

**Discriminación de la secuencia meta-sedimentarias del río Oyacachi, en San Marcos, Ecuador.****Discrimination of the metasedimentary rocks sequence of the Oyacachi River, in San Marcos, Ecuador.****Christian Romero<sup>1</sup>, Fausto Carranco<sup>1</sup>, Natálie Černý<sup>2</sup>, Milada Dvořák<sup>3</sup>, Ana Gramal<sup>1</sup>, Roberto Pulupa<sup>1</sup>, Tito Vélez<sup>1</sup>, Jenny Granja<sup>4</sup>, Israel Carranco<sup>5</sup>, Paola Pazmiño<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito – Ecuador. E-mail: wladimir.romero@geoenergia.gob.ec, fausto.carranco@geoenergia.gob.ec, ana.gramal@geoenergia.gob.ec, anibal.pulupa@geoenergia.gob.ec, tito.velez@geoenergia.gob.ec.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Charles, Praga - Republica Checa, E-mail: natalie.cerny@natur.cuni.cz

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Charles, Praga - Republica Checa, E-mail: milada.dvorak@natur.cuni.cz

<sup>4</sup> Facultad de Recursos Naturales, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, E-mail: jenny.granja@epoch.edu.ec

<sup>5</sup> Escuela Politécnica Nacional (EPN). Quito – Ecuador. E-mail: isra\_carranco@hotmail.com, paola.pazmino01@epn.edu.ec

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 21-01-2022

Fecha de aceptación: 18-07-2022

**Resumen**

Al noreste del Levantamiento Napo, en las márgenes del río Oyacachi, en el sector de San Marcos, anteriores investigaciones agruparon a secuencias indiscriminadas de filitas, lodolitas y calizas metamorfoseadas en la Unidad Upano. Esta investigación presenta el análisis litoestratigráfico, el registro fósil y el detalle geoquímico de esta secuencia. Esta secuencia incluye a filitas y pizarras negras con cementación calcárea (FPC), lutitas negras con cementación calcárea (LNC), areniscas finas calcáreas (AFC), calizas masivas (Cs), calizas wackstone (CWs) y mudstone (CMs) metamorfoseadas. El registro fósil incluye a los amonites: *Lyelliceras* sp. y *Mantelliceras* sp., *Brancoeras* sp. *Dipoloceras* sp. y *Oxytopidoceras* sp. Altas proporciones de  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  y MgO con respecto a  $SiO_2$  y relaciones de radios Th, Rb, Sr y Ba sugieren que esta secuencia fue depositada en un ambiente marino somero en una margen pasiva. Datos litoestratigráficos, el registro fósil y el detalle geoquímico permite vincular a esta secuencia meta-sedimentarias con la Formación Napo de la Cuenca Oriente.

**Palabras clave:** Fm. Napo, Amonites, Geoquímica.**Abstract**

To the northeast of the Napo Uplift, in the Oyacachi river, in the sector of San Marcos, indiscriminate sequences of phyllites, metamorphosed mudstones, and deformed limestones were grouped in the Upano Unit by previous research. This research displays the litho-stratigraphic analysis, fossil record, and geochemistry detail. This sequence included black calcareous phyllites and slate (FPC), metamorphosed black mudstone (LNC), fine calcareous sandstones (AFC), massive limestones (Cs), wackstone-limestones (CWs), mudstone-limestones (CMs). The record fossil included ammonites *Lyelliceras* sp., *Mantelliceras* sp., *Brancoeras* sp., *Dipoloceras* sp. y *Oxytopidoceras* sp. High proportions of the  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  y MgO regarding  $SiO_2$  and relations of the Th, Rb, Sr y Ba ratios suggest that this sequence was deposited in the shallow marine environment in a passive marge. Lithostratigraphic data, the fossil record, and geochemistry detail link this meta-sedimentary sequence with Napo Formation of the Oriente Basin.

**Keywords:** Napo Fm. Ammonites, Geochemistry

### 1. Introducción

La margen continental ecuatoriana se localiza al sur de los Andes del Norte. En Ecuador los Andes del Norte mantienen tendencia NE-SO y se componen de dos diferentes cordilleras: Cordillera Occidental y Cordillera Real. Al este de la Cordillera Real, la Zona Subandina representa una zona corrida y plegada, que involucra rocas metamórficas de la Cordillera Real y rocas sedimentarias de la Cuenca Oriente [1]. La Zona Subandina se estructura del Levantamiento Napo al norte, separada por la Depresión Pastaza de la Cordillera Cutucú al sur [2]. Al oeste del Levantamiento Napo, la falla Cosanga fue interpretada como un límite tectónico entre la Cordillera Real y la Cuenca Oriente [3], sin embargo, en recientes investigaciones la falla Cosanga fue considerada como una zona de propagación de la deformación de acuerdo con el modelo de relleno y canibalización de cuencas de antepaís en margen continental [1, 4, 5]. Al oeste de la falla Cosanga series de rocas sedimentarias metamorfoseadas incluyen a meta-lodolitas negras con materia orgánica, meta-lodolitas grises y blancas con cementación calcárea y restos de fósiles no discriminados, meta-areniscas grises a blancas masivas y niveles de calizas cristalinas deformadas [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. A escala local, estas series han sido incluidas en varias unidades litoestratigráficas: “Filitas El Chaco” [7, 9], “Series Llanganates” [13], “Formación Baeza” [11], mientras que a nivel regional estas rocas fueron incluidas dentro de la Unidad Upano [14]. Sin embargo, la Unidad Upano fue descrita inicialmente como una secuencia de rocas metamórficas compuesta por rocas meta-volcánicas y esquistos pelíticos [3]. Por otro lado, estas secuencias también han sido

incluidas en la “Unidad Margajitas” [15] y vinculadas a rocas cretácicas deformadas de la Cuenca Oriente [1]. En este contexto, esta secuencia de rocas sedimentarias metamorfoseadas genera gran incertidumbre en la comprensión de la estructura de la Cordillera Real, desconociendo su edad, ambiente de formación y estilo de deformación.

