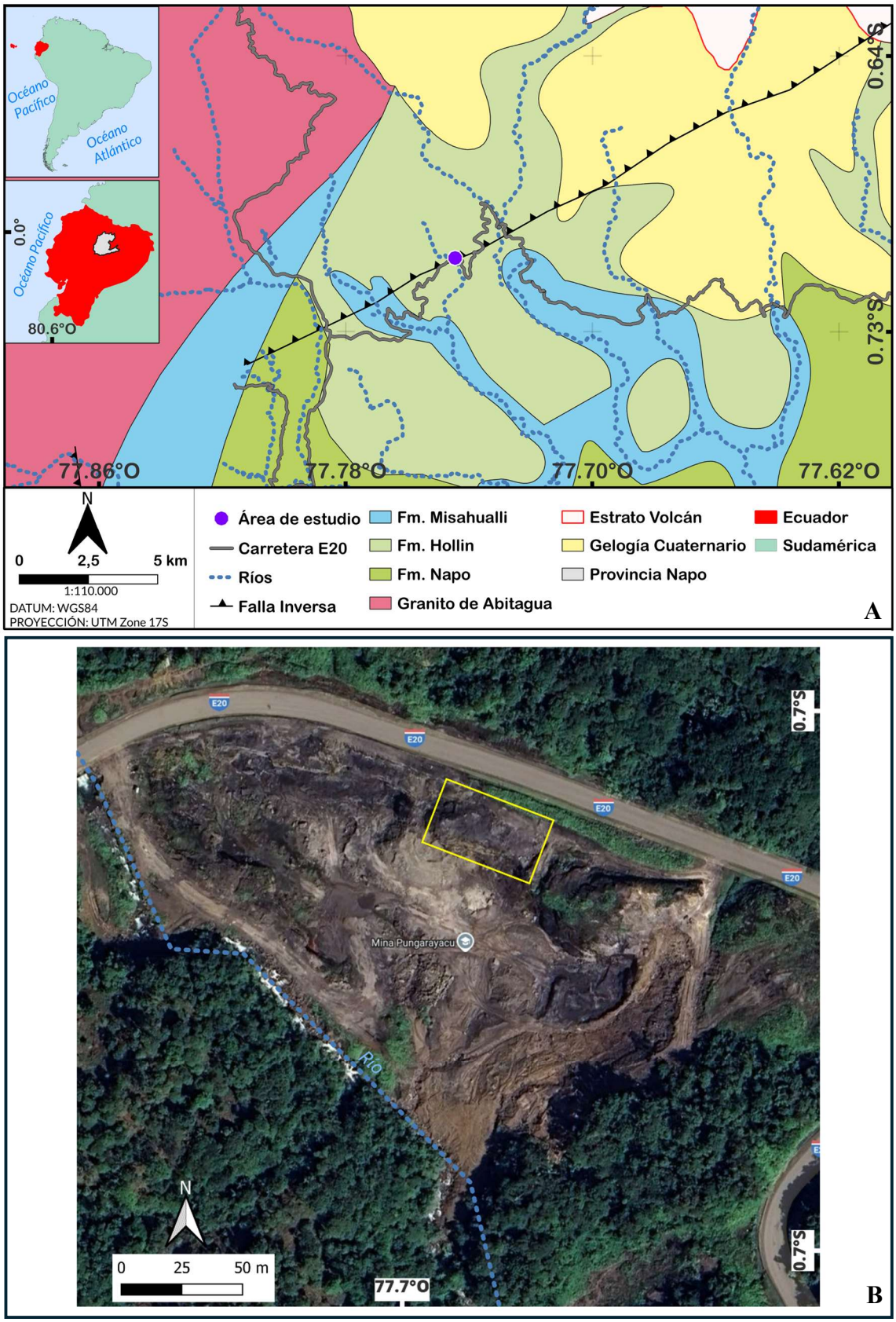

Figura 2. Área de Estudio. A) Mapa geológico del área de estudio realizado a partir de Egüez et al. (2003, 2017). B) Imagen satelital detallada del área de estudio, el recuadro amarillo especifica el área de estudio.



Figura 3. Esquema del levantamiento de información. Esquema representativo de los puntos de levantamiento de información y toma de muestras en el afloramiento de la cantera Pungarayacu. La capa de color celeste, que representa a la Fm. Misahuallí, junto con la línea punteada indican la capa guía que sirvió de referencia en el levantamiento de información. Las líneas sólidas de color negro indican las discontinuidades presentes en la cantera, las cuales permitieron definir el área de estudio.

4. Resultados

4.1. Descripción de Facies e Interpretación

En base a los análisis litológicos y texturales se identificó nueve facies sedimentarias, principalmente siliciclásticas, que reposan discordantemente sobre un depósito volcanosedimentario. Estas facies comprenden tres conglomeráticas, tres arenosas, dos finas compuestas de diferentes proporciones de arena y lodo y una carbonosa.

4.1.1. Facies 1 (Arenisca gravosa)

Esta facies se constituye de areniscas cuarzosas gravosas con guijarros y clastos de lodo. Las areniscas son predominantemente de tamaño de grano arena gruesa llegando a presentar gránulos, muestran mal a muy mal escogimiento, con granos redondeados y de alta esfericidad, compuestos principalmente por cuarzo. Por otro lado, los guijarros y clastos de lodo (15%), están distribuidos de manera dispersa y no ordenada en los estratos, son subangulosos, de baja esfericidad y con dimensiones de hasta 1 cm. Las rocas pertenecientes a esta facies son masivas,

de morfología acanalada, presentan bases erosivas y forman cuerpos de espesores máximos de 80 cm. Esta facies puede presentarse moderadamente impregnada a muy impregnada de hidrocarburo.

Interpretación

La presencia de areniscas cuarzosas gravosas con guijarros y clastos de lodo dispersos, junto con su mal escogimiento, textura masiva y bases erosivas, son indicativos de una rápida sedimentación bajo condiciones de alta energía y baja capacidad de selección, típicos de flujos turbulentos o hiperconcentrados. Las características permiten interpretar el depósito como flujo hiperconcentrado e indican un mecanismo de depositación por congelamiento friccional como resultado de la interacción grano - grano (Mulder & Alexander, 2001). Los flujos de inundación y corrientes de alta energía en el inicio de la sedimentación de la Fm. Hollín probablemente desmembraron secciones del basamento volcánico y volcanoclástico que serían arrastrados y depositados luego con el naciente estrato (Vallejo et al., 2021).

4.1.2. Facies 2 (Conglomerado arenoso)

La facies se constituye por conglomerados soportados por matriz cuarzoarenosa. Los clastos del conglomerado varían de tamaño gránulos a guijarros (40%), pueden presentarse de manera aleatoria flotando dentro de la matriz, aunque en ocasiones se encuentran alineados en posición subhorizontal. Los clastos muestran mal escogimiento con granos redondeados y subredondeados de alta esfericidad, compuestos predominantemente por cuarzo. El conglomerado está soportado por una matriz de tamaño arena media a gruesa (60%), exhibe moderado escogimiento y está constituida predominantemente por cuarzo. Los cuerpos de esta facies son tabulares o acanalados, pueden mostrar bases erosivas y espesores que varían entre 5 a 30 cm. Esta facies puede presentarse moderadamente impregnada a muy impregnada de

hidrocarburo.

Interpretación

La textura bimodal de la facies, junto con su morfología y bases erosivas, reflejan una acumulación por procesos combinados de carga de lecho y carga suspendida, relacionados al sobrepaso de un flujo hiperpícnico de larga duración (Zavala & Pan, 2018). Los clastos de mayor tamaño probablemente fueron transportados por deslizamiento y rodadura, mientras que los materiales más finos, que componen la matriz, corresponderían a cargas suspendidas transportadas por turbulencia, que quedaron atrapadas en la zona basal de baja velocidad y concentración relativamente alta del flujo (Zavala et al., 2011; Zavala & Arcuri, 2016; Zavala & Pan, 2018). Los gránulos y guijarros se mueven libremente en la base del flujo turbulento que pasa por encima, lo que explica su tendencia a aparecer imbricados o alineados (Zavala & Arcuri, 2016).

4.1.3. Facies 3 (Conglomerado arenoso con clastos de lodo)

La facies se constituye por conglomerados soportados por una matriz cuarzoarenosa y clastos de lodo. Los clastos del conglomerado son de tamaño que varía entre gránulos a guijarros (60%) y en ocasiones hasta cantos (5%), están mal escogidos siendo redondeados y subredondeados de alta esfericidad. Los clastos están constituidos principalmente por cuarzo y lodo. Los clastos de lodo tienen forma discoidal y sus ejes mayores se encuentran en posición paralela y subparalela a los planos de estratificación. El conglomerado presenta una matriz constituida por arena cuarzosa (35%) con tamaño de grano predominantemente arena media, variando hasta arena gruesa, muestra mal a moderado escogimiento con granos redondeados y subredondeados de alta esfericidad. Los cuerpos de esta facies pueden presentar morfologías lenticulares o tabulares, muestran límites difusos con espesores que varían entre 5 y 45 cm.

Esta facies puede presentarse moderadamente impregnada a muy impregnada de hidrocarburo.