Con el objetivo de discriminar las secuencias metamórficas de la Cordillera Real, de rocas sedimentarias deformadas de la Cuenca Oriente, esta investigación presenta la caracterización litoestratigráfica, el detalle geoquímico y el registro fósil de rocas sedimentarias metamorfoseadas que afloran en las márgenes del río Oyacachi, en el sector de San Marcos, al este del poblado El Chaco, al noroccidente del Levantamiento Subandino (Fig. 1).

### 2. Metodología

En el análisis bibliográfico se analizaron artículos académicos, mapas geológicos, reportes técnicos publicados y no publicados, con el objetivo de identificar afloramientos y secciones tipo. En campo, la cartografía geológica incluyó la geo-referenciación de afloramientos tipo, la discriminación litológica, el registro de estructuras sedimentarias, relictos de estructuras sedimentarias, identificación de superficies de erosión, descripción de la geometría de los estratos, estilo de apilamiento vertical y lateral. Estos datos fueron integrados en el análisis y asociación de facies [16], [17]. La recolección de datos estructurales fue complementada con el análisis de imágenes satelitales, esto permitió redefinir lineamientos en la cartografía geológica del área de estudio [18].

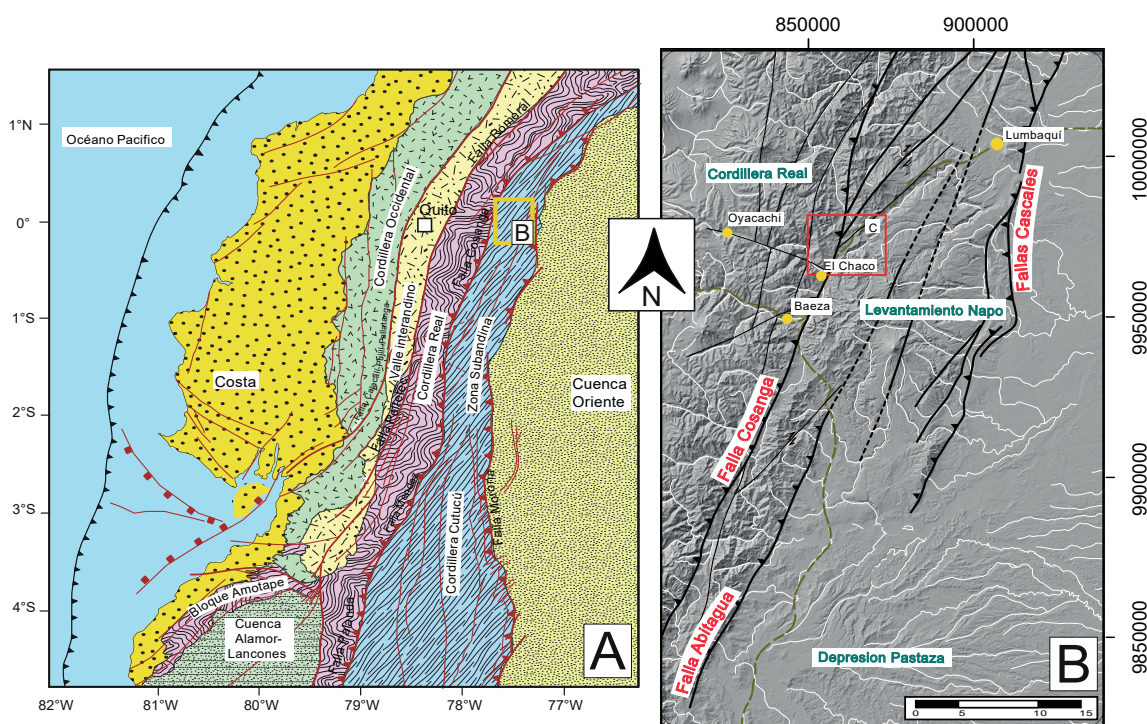


Figura 1: Esquema de ubicación del área de estudio. A. Mapa morfo-tectónico del Ecuador. B. Esquema estructural del Levantamiento Napo.

En afloramientos tipo se recolectaron doce muestras que fueron utilizadas en secciones delgadas con el objetivo de identificar y cuantificar facies minerales y describir su textura. Esta descripción fue complementada con el análisis semi-cuantitativo de difracción de rayos – X, a partir del cual, se determinaron firmas de espectrometría en ensamblajes minerales [19]. En el laboratorio químico del Instituto de Investigación Geológico y Energético del Ecuador (IIGE) se analizaron elementos mayores, traza y tierras raras de 12 muestras. En el procesamiento de las muestras se utilizaron trituradoras y pulverizadoras con discos de carburo de tungsteno, para el análisis de elementos mayores se utilizó Fluorescencia de Rayos X – XRF (con perla fundida), para elementos traza, Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente – ICP-OES (con digestión total 4 ácidos) y para tierras raras, Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente – ICP-MS (con digestión por fusión alcalina). Los datos reportados fueron evaluados en diagramas de discriminación litológica y tectónica, en la generación de diagramas de geoquímica se utilizó el software GCDKit 6.0.

### 3. Resultados

#### 3.1. Relaciones estratigráficas

Las mejores exposiciones de rocas meta-sedimentarias analizadas en este estudio se localizan al este del poblado El Chaco, en los sectores de San Marcos (UTM: 186 776E; 9 964 340N; UTM: 187 012E; 9 9641 63N), Santa Rosa (UTM: 186 945E; 9 964 239N) y en las márgenes del río Santa María (UTM: 181 459E; 9 966 465N). En el río Santa María, secuencias de rocas meta-sedimentarias afloran en los flancos de pliegues sinclinales y anticlinales

volcados hacia el noreste a lo largo de la falla Cosanga [3]. La falla Cosanga corresponde a una estructura inversa de vergencia noroeste [1], que en el sector de San Marcos controla morfológicamente el curso del río Oyacachi. En las cercanías a Santa Rosa y San Marcos la falla Cosanga afecta a lutitas, calizas y areniscas metamorfoseadas. En el sector de Santa Rosa, esta secuencia cubre en discordancia a niveles de meta-andesitas y meta-brechas de la Unidad Upano [3]. Al noreste de la quebrada San Marcos, se observan abundantes bloques y cantos rodados meta-volcánicos que forman grandes deslizamientos vinculados al escarpe de la falla San Marcos. La falla San Marcos es una estructura inversa de vergencia noroeste que afecta a filitas, cuarcitas, lodolitas y areniscas metamorfoseadas. Tanto la falla Cosanga como la falla San Marcos forman parte de un sistema de cabalgamiento que involucra a secuencias sedimentarias metamorfoseadas. Hacia el este del sector de San Marcos, esta secuencia es cubierta en discordancia por potentes estratos de *redbeds* de la Formación Tena. (Fig. 2).

#### 3.2. Litoestratigrafía

Al noreste de San Marcos se observan potentes estratos lateralmente continuos, de geometría tabular y morfología mantiforme, compuestos por lutitas negras laminadas, con cementación calcárea y nódulos calcáreos (LNC, Tabla 1, Fig. 3) e intercalaciones entre calizas *mudstone* (CMs, Tabla 1, Fig. 3), *wackstone* (CWs, Tabla 1, Fig. 3) y areniscas finas masivas calcáreas (AFC, Tabla 1, Fig. 3) ocasionalmente se registró la presencia de laminación cruzada, laminación *wavy*, micro-*slumps* y estructuras de carga. En las cercanías a Santa Rosa se documentó la presencia de amonites: *Diploceras* sp., *Mantelliceras* sp., *Brancoceras* sp. y bivalvos no identificados (Fig. 3A).

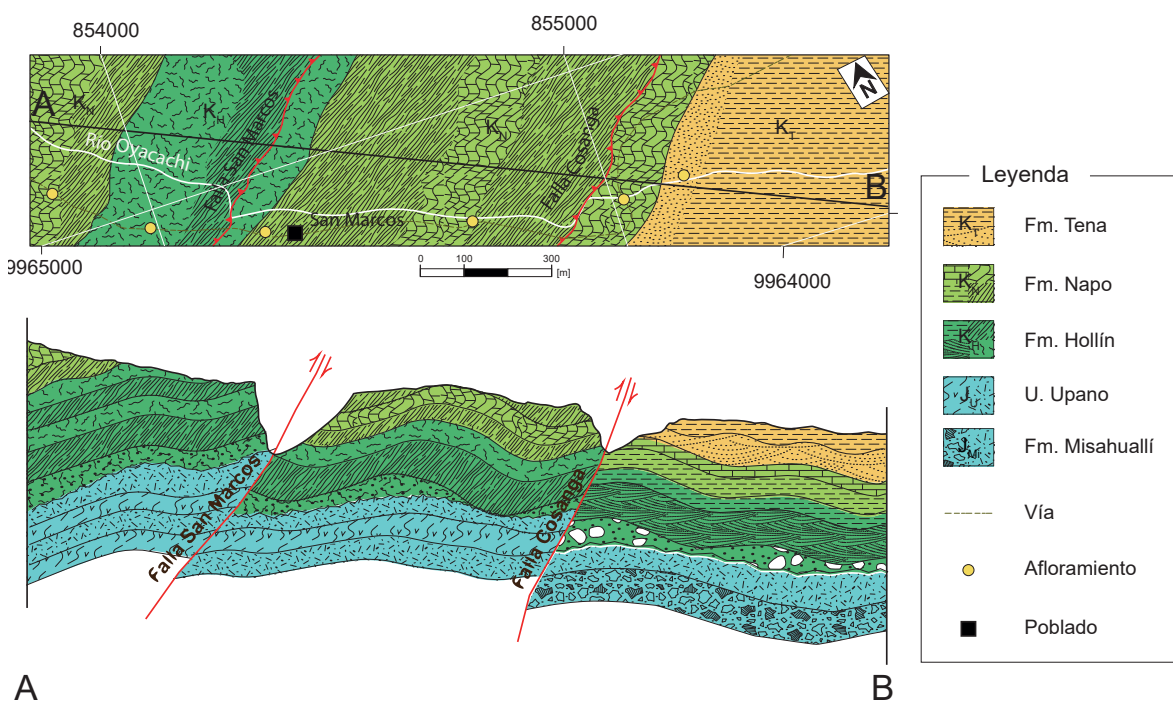


Figura 2: Perfil geológico del sector de San Marcos.

Tabla 1: Facies documentadas en este estudio.

Facie	Descripción	Registro fósil
FPC	Filitas y pizarras negras, con cementación calcárea	<i>Lyelliceras sp.</i> y <i>Hg. Washitensis</i>
LNC	Lutitas negras con cementación calcárea metamorfoseadas	<i>Mantelliceras sp.</i>
AFC	Areniscas finas calcáreas metamorfoseadas	
CNF	Cuarcitas negras finas	
Cs	Calizas masivas recrystalizadas	
CMs	Calizas mudstone metamorfoseadas	<i>Oxytopidoceras sp.</i>
CWs	Calizas wackstone metamorfoseadas	<i>Dipoloceras sp.</i>