Interpretación

Al igual que la anterior facies esta presenta una textura bimodal debido a la depositación alternante mediante dos procesos: la carga de lecho y carga suspendida. Esta facies es formada en flujos poco confinados, donde los múltiples niveles de clastos de lodo flotantes sugieren un emplazamiento progresivo a medida que el flujo pierde la capacidad de hacerlos rodar (Zavala, 2020; Zavala & Pan, 2018). Las formas redondeadas de los clastos de lodo sugieren un transporte a largas distancias.

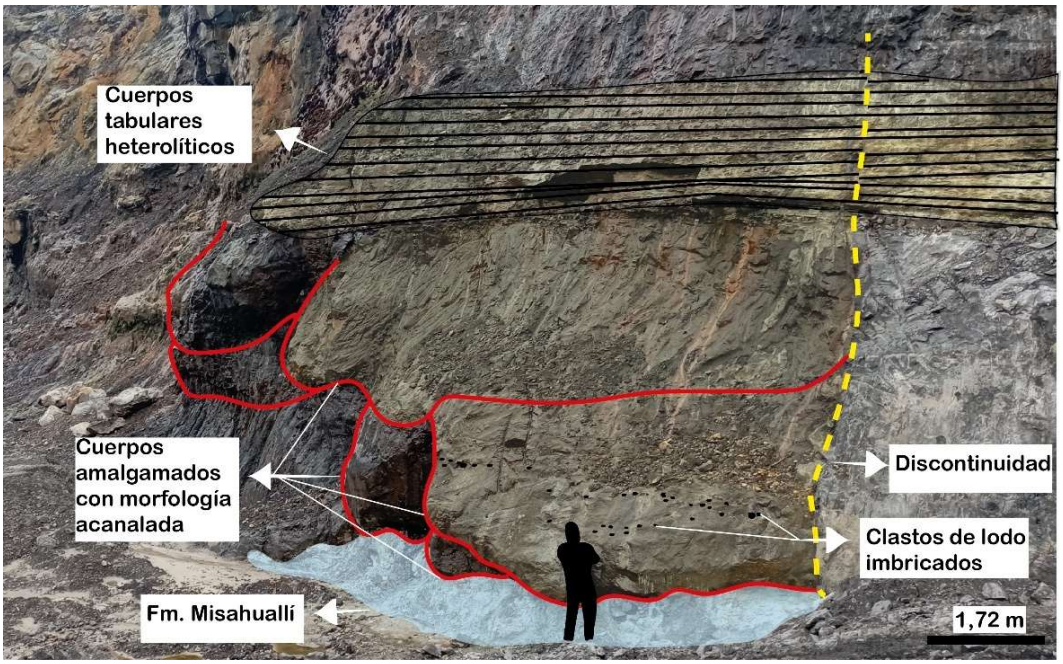

Figura 4. Cuerpos en la sección basal de la Formación Hollín. Esquema de los cuerpos métricos, predominantemente siliciclásticos de la Formación Hollín aflorantes en la cantera Pungarayacu descansando sobre los depósitos volcanosedimentarios de la Formación Misahuallí.

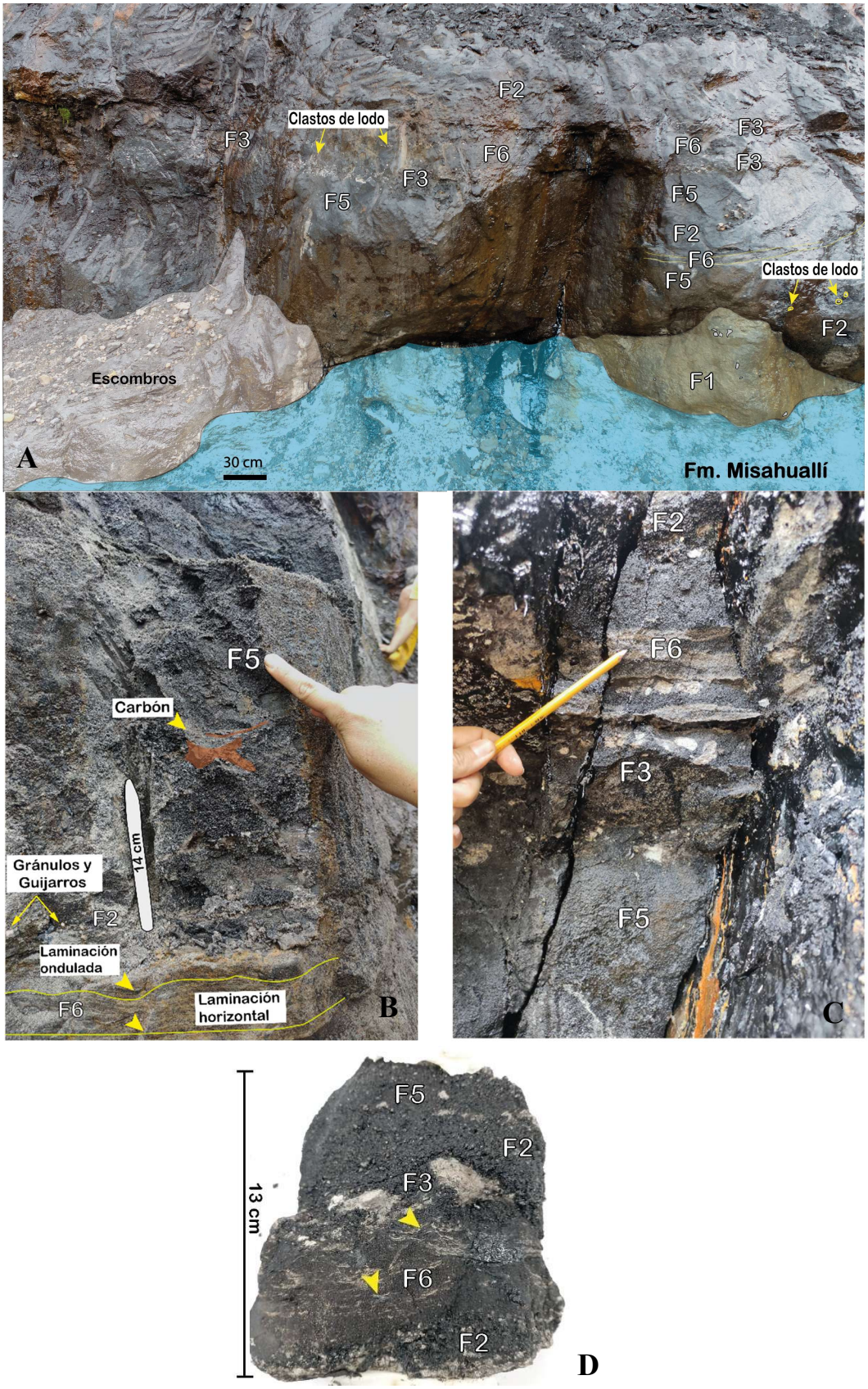

Figura 5. Características de las facies conglomeráticas. Características de las facies conglomeráticas. A) Arreglo de facies complejo dentro de un mismo estrato. B) Gradación inversa y normal con areniscas finas a medias laminadas (facies 6),

conglomerado arenoso (facies 2) y areniscas masivas con fragmentos carbonosos (facies 5). C) Paso gradual entre areniscas masivas (facies 5), conglomerados arenosos con clastos de lodo (facies 3), areniscas laminadas (facies 6) y conglomerados arenosos (facies 2), mostrando las variaciones en las condiciones de flujo. D) Muestra de mano detallando la recurrencia de facies 2, 3, 5 y 6, en flechas amarillas se destaca la presencia de láminas de carbón (facies 9), mostrando la complejidad interna de los estratos compuestos, que son características típicas y diagnósticas de la sedimentación hiperpicnal de larga duración de acuerdo con (Zavala et al., 2011).

4.1.4. Facies 4 (Arenisca con estratificación cruzada asintótica o planar)

La facies está constituida por arenisca cuarzosa con estratificación cruzada asintótica o planar. Las areniscas pertenecientes a estas facies pueden presentar tamaños de grano variables que pueden ser finos, medios y gruesos. Las areniscas muestran buen a moderado escogimiento con granos redondeados y de alta esfericidad, constituidos principalmente por cuarzo. La estratificación cruzada es generalmente asintótica hacia la base, aunque excepcionalmente se puede presentar asintótica hacia el tope (estratificación sigmoidal). Hacia el tope del afloramiento es común que la estratificación cruzada sea plana. Las estratificaciones cruzadas en ocasiones pueden presentarse de manera incipiente y los granos que se encuentran en sus planos de estratificación son de tamaño arena muy gruesa y gránulos. Esta facies presenta morfología tabular, contactos netos o ligeramente erosivos y espesores variables entre los 10 cm y 2 m de espesor. Esta facies se puede presentar desde muy impregnada a sin impregnación de hidrocarburos.

Interpretación

Esta facies está asociada a la migración de formas de lecho rectas (2D) o sinuosas (3D), formadas en un flujo turbulento de larga duración con alta carga suspendida (Miall, 2010; Van den Berg & Nio, 2010; Zavala et al., 2011). Las estructuras asintóticas hacia la base reflejan altas tasas de caída de sedimentos en el lado de sotavento de las dunas, características de flujos sostenidos (Zavala, 2020; Zavala & Pan, 2018). La textura de la facies, incluyendo la inclusión de gránulos en los planos de estratificación, sugieren un ambiente de energía moderada con

episodios más intensos. Los depósitos evidencian transporte y sedimentación dominados por corrientes unidireccionales en un ambiente subácueo bajo flujo diluido y régimen subcrítico.

4.1.5. Facies 5 (Arenisca masiva)

La facies se constituye por areniscas cuarzosas masivas que ocasionalmente pueden presentar intervalos normalmente gradados. Las areniscas son predominantemente de tamaño arena media mostrando en ocasiones variaciones sutiles en el tamaño de grano llegando a presentar arena gruesa y muy gruesa. Las arenas muestran moderado escogimiento, con granos predominantemente redondeados y de alta esfericidad, estando compuestos predominantemente por cuarzo. Esta facies puede mostrar gránulos de lodo y restos carbonosos. Las rocas pertenecientes a esta facies son de morfología tabular o lenticular, muestran contactos netos o transicionales y espesores que varían entre 3 a 1.80 cm. La facies puede presentarse moderadamente impregnada a muy impregnada de hidrocarburo.

Interpretación

El origen de esta facies estaría relacionado con la agradación progresiva por flujos sostenidos con alta carga suspendida, conforme el flujo pierde su capacidad de transporte (Kneller & Branney, 1995; Zavala & Pan, 2018). Estudios experimentales indican que este tipo de depósitos se origina a partir de flujos turbulentos con tasas de decantación superiores a 0,44 mm/s que inhiben la formación de estructuras sedimentarias primarias (Sumner et al., 2008). Sin embargo, los intervalos normalmente gradados sugieren que pudo existir una tendencia a la segregación gravitacional durante la caída del material en suspensión (Xian et al., 2018). La presencia de gránulos de lodo y restos carbonosos están relacionados a tasas de decantación de materiales más elevadas, provocando principalmente el atrapamiento de restos vegetales y otros componentes ligeros transportados dentro del flujo turbulento (Zavala & Pan, 2018). Los contactos netos a transicionales indican una disminución del poder erosivo del flujo (Xian et

al., 2018).

4.1.6. Facies 6 (Arenisca laminada)

La facies se constituye por areniscas cuarzosas con laminación horizontal y ondulada. Las areniscas son de tamaño de grano predominantemente medio variando a fino, muestran buen a moderado escogimiento con granos redondeados y subredondeados de alta esfericidad. Las laminaciones presentan granos subangulares de baja esfericidad constituidos principalmente por cuarzo. Las areniscas muestran hacia la base y parte media de la capa laminación paralela horizontal, en algunos casos pueden ser incipientes. Hacia el tope de las capas se presentan laminaciones onduladas. Las láminas tienen espesores milimétricos variando desde 0,2 a 2 mm. Los cuerpos de esta facies presentan morfología tabular, con contactos netos que en ocasiones puede ser transicionales, pueden presentar espesores que varían entre 5 a 50 cm. Esta facies está impregnada y moderadamente impregnada de hidrocarburo.

Interpretación

El origen de esta facies está asociado con flujos hiperpícnicos diluidos, donde los procesos combinados de tracción y caída controlan la sedimentación (Sumner et al., 2008; Zavala et al., 2011; Zavala & Pan, 2018). Cuando la carga en suspensión y la tasa de caída disminuyen, las laminaciones tienden a ser más delgadas (Xian et al., 2018). Además, la presencia de onduaciones hacia el tope de las facies sugieren una posible reacomodación sedimentaria, probablemente influenciada por corrientes bidireccionales que actuaron sobre los sedimentos ya depositados (Zavala & Pan, 2018).



Figura 6. Características de las facies arenosas. A) Estratificación cruzada asintótica (facies 4) en asociación con facies masivas (facies 5), laminadas (facies 6) y carbonosas

(facies 9). B y C) Estratificación cruzada planar. D) Facies laminadas (facies 6) con delgadas láminas de carbón (facies 9, flechas amarillas) y areniscas masivas (facies 5).

4.1.7. Facies 7 (Intercalación heterolítica de areniscas de grano fino, areniscas de grano muy fino limosas y lodolitas micáceas)

La facies se constituye por una intercalación de areniscas de grano fino con areniscas de grano muy fino limosas ricas en materia orgánica y lodolitas micáceas. Las areniscas de grano fino (68% de la facies) pueden presentar en ocasiones gránulos y guijarros, muestran buen escogimiento, con granos redondeados y subredondeados de alta esfericidad, estando constituidos principalmente por cuarzo, y en ocasiones muestran localizadamente recristalización por pirita. Estas areniscas presentan espesores variables que rara vez superan los 5 cm, exhiben predominantemente laminación ondulada asimétrica, continua o discontinua, que en ocasiones puede presentar morfología lenticular. Por otra parte, las areniscas muy finas limosas (30% de la facies) presentan buen escogimiento con granos subredondeados a redondeados de alta esfericidad. Estas areniscas pueden presentar espesores que varían de 0.3 mm a 1 cm y exhiben predominantemente laminación ondulada asimétrica. Intercalado con las unidades arenosas se encuentran láminas de lodolita rica en micas, material carbonoso, gránulos y guijarros de ámbar (2% de la facies), estas láminas tienen espesores que varían de 0.1 a 0.4 mm. Esta facies forma paquetes que presentan morfología tabular, contactos netos o ligeramente erosivos y espesores variables entre 10 y 94 cm. Las unidades arenosas de esta facies pueden presentarse ligeramente impregnadas o sin impregnación de hidrocarburos.

4.1.8. Facies 8 (Intercalación heterolítica de lodolitas y areniscas finas a medias)

La facies se constituye por la intercalación de lodolitas muy orgánicas con láminas o capas de arenisca de grano fino a medio. Las lodolitas (70% de la facies) pueden presentar hasta un 20%

de granos de arena muy fina, muestran abundancia de micas claras y fragmentos carbonosos. Las lodolitas presentan espesores variables entre 0.3 mm y 3 cm, presentan morfología ondulada o tabular. Por otro lado, las areniscas son predominantemente de tamaño arena fina a media, de moderado a buen escogimiento con granos de alta esfericidad, constituidos principalmente por cuarzo. Las areniscas presentan espesores variables entre 0.2 mm y 1 cm, presentan laminación ondulada y en ocasiones morfología lenticular. Esta facies forma paquetes que presentan morfología tabular, contactos netos o ligeramente erosivos y espesores variables entre 60 y 90 cm. Esta facies presenta nula impregnación de hidrocarburo.

Interpretación Facies 7 y 8

Los depósitos heterolíticos, definidos por Reineck and Wunderlich, (1968), se caracterizan por alternancias centimétricas de areniscas finas con diversas estructuras sedimentarias y lodolitas masivas o laminadas. Se interpreta que estas facies heterolíticas ricas en materia orgánica están asociadas a procesos de "lofting" por la interacción de procesos de caída gravitacional y tracción – decantación de larga duración, con transporte de arena en suspensión y sedimentación de arcilla, limo y materia orgánica bajo condiciones de baja energía (Zavala et al., 2011), donde se puede generar un ambiente euxínico propicio para la formación de concreciones de pirita. Las características fragmentadas y de pequeño tamaño de la materia orgánica observada sugiere transporte a través de considerables distancias.