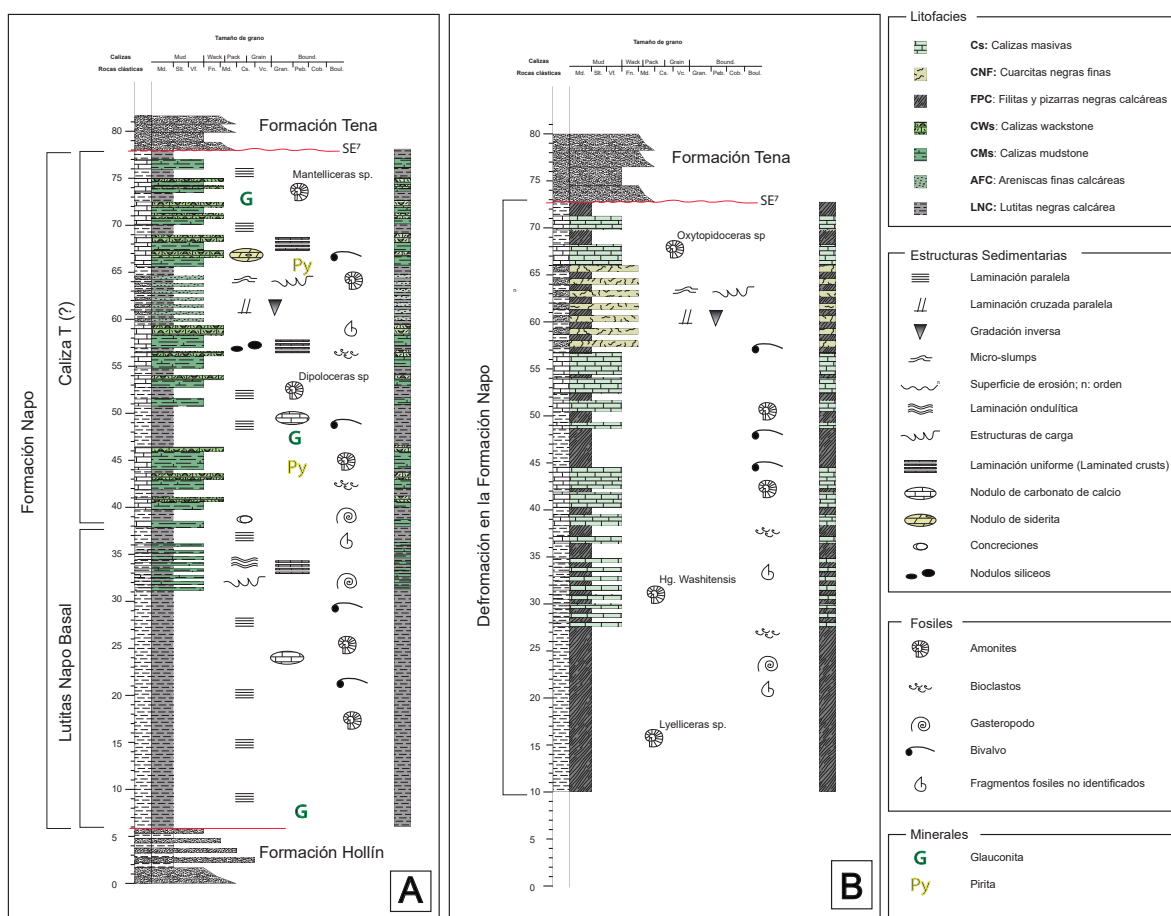


Figura 3: Columna estratigráfica. A. Columna estratigráfica levantada al este del Puente de San Marcos. B. Columna estratigráfica levantada al oeste de San Marcos.

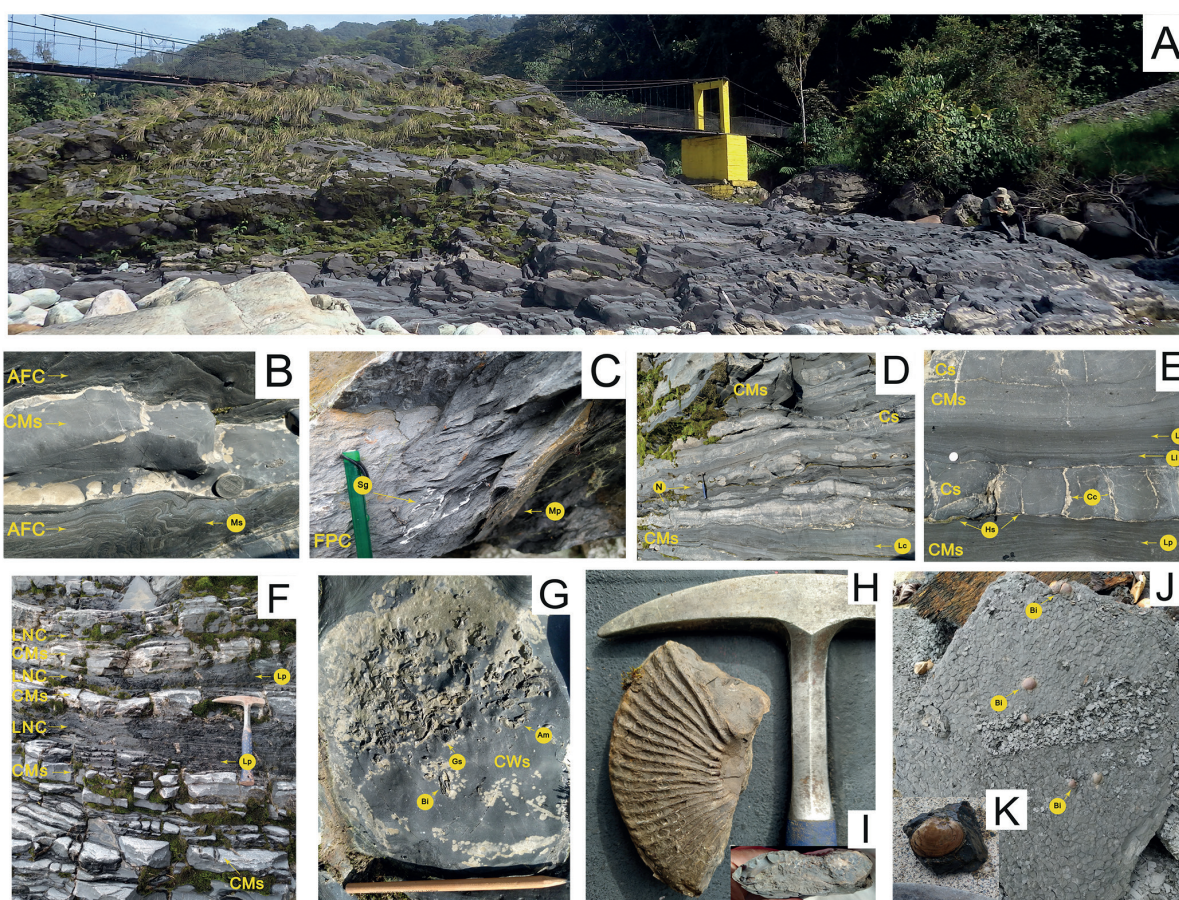
Al noroeste de San Marcos, sobre el puente del río Oyacachi (Fig.4A), la base de la secuencia incluye 30 m de estratos tabulares, lateralmente continuos, estratificados compuestos por filitas negras calcáreas, pizarras grises, verdes, y cafés intercalados entre lutitas negras con cementación calcárea (FPC, Tabla 1, Fig. 3, Fig. 4A). También se observan estratos aislados de calizas grises a