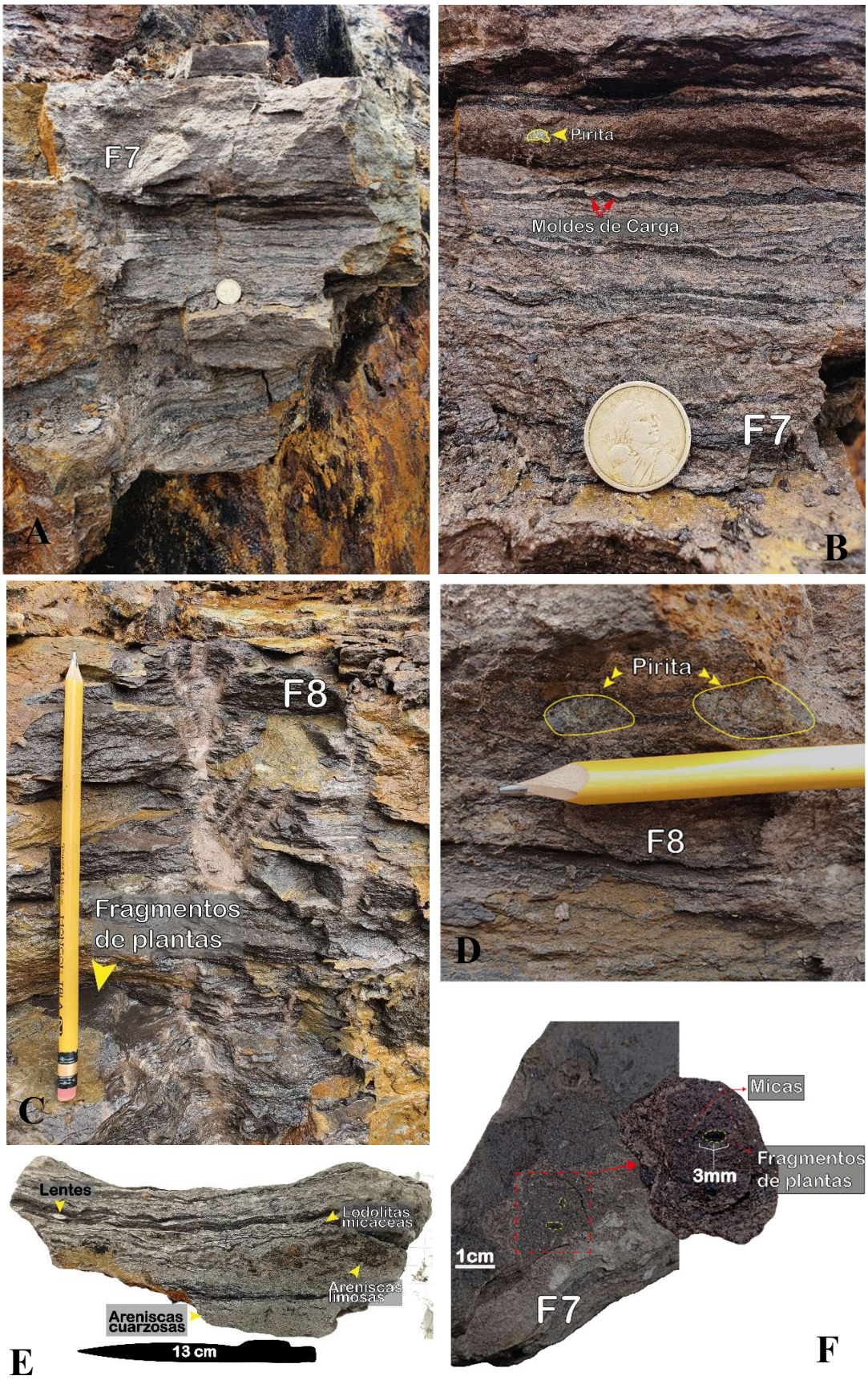

Figura 7. Características de las facies heterolíticas. A) Facies heterolíticas dominadas por arenas (facies 7). B) Detalle de (A) donde se observa laminaciones

de arena y finas laminaciones de lodo, se destaca la presencia de pirita, moldes de carga y laminación ondulada. C) Facies heterolíticas dominadas por lodo (facies 8), se destaca la presencia de pequeños fragmentos de materia orgánica. D) Facies heterolíticas dominadas por lodo (facies 8) donde se destaca la presencia de pirita microcristalina. E) Muestra de mano de facies heterolíticas dominadas por arenas donde se destaca la laminación lenticular y se muestra la laminación ondulada ligeramente asimétrica. F) Vista en planta de una muestra de mano de las facies heterolíticas detallando el contenido de materia orgánica y micas.

4.1.9. Facies 9 (Carbón)

La facies está constituida por carbón. Esta facies es de aspecto masivo o laminado. Internamente, se puede observar la presencia de clastos de ámbar de diámetros variables hasta guijarros, de color naranja parduzco. La facies puede manifestarse en el afloramiento como laminaciones continuas y no continuas de pocos milímetros a varios centímetros de espesor. Estas láminas pueden ser inclinadas, horizontales u onduladas. También, pueden aparecer como fragmentos aislados o adaptándose a las morfologías de los estratos arenosos en los extremos inferiores (pies) de las estratificaciones cruzadas de las demás facies. Los límites inferior y superior de esta facies están definidos por la presencia de abundante mica. La facies presenta espesores variables entre 1 a 10 cm y aparecen en asociación con la mayoría de las demás facies, predominantemente entre los planos de estratificación.

Interpretación

De acuerdo con Carrascal-Miranda & Suárez-Ruiz, (2004), los filones de carbón presentes en la región Subandina son delgados y su rango es de bituminoso a antracita. Esta facies se habría acumulado por decantación de restos vegetales en un medio de baja energía, posiblemente subacuático. Los yacimientos de carbón encontrados en localidades del cinturón tropical están asociados a ambientes húmedos y proporcionan pruebas sólidas de antiguos climas de selva tropical húmeda.

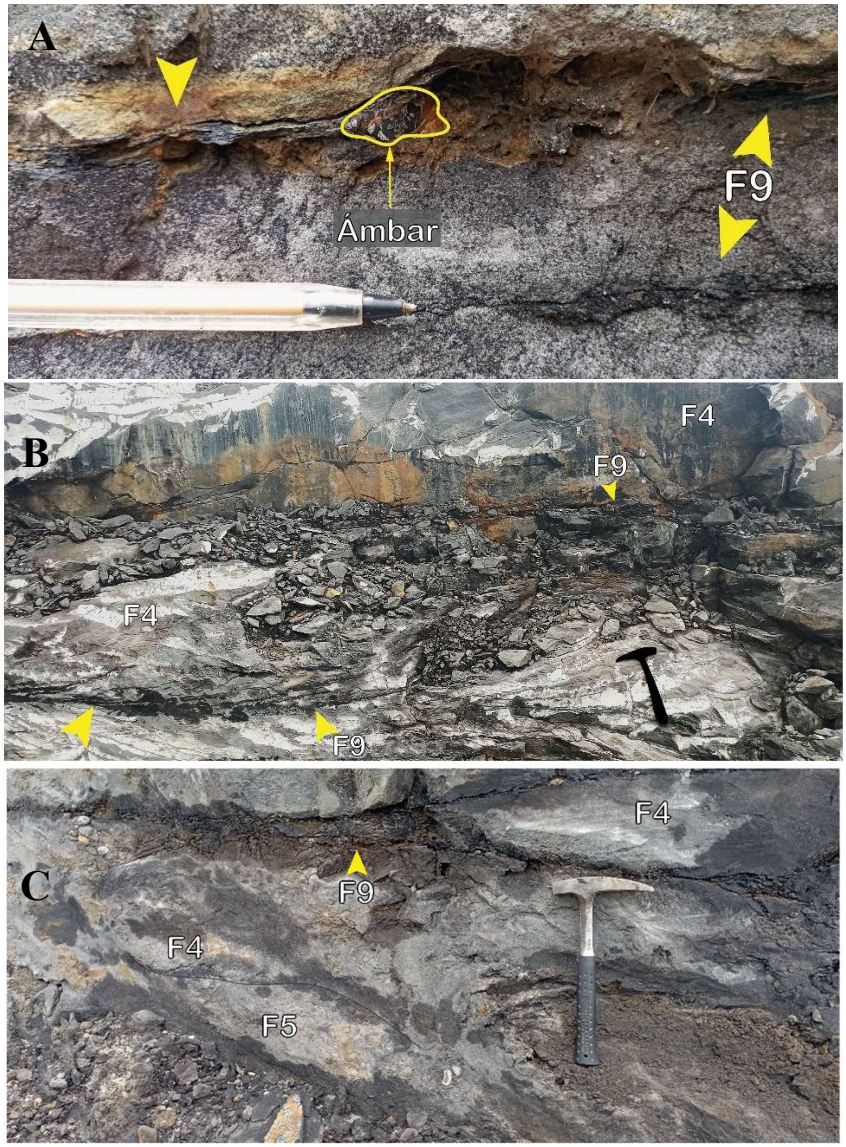

Figura 8. Características de la facies carbonosa. A) Láminas de carbón (facies 9) y fragmentos de ámbar presentes en los planos de estratificación y entre los cuerpos de areniscas masivas (facies 5). B) Cortinas de carbón imitando la morfología asintótica de los cuerpos de arenisca con estratificación cruzada (facies 4). C) Capas de carbón.

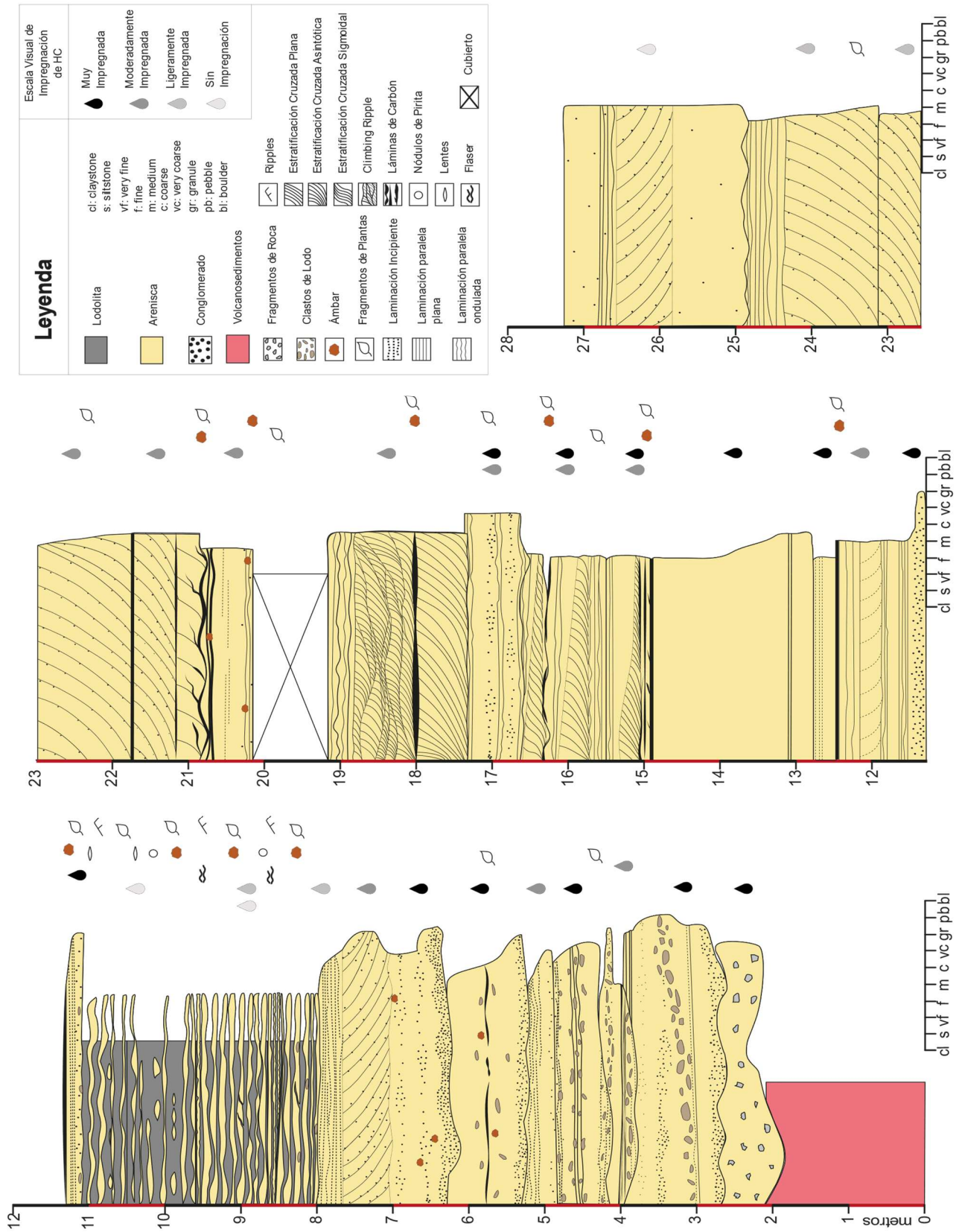

Figura 9. Sección estratigráfica de la Formación Hollín en la cantera Pungarayacu.

4.2.Asociación de Facies

Teniendo en cuenta la distribución vertical de las nueve litofacies identificadas y descritas anteriormente, estas se agruparon en tres asociaciones de facies principales denominadas; Asociación de facies 1 (AF1), que agrupa facies 2, 3, 5 y 6; Asociación de facies 2 (AF2) con la agrupación de facies 4,5 y 6 y Asociación de facies 3 (AF3) con la agrupación de facies 7, 8 y 9.

4.2.1. Asociación de Facies 1

Esta asociación de facies se reconoce por su predominio de conglomerados arenosos y niveles de conglomerados arenosos con clastos de lodo (facies 2 y 3), incluyendo en menor proporción areniscas masivas y areniscas laminadas (facies 1, 5 y 6). La asociación se presenta predominantemente en la parte basal de la sección estratigráfica y está constituida por cuerpos amalgamados de hasta 1 m de espesor y 3 m de extensión lateral, con geometrías lenticulares, acanaladas y contactos basales erosivos. Internamente, esta asociación muestra cambios transicionales y recurrentes en sus variaciones texturales. Localmente, los paquetes tienen un arreglo grano creciente sucedido por uno decreciente, presentando cuerpos de areniscas laminadas sucedidos por conglomerados arenosos con clastos de lodo, que pasan hacia conglomerados arenosos y areniscas masivas, culminando con depósitos de areniscas laminadas. Estos paquetes contienen fragmentos de materia orgánica dispersos en los estratos o dispuestos en los planos de estratificación de las laminaciones horizontales.

4.2.2. Asociación de Facies 2

Esta asociación de facies está compuesta principalmente por areniscas con estratificación cruzada asintótica y plana de ángulo moderado (facies 4), las cuales suelen estar asociadas hacia el tope con areniscas laminadas (facies 6) y areniscas masivas (facies 5). De manera

esporádica, se observan delgados niveles de carbón (facies 9). La AF2 se caracteriza por presentar cuerpos tabulares o acanalados de hasta 2.30 m de espesor, con contactos basales ligeramente erosivos. Aunque se evidencian características erosivas en esta asociación de facies, estas no son tan pronunciadas como las observadas en la AF1.

4.2.3. Asociación de Facies 3

Esta asociación de facies está compuesta principalmente por facies heterolíticas (facies 7 y facies 8) intercaladas con delgadas láminas de carbón (facies 9). La asociación de facies forma paquetes heterolíticos de aproximadamente 2 m de espesor con geometría tabular, contactos inferiores netos o muy ligeramente erosivos y gran continuidad lateral. Las facies heterolíticas que constituyen la AF3 pueden estar dominados por areniscas o lodolitas. Los paquetes dominados por areniscas están conformados por areniscas finas a medias, masivas o con rizaduras, que se presentan intercalados con lodolitas laminadas o masivas. Los paquetes dominados por lodolitas están constituidos por lodolitas laminadas o masivas intercaladas con areniscas de grano fino con rizaduras y morfología lenticular.

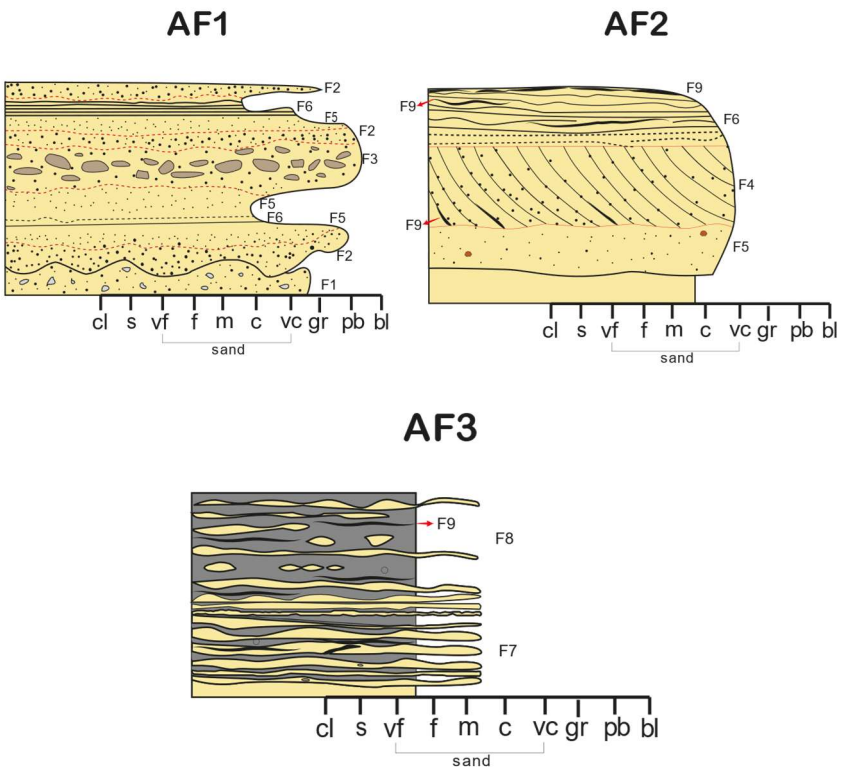

Figura 10. Clasificación de la asociación de facies. (AF1) Asociación de facies 1, principalmente compuesta por facies 2 y 3 incluyendo facies 5 y 6 y de manera exclusiva presentando facies 1, en la asociación se observa los contactos basales muy erosivos y superficies de erosión interna debido a la fluctuación de energía del flujo. (AF2) Asociación de facies 2, principalmente constituida por facies 4 intercalada con intervalos de facies 5 y 6. Esta asociación incluye esporádicamente facies 9 y muestra bases ligeramente erosivas. (AF3) Asociación de facies 3, se integra por facies 7 y 8 intercalada con delgados niveles de facies 9, esta asociación presenta contactos netos o ligeramente erosivos.

5. Discusión

5.1. Flujo hiperpícnico como mecanismo de depositación

Estudios previos sobre la Formación Hollín han propuesto que el miembro Hollín Principal se originó predominantemente en un ambiente de depositación asociado a sistemas fluviales trenzados, con sinuosidad variable entre alta a baja (Rivadeneira & Baby, 2004; Romero et al., 2019, 2020), aunque Quiroz Cabascango, (2021) propone una depositación en ambientes

lacustres y subambientes de llanura y lóbulos deltaicos. En general, los depósitos son interpretados como depósitos de desbordamiento con complejos de barras y canales evidenciando una evolución en el proceso de transporte, desde carga suspendida a carga mixta dominada por arenas (Vallejo et al., 2021). Los análisis sedimentológicos de alta resolución, los análisis de facies y de asociaciones de facies realizados en el presente estudio sugieren procesos de transporte y depositación más complejos que los definidos para ambientes fluviales convencionales. Estos procesos complejos apuntan a la influencia de flujos hiperpícnicos como mecanismo principal de transporte y depositación de sedimentos en el área estudiada.

Los flujos hiperpícnicos son un tipo de flujo gravitacional asociados a eventos de crecidas fluviales extremas. La densidad de estos flujos, cargados de sedimentos y materia orgánica terrestre supera la densidad del cuerpo de agua receptor, permitiendo que el flujo se hunda y avance bajo la acción de la gravedad en un estado casi estable (Zavala et al., 2006, 2011; Zavala & Arcuri, 2016). Este tipo de flujo puede transportar sedimentos de manera sostenida a lo largo de grandes distancias cuenca adentro, generando depósitos con características específicas distintas a las generadas por otros flujos gravitacionales (Zavala, 2020; Zavala & Arcuri, 2016).

El afloramiento estudiado en la cantera Pungarayacu presenta características específicas que lo diferencian de un depósito en un ambiente sedimentario convencional, entre estas características podemos enumerar:

1) La presencia de estratos compuestos que muestran gradación inversa sucedida por gradación normal.