negras, masivas recrystalizadas (Cs, Tabla 1, Fig. 3; Fig. 4A), intercaladas con areniscas arcillosas calcáreas muy finas a finas, con micro-slumps y estructuras de carga (Fig. 4B) y lutitas negras laminadas calcáreas. En estos niveles fueron recolectados amonites *Lyelliceras sp.*, y fragmentos de ostrácodos. En las márgenes del río Santa María esta secuencia (FPC y Cs) alcanzan 50 m. y

se encuentran moderadamente deformados, se observan estructuras S-C y tipo sigmoide (Fig. 4C). Sobreyaciendo en concordancia se observan estratos tabulares, lateralmente discontinuos, de 3m a 5m, compuestos por calizas grises a blancas tipo *wackstone* (CWs, Tabla 1, Fig. 3) estratificados entre finos estratos de filitas negras con cementación calcárea (FPC, Tabla 1, Fig. 3, Fig. 4A). En los paquetes de caliza se identificaron moldes de amonites *Dipoloceras* sp. y amplia variedad de fragmentos incompletos de bivalvos. Los estratos de calizas están intensamente fracturados se observan por lo menos 3 familias de diaclasas, estas fracturas son rellenas por dolomita y pirita (Fig. 3B). Intercalaciones de calizas *mudstone* laminadas y calizas masivas presentan niveles con abundantes nódulos (Fig. 4D).

El tope de la secuencia aflora extensamente en las inmediaciones de San Marcos, en donde se observa una secuencia estrato-creciente compuesta por intercalaciones de calizas *mudstone* laminadas, calizas masivas con superficies de erosión basales (*hardgrounds surface*; Fig. 4E) y lodolitas negras laminadas con nódulos calcáreos, inclinadas al NE, con buzamientos menores a 15° (LNC, Tabla 1, Fig. 3). A orillas del río Oyacachi se recolectaron

fragmentos de bivalvos, amonites y gasterópodos deformados y fracturados. Entre la fauna observada se pudo documentar la presencia de amonites *Mantelliceras* sp. En el sector de Santa Rosa, se observan intercalaciones de filitas negras (FPC, Tabla 1, Fig. 3), areniscas finas con cementación calcárea, con *ripples* de corrientes, laminación paralela, laminación ondulítica, laminación lenticular, *micro-slumps* y estructuras de carga (AFC, Tabla 1, Fig. 3). En la parte superior de esta secuencia se observa una superficie de erosión de 5to orden sobre la cual se depositan finos estratos de calizas grises de textura *mudstone* (CMs, Tabla 1, Fig. 3), intercaladas con gruesos estratos de filitas y lutitas laminadas (LNC, Tabla 1, Fig. 3, Fig. 4F) cubiertas en concordancia por una secuencia estrato-decreciente de calizas *wackstone* con abundantes fragmentos de bivalvos, gasterópodos y amonites (CWs; Tabla 1, Fig. 3, Fig. 4G). En estos niveles se documentó la presencia de amonites *Oxytopidoceras* sp. (Fig.s 4H-4I), además se recolectaron varios especímenes de bivalvos entre ellos *Actinoceramus concentricus* sp. (Fig.s 4J-4K). En discordancia se depositan potentes estratos de lodolitas arenosas rojas a moradas y paquetes de geometría cóncava con relieve negativo discontinuos de conglomerados y areniscas con estratificación cruzada (Fig. 3B).



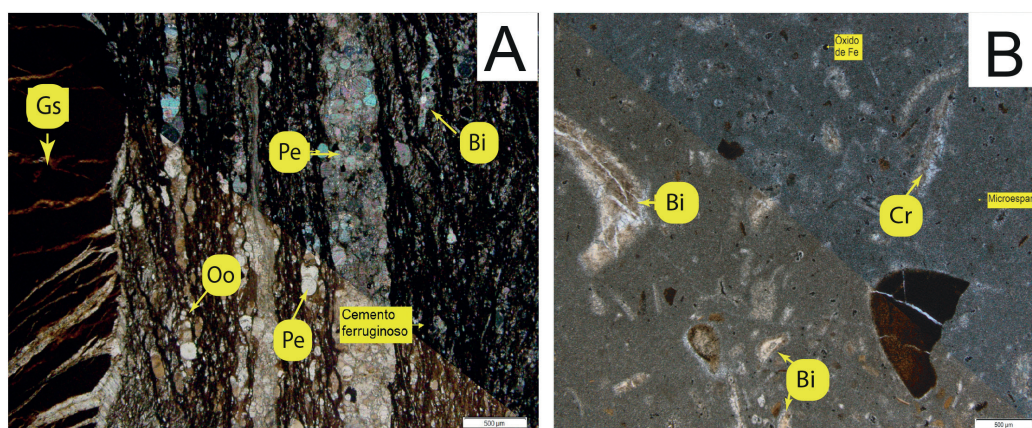
**Figura 4:** Litofacies tipo. **A.** Afloramiento tipo en la base del puente de San Marcos. **B.** Calizas masivas (Cs) intercaladas con areniscas finas calcáreas (AFC) con *micro-slumps* (Ms). **C.** Filitas calcáreas con *micro*-pliegues (Mp) y sigmoides (Sg). **D.** Calizas *mudstone* (CMs) y calizas masivas (Cs) con intervalos con abundantes nódulos (N), *laminated crusts* (Lc). **E.** Intercalación entre calizas masivas (Cs) con *growth cavities* (Gc), *hardgrounds surface* (Hs) y calizas *mudstone* (CMs) con laminación paralela (Lp), laminación ondulítica irregular (Li) y *laminated crusts* (Lc). **F.** Intercalaciones entre calizas masivas (CMs) y lutitas calcáreas (LNC) con laminación paralela (Lp). **G.** Calizas *wackstone* (CWs) con bivalvos (Bi), amonites (Am) y gasterópodos (Gs). **H.** Amonite *Oxytopidoceras* sp. **I.** Corte lateral mostrando ventrículos y cámaras bien conservadas. **J.** Lutitas negras calcáreas con abundantes bivalvos. **K.** Bivalvo *Actinoceramus concentricus* sp.

### 3.3. Petrografía

Análisis de difracción de rayos X en las litofacies **FPC** y **LNC** reportan las siguientes asambleas minerales: illita (42 %), calcita (28 %), cuarzo (8 %), prehnita (8 %), óxidos de Fe (4 %), sericita (4 %), clorita (<2 %), caolinita (<2 %), esmectita (<2 %), moscovita (<2 %). En láminas delgadas las litofacies **LNC** se observa textura pelítica a aleurítica, mientras que en la litofacies **FPC** se observa cristales muy finos sub-idioblásticos y xenoblásticos de cuarzo que definen la foliación, además se observan zonas paralelas a la foliación con textura lepidito-granoblástica.

En las litofacies **AFC** y **CNF** se reportan las siguientes asambleas minerales: cuarzo (62 %), illita (20 %), calcita (10 %), moscovita (6 %), óxidos de Fe (<2 %). En lámina delgada se observa textura psamfítica y granular con cristales de cuarzo en la misma orientación.

En las litofacies **CMs** y **CWs** se reportó proporciones de calcita que varían entre 50 % y 65 %, mientras que la illita varía de 42 % a 30 %. En lámina delgada la litofacies **CWs** presenta fragmentos de bivalvos, gasterópodos, oolitos, braquiópodos y fósiles no identificados distribuidos en cemento esparítico (Fig. 5).



**Figura 5.** Micro-fósiles. **A.** Lámina delgada de caliza *wackstone* con gasterópodo (Gs), pellets (Pe), oolitos (Oo) y bivalvos (Bi). **B.** Lámina delgada de caliza *wackstone* con bivalvos (Bi), crinoideo (Cr) distribuidos en cemento ferruginoso esparítico.

### 3.4. Geoquímica

La Tabla 2 presenta el detalle de elementos mayores, elementos traza y tierras raras obtenidas a partir de los análisis geoquímicos realizados en las litofacies **FPC**, **FLP LNC**, **CWs** y **CMs**. La descripción estratigráfica, sedimentológica, petrográfica, las proporciones de óxidos mayores (%), concentraciones de elementos traza y tierras raras (ppm) permiten discriminar dos firmas geoquímicas en el *set* de muestras analizadas. En el Grupo-1 (*G1*) se agrupan a las litofacies a **FPC**, y **LNC**, mientras que el Grupo-2 (*G2*) incluyen a **CWs** y **CMs**.

El grupo *G1* contiene altas proporciones de CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, moderadas proporciones de SiO<sub>2</sub> y bajas proporciones de TiO<sub>2</sub>, MnO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Las muestras *G1* fueron ploteadas en el campo de lutitas en el diagrama log (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) vs. log (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/K<sub>2</sub>O) [20] (Fig. 6A). Mientras que el diagrama ternario Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. CaO vs. SiO<sub>2</sub> [21] indica que el *set* de muestras *G1* corresponden a lodolitas margosas (Fig. 5B). El *set* de muestras *G2* contiene altas proporciones de CaO y bajas proporciones de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. El *set* de muestras de *G2* fue ploteado en el campo de calizas en el diagrama Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. CaO vs. SiO<sub>2</sub> [21] (Fig. 5B).

**Tabla 2.** Resultados de análisis geoquímicos

Código	FPC-01	FPC-02	LNC-01	CW-01	CM-01	CM-02
Litofacie	FPC	FPC	LNC	CW	CM	CM
Grupos	G1			G2		
UTM-X	186934	186934	186934	186943	186943	186943
UTM-Y	9964229	9964229	9964229	9964190	9964190	9964190
h	1506	1506	1506	1500	1500	1500

Elementos Mayores						
SiO <sub>2</sub>	44,18	52,07	50,87	0,41	0,52	0,64
TiO <sub>2</sub>	0,443	0,512	0,444	0,29	0,152	0,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,27	13,59	10,83	0,24	0,25	0,29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	2,84	5,31	3,61	0,194	0,136	0,246
MnO	0,063	0,078	0,051	0,05	0,09	0,05
MgO	3,68	4,23	3,85	0,1	0,25	0,17
CaO	15,95	8,83	11,91	54,97	54,88	55,22
Na <sub>2</sub> O	1,88	0,98	1,84	0,01	0,03	0,05
K <sub>2</sub> O	1,71	2,15	1,34	0,004	0,004	0,003
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,32	0,25	0,32	0,046	0,055	0,047
Elementos traza						
Be	2	2	2	-	-	-
Sc	14	9	13	5,5	6,8	3,7
Ti	2655,82	3069,48	2661,81	1738,57	911,25	959,21
V	108	338	196	29,4	41,2	24,2
Cr	20	110	50	-	-	-
Co	2	1	1	4,8	7,8	2,5
Ni	20	80	65	15	12	11
Cu	40	50	75	13,6	12	11,5
Zn	230	350	310	566,2	46,2	445,8
Ga	18	11	13	-	-	-
Rb	108	57	85	2,1	2,4	1,5
Sr	148	245	339	823	553	735
Y	33	35	30	4,3	6,1	2,7
Zr	131	87	95	22,7	34,9	13,2
Nb	7	5	3	-	-	-
Mo	7	34	21	-	-	-
Cs	8,4	9,5	7,2	-	-	-
Ba	242	252	415	24,9	28,1	21
Tierras Raras (REE)						
La	30,6	28,7	22,6	2,88	4,26	1,94
Ce	60,2	51,7	44,5	5,32	7,97	2,92
Pr	6,88	5,15	6,34	0,78	1,15	0,56
Nd	25	19,6	19,4	2,44	3,85	1,36
Sm	5,1	4	3,9	0,59	0,92	0,37
Eu	1,25	1,31	1,45	0,15	0,21	0,09
Gd	5,1	4,2	5,6	0,59	0,92	0,33
Tb	0,8	0,9	0,9	0,09	0,15	0,05
Dy	5	4,7	4,5	0,54	0,82	0,31
Ho	0,9	0,8	0,8	0,11	0,17	0,07
Er	2,9	2,7	3,1	0,3	0,45	0,18
Tm	0,52	0,51	0,48	0,05	0,07	0,03