2) La presencia de paquetes de arena, amalgamados, que internamente muestran arreglos de facies complejas con múltiples superficies de erosión interna.

3) Cuerpos heterolíticos con gran cantidad de materia orgánica y micas.

4) Presencia de fragmentos leñosos y carbonosos a lo largo de la secuencia estudiada.

Características sedimentológicas y morfológicas similares han sido reportadas por otros investigadores en depósitos sedimentarios de ambientes subacuáticos (aguas profundas, lacustres, deltaicos y otros) recientes y antiguos y se ha interpretado como el producto de flujos hiperpícnicos. (Bhattacharya & MacEachern, 2009; Diaz et al., 2021; Grundvåg et al., 2023; Irastorza et al., 2021; Mulder et al., 2003; Xian et al., 2018; Yan et al., 2020; Yang et al., 2019; Zavala et al., 2006, 2011, 2019; Zavala, Marcano, et al., 2012; Zavala & Pan, 2018).

La similitud entre las características sedimentológicas y morfológicas existentes en los depósitos presentes en el área de estudio y los depósitos atribuídos a flujos hiperpícnicos nos hace interpretar que los depósitos estudiados son el producto de flujos gravitacionales de alta densidad y larga duración generados por crecidas extremas de ríos que entran en un ambiente subacuático e invaden la plataforma continental descargando los sedimentos a lo largo de la plataforma resultando en un delta hiperpícnico litoral (Zavala et al., 2024). Este ambiente depositacional implica que la carga sedimentaria transportada por flujos hiperpícnicos se acumula en la plataforma continental más allá de la línea de costa (figura 11a). Este hallazgo también se ve reforzado por el clima cálido y húmedo existente en la cuenca durante el Cretácico Superior, con espesa vegetación y frecuentes episodios de inundación (Quiroz Cabascango, 2021), que pudieron impulsar la generación de flujos hiperpícnicos.

5.2. Sistemas Depositacionales y Elementos arquitecturales en la sección basal de la Formación Hollín

En el presente trabajo se propone un modelo depositacional y la evolución espacial para los depósitos hiperpícnicos de la sección basal de la Formación Hollín. Este modelo se basa en la teoría propuesta por Zavala et al. (2006), que propone que los sistemas hiperpícnicos van perdiendo energía y capacidad erosiva a medida que viajan cuenca adentro. En función del

modelo se proponen 3 zonas de depositación; la zona proximal con el canal principal, la zona intermedia con los canales distributarios y la zona distal con lóbulos.

5.2.1. Zona Proximal – Canal Principal

El conjunto de facies presentes en la AF1, así como, la morfología de sus cuerpos, resaltando su morfología acanalada, nos permiten interpretar que estas facies representan el depósito de canales principales en una zona proximal. Las superficies erosivas internas, las variaciones en las estructuras sedimentarias, los cambios texturales transicionales y el contenido de materia orgánica reflejan fluctuaciones de energía en el flujo hiperpícnico. La amalgamación de cuerpos sugiere un origen compuesto, donde la incisión principal del canal ocurre durante la fase de máxima aceleración del flujo, mientras que su relleno se da en la fase de desaceleración, favoreciendo el vertido rápido de arena. Esta dinámica genera depósitos de arena compuestos, con clastos de lodo y fragmentos de materia orgánica dispuestos paralelos a los planos de estratificación, evidenciando la interacción entre carga de lecho y carga en suspensión, así como una conexión con sistemas fluviales continentales. Los ciclos de descarga hiperpícnica están representados por arreglos granocrecientes mientras que las fases de desaceleración máxima generan paquetes granodecrecientes (Zavala et al., 2006, 2011).

5.2.2. Zona Intermedia - Canales Distributarios

El conjunto de facies presente en la AF2, caracterizados por la presencia de cuerpos con estratificación cruzada y laminados, nos permiten interpretar que estas facies representan el depósito de canales distributarios en una zona intermedia dentro del sistema deltaico hiperpícnico. Los canales distributarios representan una transición importante entre las áreas proximales, dominadas por flujos de mayor energía, y las áreas más distales, donde predomina la sedimentación de menor energía. La presencia de cuerpos con estratificación cruzada y laminación paralela, así como, cuerpos de arenisca masiva, indican la pérdida progresiva de la

energía del flujo hiperpícnico, permitiendo una sedimentación selectiva y el desarrollo de estructuras sedimentarias. El comportamiento inestable del flujo debido a variaciones hidrodinámicas resulta en la ramificación progresiva del canal principal (Zavala et al., 2006). Desde una perspectiva geométrica, la AF2 está constituida por algunos cuerpos con formas de cuña, con un grosor mayor cerca del canal principal que se adelgaza hacia las posiciones distales, evidenciando la capacidad del flujo hiperpícnico de extenderse lateralmente mientras pierde energía.

5.2.3. Zona Distal - Lóbulos

El conjunto de facies heterolíticas presentes en la AF3 nos permite interpretar que estas facies representan el depósito de lóbulos en una zona distal, donde los paquetes dominados por arenisca se encuentran más cerca del eje del canal y los dominados por lodolita se disponen en posiciones más alejadas (Zavala et al., 2006). Las capas arenosas de estos depósitos muestran estructuras sedimentarias asociadas a procesos de tracción, mientras que las láminas y capas de lodolita y materia orgánica se asocian con procesos de decantación. Estas características se corresponden con procesos de "lofting", que son específicos de ambientes salinos (Zavala et al., 2011). El "lofting" o la inversión de flotabilidad es inducida por la elevación de agua dulce contenida en el flujo hiperpícnico a medida que se pierde la carga en suspensión por la disminución de energía. Cuando el agua dulce menos densa se eleva del fondo del flujo, arrastra consigo sedimentos más ligeros y materia orgánica en suspensión, luego se produce una caída libre de los granos de arena más grandes que fuerzan la depositación de fragmentos vegetales y micas, provocando que se desarrollen delgados niveles de material carbonoso entre los niveles de arena y lodo (Zavala, Arcuri, et al., 2012). Las facies de "lofting" suelen extenderse y depositarse en forma de lóbulos principalmente en los márgenes de los canales reflejando la transición de depósitos canalizados de alta energía a depósitos lobulados de baja energía

(Zavala et al., 2011; Zavala & Pan, 2018).

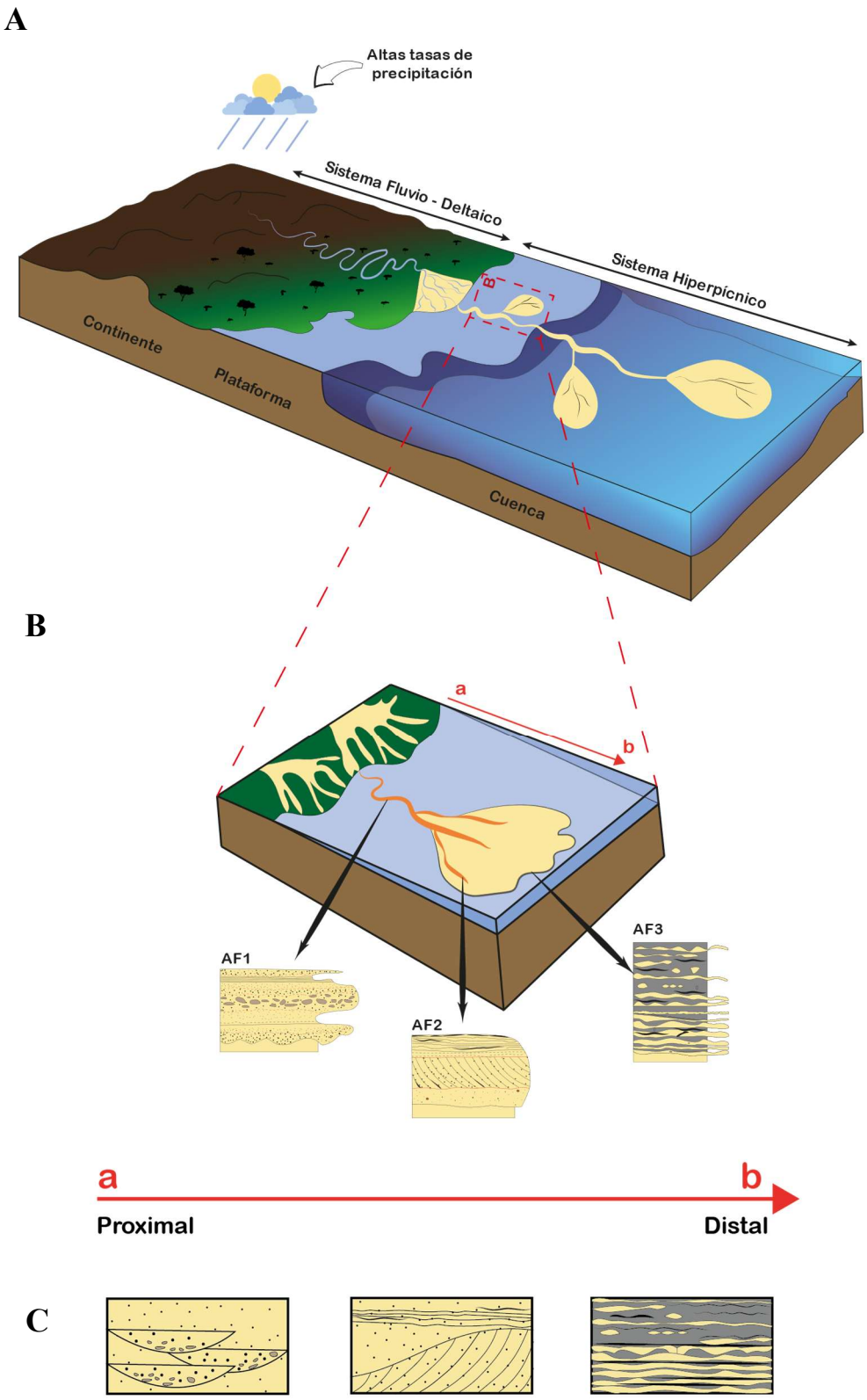

Figura 11. Depósitos deltaicos y modelo sedimentario de los depósitos de flujo hiperpícnico en la cantera Pungarayacu. A) Comparación entre los sistemas fluvio – deltaicos e hiperpícnicos. Modificado de Zavala & Arcuri,

(2016). En la figura se resalta con líneas punteadas rojas la posible ubicación de la cantera Pungarayacu en el sistema hiperpícnico. B) Modelo sedimentario para la Formación Hollín en la cantera Pungarayacu, se muestra la distribución espacial de sus asociaciones de facies. C) Sistemas depositaciones y elementos arquitecturales del afloramiento.

6. Conclusión

El análisis sedimentológico y estratigráfico realizado en una sección continua de la Formación Hollín, aflorante en la cantera Pungarayacu, en Napo - Ecuador, permitió identificar nueve facies sedimentarias: tres conglomeráticas (F1, F2, F3), tres arenosas (F4, F5, F6), dos heterolíticas (F7, F8) y una carbonosa (F9). La descripción detallada de estas facies y sus asociaciones revelan un sistema sedimentario complejo, que no se ajusta a los modelos fluviales tradicionales. La evaluación de estas complejidades desde la perspectiva de los flujos hiperpícnicos, permitió concluir que el afloramiento en estudio se depositó en un delta hiperpícnico litoral mediante la acción de dichos flujos.

La sedimentación a través de flujos hiperpícnicos se evidencia a través de características diagnósticas de las hiperpicnitas como; los estratos compuestos, secuencias de gradación inversa seguidas de gradación normal, y la abundancia de restos vegetales.

Las facies identificadas se agruparon en tres asociaciones de facies, que representan depósitos de canales principales, canales distributarios y lóbulos. Un sistema hiperpícnico pierde progresivamente su energía y por tanto su capacidad erosiva, depositando el sedimento como carga de fondo en zonas proximales o como carga suspendida en zonas distales o periféricas.

Este estudio pone en evidencia la complejidad de los depósitos de la Formación Hollín y propone que los sistemas hiperpícnicos son claves para entender la transferencia de sedimentos desde los ríos hacia ambientes más profundos, contribuyendo a redefinir el modelo depositacional de esta formación.

Para profundizar en el conocimiento de la Formación Hollín, se recomienda realizar estudios

bioestratigráficos que permitirán precisar la ubicación de los depósitos en la plataforma continental y reconstruir los ambientes depositacionales. Por otro lado, se sugiere realizar investigaciones en quimioestratigrafía para evaluar las condiciones físico-químicas de los ambientes de depositación registradas en los sedimentos.

Asimismo, el estudio petrográfico facilitará el análisis detallado de componentes minerales y texturas a nivel microscópico, para interpretar procesos sedimentarios y determinar el origen de los depósitos.

Los resultados de este trabajo permitirán comprender mejor la complejidad y riqueza geológica de la Formación Hollín, particularmente de su sección basal en la cantera Pungarayacu, fomentando el geoturismo, la geoconservación y el aprendizaje de las geociencias. Además, el nuevo conocimiento generado contribuirá al entendimiento de la paleogeografía de la Cuenca Oriente y a estudios relacionados con la exploración y gestión de recursos.

Referencias

Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. 2014. La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo. In P. Baby, M. Rivadeneira, & R. Barragán (Eds.), *Introducción* (3rd ed.). Institut français d'études andines.

Barragán, R., Christophoul, F., White, H., Baby, P., Rivadeneira, M., Ramírez, F., & Rodas, J. 2004. Estratigrafía secuencial del Cretácico de la Cuenca Oriente del Ecuador. In *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo* (pp. 45–68). Institut français d'études andines. https://doi.org/10.4000/BOOKS.IFEA.2992

Bhattacharya, J. P., & MacEachern, J. A. 2009. Hyperpycnal rivers and prodeltaic shelves in the Cretaceous seaway of North America. *Journal of Sedimentary Research*, *79*(4), 184–209. https://doi.org/10.2110/jsr.2009.026

Canfield, R. W., Bonilla, G., & Robbins, R. K. 1982. Sacha Oil Field of Ecuadorian Oriente. *AAPG Bulletin*, *66*(8), 1076–1090.

Carrascal-Miranda, E. R., & Suárez-Ruiz, I. 2004. Short description of the Peruvian coal basins. *International Journal of Coal Geology*, *58*(1–2), 107–117. https://doi.org/10.1016/j.coal.2003.05.004

Dashwood, M. F., & Abbotts, I. L. 1990. Aspects of the petroleum geology of the Oriente Basin, Ecuador. In J. Brooks (Ed.), *Classic Petroleum Provinces* (Vol. 50, Issue 1, pp. 89–117). The Geological Society of London. http://sp.lyellcollection.org/

Diaz, H. G., Contreras, C., Lewis, N., Welsh, R., & Zavala, C. 2021. Evidence of Shelfal Hyperpycnal Deposition of Pliocene Sandstones in the Oilbird Field, Southeast Coast, Trinidad: Impact on Reservoir Distribution. In R. M. Slatt & C. Zavala (Eds.), *Sediment Transfer from Shelf to Deep Water—Revisiting the Delivery System: AAPG Studies in*

Geology (Vol. 61, pp. 193–214). American Association of Petroleum Geologists. https://doi.org/10.1306/13271357st613443

Díaz, M., Baby, P., Rivadeneira, M., & Christophoul, F. 2004. El pre-Aptense en la Cuenca Oriente ecuatoriana. In P. Baby, M. Rivadeneira, & R. Barragán (Eds.), *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo* (3rd ed., pp. 31–52). Institut français d'études andines.

Egüez, A., Alvarado, A., & Yepes, H. 2003. *Mapa de Fallas y Pliegues Cuaternarias de Ecuador y Regiones Oceánicas Adyacentes*.

Egüez, A., Gaona, M., & Albán, A. 2017. Mapa Geológico de la República del Ecuador. In *Esc. 1:1.000.000*.

Folk, R. L. 1980. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company.

Grundvåg, S. A., Helland-Hansen, W., Johannessen, E. P., Eggenhuisen, J., Pohl, F., & Spychala, Y. 2023. 2Deep-water sand transfer by hyperpycnal flows, the Eocene of Spitsbergen, Arctic Norway. *Sedimentology*, *70*(7), 2057–2107. https://doi.org/10.1111/sed.13105

He, Z., Xu, B., Okon, S. U., & Li, L. 2022. Numerical Investigation of the Sediment Hyperpycnal Flow in the Yellow River Estuary. *Journal of Marine Science and Engineering*, *10*(7), 943. https://doi.org/10.3390/jmse10070943

Higgs, R. 2002. Tide-dominated estuarine facies in the Hollin and Napo (T and U) formations (Cretaceous), Sacha field, Oriente Basin, Ecuador: Discussion. *AAPG Bulletin*, *86*(2), 329–334.

Irastorza, A., Zavala, C., Campetella, D. M., Turienzo, M., Olivera, D., Peralta, F., Irastorza, M., & Martz, P. 2021. Hyperpycnal littoral deltas: A case of study from the Lower Cretaceous Agrio Formation in the Neuquén Basin, Argentina. *Journal of Palaeogeography*, *10*(4), 550–570. https://doi.org/10.1016/j.jop.2021.11.004

Jaillard, E., Caron, M., Dhondt, A., Ordoñez, M., Lascano, M., Andrade, R., Bengtson, P.,

Bulot, L., Cappetta, H., Dávila, C., Díaz, R., Huacho, J., Huamán, C., Jiménez, D., Jiménez, N., Montenegro, J., Néraudeau, D., Rivadeneira, M., Toro, J., … Zambrano, I. 1997. *Sintesis estratigrafica y sedimentologica del cretaceo y paleogeno de la cuenca oriental del Ecuador* (Orstom - Petroproducción, Ed.; Vol. 164).

Kneller, B. C., & Branney, M. J. 1995. Sustained high-density turbidity currents and the deposition of thick massive sands. *Sedimentology*, *42*, 607–616.

Macellari, C. E. 1988. Cretaceous paleogeography and depositional cycles of western South America. *Journal of South American Earth Sciences*, *1*(4), 373–418. https://doi.org/10.1016/0895-9811(88)90024-7

Mansfield, C. F., & Harrell, J. 1985. A visual comparator for degree of sorting in thin and plane sections; discussion and reply. *Journal of Sedimentary Research*, *55*(4), 621–626.

Miall, A. 2010. Alluvial Deposits. In P. N. James & W. R. Dalrymple (Eds.), *Facies Models 4* (pp. 105–138). Geological Association of Canada.

Mulder, T., & Alexander, J. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density fows and their deposits. *Sedimentology*, *48*, 269–299.