Yb	3,3	3	3,4	0,28	0,41	0,17
Lu	0,49	0,45	0,42	0,05	0,06	0,02
Hf	4,1	3,1	2	-	-	-
Ta	0,6	0,5	0,3	-	-	-
Pb	23	17	10	12	6,6	9,9
Th	7,1	5,6	4,2	0,7	1,1	0,5
W	2	2	2	-	-	-
U	4,8	6,5	8,2	1,7	1,9	1,2
Tl	0,9	2,2	3	-	-	-

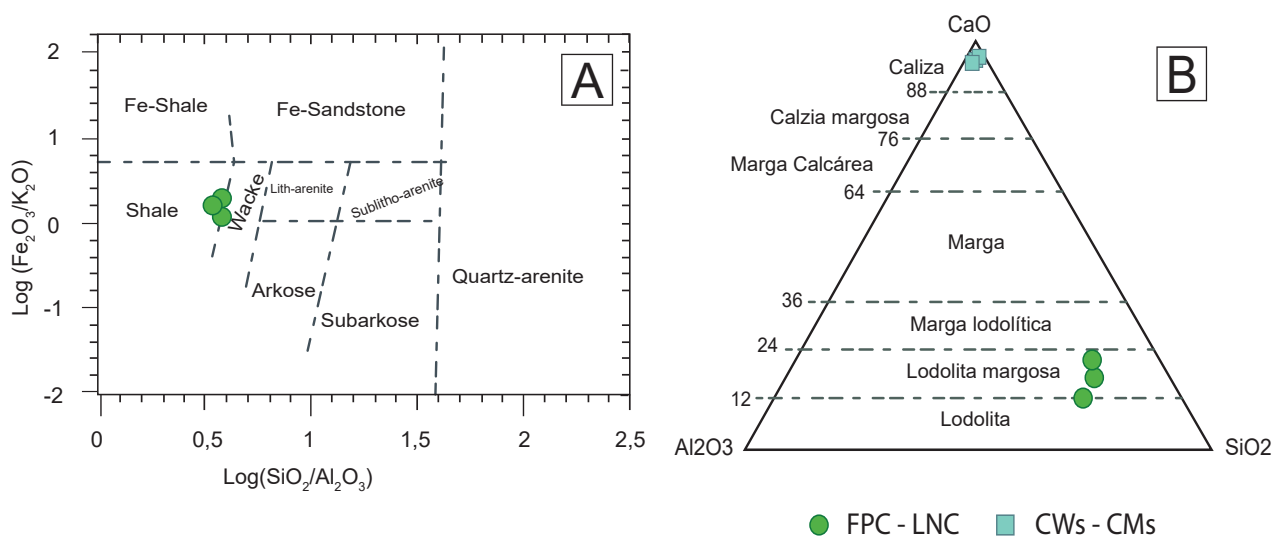


Figura 6. Discriminación litológica en función de análisis geoquímicos. A. Diagrama binario Log (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) vs. Log (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/K<sub>2</sub>O) [21]. B. Diagrama triangular Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub> [22].

#### 4. Discusión

##### 4.1. Evidencias litoestratigráficas

La secuencia de rocas sedimentarias metamorfoseadas observadas en las márgenes del río Oyacachi, en los sectores de San Marcos y el río Santa María, anteriormente habían sido vinculadas a la Formación Baeza [11], posteriormente a la Unidad Upano [12] y a la Unidad Margajitas [1]. Sin embargo, en ninguna de las anteriores investigaciones se caracterizó su litoestratigrafía, ni se reportaron contactos estratigráficos, ni se presentó el registro fósil o el detalle de geoquímico de estas rocas. Tampoco se consideró la relación con las rocas de la proximal Cuenca Oriente.

Esta secuencia incluye a filitas y pizarras negras con cementación calcárea (FPC), lutitas negras con cementación calcárea metamorfoseadas (LNC), areniscas finas calcáreas (AFC), calizas masivas recrystalizadas

(Cs), calizas *wackstone* (CWs) y *mudstone* (CMs) deformadas. Su registro fósil documenta la presencia de amonites *Lyelliceras* sp., *Mantelliceras* sp., *Dipoloceras* sp., *Brancoceeras* sp. y *Oxytopidoceras* sp. Estas trazas de amonites fueron reportadas anteriormente en la Formación Napo, en el Miembro Lutita Napo Basal [22]. La asociación *Lyelliceras* sp. y *Trochoidea* Hg. estableció edad de Albiano Medio a Superior para la base de la Formación Napo, en la Cuenca Oriente [23, 24]. En las Lutitas T y Caliza T, la asociación *Dipoloceras* sp. y *Oxytopidoceras* sp. fue reportada como marcador del Albiano Tardío [25].

##### 4.2 Discriminación geoquímica

Las relaciones Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. MgO vs. SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> indican que las muestras del grupo G1 corresponden a sedimentos marinos [26] (Fig. 7A), esto concuerda con bajas concentraciones de Co, Be, Nb, y Cs y moderadas

concentraciones de Ba, Zr, Zn y V (Tabla 2) [26, 27, 28]. Correlaciones positivas entre REE- $Al_2O_3$  y REE- $Fe_2O_3$  y negativa correlación entre REE total y  $CaO_2$ , indican que las concentraciones de REE en G1 fueron controladas por el contenido de arcilla en la sedimentación y posterior diagénesis [29, 30, 31]. Las relaciones de radios Co vs. Th vs. Zr, indican que el ambiente de depósito del *set G1* está relacionado a una margen pasiva [32] (Fig. 7B).

Las relaciones  $Fe_2O_3$  vs.  $Al_2O_3$  de grupo G2 sugieren que estas facies fueron depositadas en ambiente de marino abierto [33] (Fig. 7C). Esto concuerda con las correlaciones positivas entre REE total y  $CaO_2$  que indican la ausencia de contaminación de origen continental en la sedimentación [28; 30]. Las concentraciones de Sr, Rb y Ba son ploteadas en los campos marino abierto y márgenes costeras en el diagrama de discriminación tectónica de sedimentos calcáreos [33] (Fig. 7D). Altas concentraciones de Sr y ligeras correlaciones negativas entre Sr y CaO sugieren que el Sr no está genéticamente relacionado a la formación de CaO, esto indica descomposición de organismos biológicos durante la diagénesis [34;35].