Mulder, T., & Chapron, E. 2011. Flood Deposits in Continental and Marine Environments: Character and Significance. In R. M. Slatt & C. Zavala (Eds.), *Sediment Transfer from Shelf to Deep Water—Revisiting the Delivery System* (Vol. 61, pp. 1–30). American Association of Petroleum Geologists. https://doi.org/10.1306/13271348st613436

Mulder, T., & Syvitski, J. P. M. 1995. Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans. *Journal of Geology*, *103*(3), 285–299. https://doi.org/10.1086/629747

Mulder, T., Syvitski, J. P. M., Migeon, S., Faugères, J. C., & Savoye, B. 2003. Marine hyperpycnal flows: Initiation, behaviorand related deposits. A review. *Marine and Petroleum Geology*, *20*(6–8), 861–882. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2003.01.003

Mutti, E., Davoli, G., Tinterri, R., & Zavala, C. 1996. The importance of ancient fluvio-deltaic systems dominated by catastrophic flooding in tectonically active basins. In *Memorie di Scienze Geologiche* (Vol. 48, pp. 233–291). https://www.researchgate.net/publication/266141209

Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Siever, R. 1987. Sand and Sandstone. In *Sand and Sandstone* (2nd ed., pp. 69–92). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5

Quiroz Cabascango, D. E. 2021. *Paleobotany and stratigraphy of the lower Aptian to middle Albian in the Central Sub-Andean Zone of Ecuador* [Tesis de Grado, Universidad de Investigación de Tecnología Experimental YACHAY]. www.yachaytech.edu.ec

Reineck, H.-E., & Wunderlich, F. 1968. Classification and origin of flaser and lenticular bedding. *Sedimentology*, *11*, 99–04.

Rivadeneira, M., & Almeida, P. 2014. Características de los reservorios Cretácicos de la cuenca Oriente. In P. Baby, M. Rivadeneira, & R. Barragán (Eds.), *La Cuenca Oriente Geología y Petróleo* (3rd ed., pp. 279–326). Institut français d'études andines.

Rivadeneira, M., & Baby, P. 2004. Características geológicas generales de los principales campos petroleros de Petroproducción. In P. Baby, M. Rivadeneira, & R. Barragán (Eds.), *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo* (3rd ed., pp. 329–414). Institut français d'études andines.

Romero, C., Condoy, D., Menéndez, B., & Gallardo, O. 2020. Provenience analysis in Mesozoic sequences in the Cutucú Cordillera, Southeast Ecuador. *15-Encuentro Del Centro Internacional de Ciencias de La Tierra*. https://www.researchgate.net/publication/350741661

Romero, C., Gramal, A. B., Carranco, F. R., & Toainga, S. D. 2019. Asociación de facies: La clave para la identificación de la Formación Hollín en la región Sur Oriental del Ecuador. *Revista Científica GeoLatitud*, *2*(1), 9–23.

Shanmugam, G., Poffenberger, M., & Álava, J. T. 2000. Tide-dominated estuarine facies in the Hollin and Napo ('T' and 'U') formations (Cretaceous), Sacha Field, Oriente Basin, Ecuador. *AAPG Bulletin*, *84*(5), 652–682.

Souza Cruz, C. E. 1989. Cretaceous sedimentary facies and depositional environments, Oriente basin, Ecuador - a field trip guide. In Petrobas Research Center (Ed.), *III Congreso Andino de la Industria del Petróleo* (p. 65).

Sumner, E. J., Amy, L. A., & Talling, P. J. 2008. Deposit structure and processes of sand deposition from decelerating sediment suspensions. *Journal of Sedimentary Research*, *78*(8), 529–547. https://doi.org/10.2110/jsr.2008.062

Tschopp, H. J. 1953. Oil explorations in the Oriente of Ecuador, 1938-19501. *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, *37*(10), 2303–2347. https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-pdf/37/10/2303/4384327/aapg_1953_0037_0010_2303.pdf

Udden, J. 1914. Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, *25*, 655–744.

Vallejo, C., Romero, C., Horton, B. K., Spikings, R. A., Gaibor, J., Winkler, W., Esteban, J. J., Thomsen, T. B., & Mariño, E. 2021. Jurassic to Early Paleogene sedimentation in the Amazon region of Ecuador: Implications for the paleogeographic evolution of northwestern South America. *Global and Planetary Change*, *204*, 103555. https://doi.org/10.1016/J.GLOPLACHA.2021.103555

Van den Berg, J. H., & Nio, S. D. 2010. *Sedimentary Structures and Their Relation to Bedforms and Flow Conditions*. European Association of Geoscientists & Engineers Publications B.V. (EAGE).

Vera, D., Simbaña-Tasiguano, M., Guzmán, O., Cabascango, E., Sánchez-Cortez, J. L., Campos, C., & Grefa, H. 2023. Quantitative Assessment of Geodiversity in Ecuadorian

Amazon—Case Study: Napo Sumaco Aspiring UNESCO Geopark. *Geoheritage*, *15*(1), 15–28. https://doi.org/10.1007/s12371-023-00792-2

Wasson, T., & Sinclair, J. H. 1927. Geological explorations east of the Andes in Ecuador. *AAPG Bulletin*, *11*(12), 1253–1281.

Wentworth, C. K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, *30*(5), 377–392. http://www.journals.uchicago.edu/t-and-c

White, H. J., Skopec, R. A., Ramirez, F. A., Rodas, J. A., Bonilla, G., Quito, P., White, H. J., Skopec, R. A., Ramirez, F. A., Rodas, J. A., & Bonilla, G. 1995. Reservoir Characterization of the Hollin and Napo Formations, Western Oriente Basin, Ecuador. In A. Tankard, R. Suarez Soruco, & H. J. Welsink (Eds.), *Petroleum Basins of South America (Aapg Memoir, 62)* (pp. 573–596). American Association Of Petroleum Geologists.

Xian, B., Wang, J., Gong, C., Yin, Y., Chao, C., Liu, J., Zhang, G., & Yan, Q. 2018. Classification and sedimentary characteristics of lacustrine hyperpycnal channels: Triassic outcrops in the south Ordos Basin, central China. *Sedimentary Geology*, *368*, 68–82. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.03.006

Yan, D., Xu, H., Xu, Z., Lei, Z., Tian, M., Cheng, L., Ma, Y., Wang, Z., & Ostadhassan, M. 2020. Sedimentary architecture of hyperpycnal flow deposits: Cretaceous Sangyuan outcrop, from the Luanping Basin, North East China. *Marine and Petroleum Geology*, *121*, 104593. https://doi.org/10.1016/J.MARPETGEO.2020.104593

Yang, R., Vanloon, A. J., Zavala, C., Han, Z., Fan, A., & Sun, F. 2019. *Research Progresses on Hyperpycnal Flow Deposits*. https://www.researchgate.net/publication/336170197

Zavala, C. 2020. Hyperpycnal (over density) flows and deposits. *Journal of Palaeogeography*, *9*(1), 1–21. https://doi.org/10.1186/s42501-020-00065-x

Zavala, C., & Arcuri, M. 2016. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: Origin and distinctive

characteristics. *Sedimentary Geology*, *337*, 36–54. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.03.008

Zavala, C., Arcuri, M., & Blanco Valiente, L. 2012. The importance of plant remains as a diagnostic criteria for the recognition of ancient hyperpycnites. *Revue de Paléobiologie*, *11*, 457–469.

Zavala, C., Arcuri, M., Meglio, M. Di, Diaz, H. G., & Contreras, C. 2011. A Genetic Facies Tract for the Analysis of Sustained Hyperpycnal Flow Deposits. In *Sediment Transfer from Shelf to Deep Water—Revisiting the Delivery System* (pp. 31–51). American Association of Petroleum Geologists. https://doi.org/10.1306/13271349st613438

Zavala, C., Arcuri, M., Zorzano, A., Trobbiani, V., Torresi, A., & Irastorza, A. 2024. Deltas: New paradigms. *Depositional Record*, *00*, 1–37. https://doi.org/10.1002/dep2.266

Zavala, C., Marcano, J., Carvajal, J., & Delgado, M. 2012. Genetic indices in hyperpycnal systems: A case study in the late Oligocene–early Miocene Merecure Formation, Maturin Subbasin, Venezuela. In RM. Slatt & C. Zavala (Eds.), *Sediment Transfer from Shelf to Deep Water—Revisiting the Delivery System* (Vol. 61, pp. 53–73). American Association of Petroleum Geologists. https://doi.org/10.1306/13271350st613438

Zavala, C., & Pan, S. X. 2018. Hyperpycnal flows and hyperpycnites：Origin and distinctive characteristics. *Lithologic Reservoirs*, *30*(1), 1–27. https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8926.2018.01.001

Zavala, C., Ponce, J. J., Arcuri, M., Drittanti, D., Freije, H., & Asensio, M. 2006. Ancient lacustrine hyperpycnites: A depositional model from a case study in the Rayoso Formation (Cretaceous) of West-Central Argentina. *Journal of Sedimentary Research*, *76*, 41–59. https://doi.org/10.2110/jsr.2006.12

Zavala, C., Torresi, A., Zorzano, A., Arcuri, M., & Di Meglio, M. 2019. Análisis sedimentológico y estratigráfico de la Formación Tunas (Pérmico, Cuenca de

Claromecó): estudio de subsuelo de los pozos PANG0001 y PANG0003. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, *76*(3), 296–314.