En el grupo G1, patrones de REE normalizados a PAAS (*Post Archean Australian Shale*) [36;37] muestran enriquecimiento de HREE con respecto a LREE (Fig. 7E). Anomalías negativas de Ce en conjunto con anomalías positivas de Eu, Y, y Gd sugieren enriquecimiento en minerales arcillosos debido a la alteración de feldspatos [38;39]. Bajos radios de  $Nd_N/Yb_N$  indican que existió bajo aporte de detrito continental [30].

Patrones de REE normalizados a PAAS [36;37] del *set G2* están caracterizadas por un ligero enriquecimiento de HREE con respecto a LREE (Fig. 7F). Bajos valores de  $La_N/Yb_N$  indican depletamiento moderado en LREE. El radio  $Er_N/Nd_N$  puede ser utilizado para medir el fraccionamiento LREE/HREE en sedimentos marinos [40; 41]. En el *set G2* el radio  $Er/Nd$ , varía desde 0,11 a 0,13; estos valores están en el rango de sedimentos calcáreos depositados en ambientes marinos someros [35; 42]. Algunos autores sugieren que el radio  $Er/Nd$  es controlado por cambios en las condiciones oxido-reducción en sedimentos marinos [30; 35]. Moderados a altos relaciones de radios de  $Nd_N/Yb_N$  confirma el enriquecimiento en HREE [35; 43].

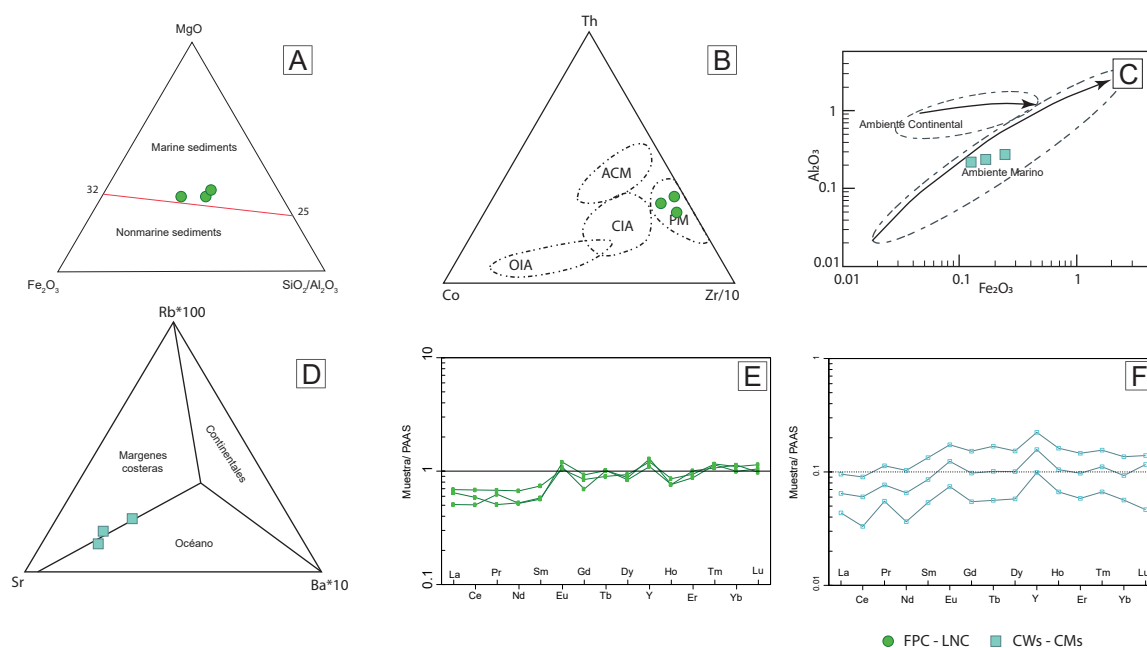
En conclusión; en el *set G1*, moderadas concentraciones REE, depletamiento de LREE con respecto a HREE, bajas concentraciones de Nd, anomalías positivas de Eu y la relación entre  $Nd_N/Yb_N$  sugieren que

estas facies fueron influenciadas por un ligero *imput* de detrito continental. Anomalías negativas de Ce y anomalías positivas de Gd y La, sugieren que el *set G1* se depositó en ambiente anóxico. Mientras que en el *set G2* se observa bajas concentraciones de REE, altas proporciones de CaO y bajas proporciones de  $SiO_2$  como resultado del dominio de episodios de formación de carbonatos en la sedimentación (Fig. 7). Estas características de sedimentación concuerdan con modelos de reconstrucción de paleo-ambientales propuestas para el Cretácico Superior en la Cuenca Oriente, precisamente para la Formación Napo se reportó que el ambiente de depósito está vinculado a una plataforma calcárea somera desarrollada en un mar epicontinental [44; 45; 46]

### 4.3. El grado de metamorfismo

Las asambleas minerales reportadas en las facies FPC y LNC incluyen a illita, calcita, cuarzo, prehnita sericita, clorita, caolinita, esmectita, moscovita y óxidos de Fe. Anteriores investigaciones reportaron filitas con abundante moscovita, con proporciones relativamente altas de calcita y bajas proporciones de cuarzo en las rocas meta-sedimentarias que afloran en las inmediaciones del poblado El Chaco [9; 12]. La presencia de prehnita sugiere la paragénesis prehnita  $\pm$  pumpellyita que caracteriza a facies de sub-esquistos verdes. Por otro lado, también se debe considerar que existen segmentos no deformados, sub-horizontales o ligeramente inclinados que conservan la posición estratigráfica original. En las facies CWs y CMs, se reporta el dominio de calcita y bajas a insignificantes proporciones de dolomita, esto indica ausencia de remplazamiento mineral en el proceso de deformación, esto es una característica de rocas con bajo grado de metamorfismo [47]. La deformación en esta secuencia es dominada por el movimiento transtensional y cabalgamiento de bloques tectónicos vinculados a ramales de la falla Cosanga [1; 9].

Esta investigación reporta la presencia de la Formación Napo al oeste de la falla Cosanga, razón por la cual, preferimos no interpretar a la falla Cosanga como un límite tectónico, sino más bien, como una zona de propagación de la deformación desde los Andes a la Cuenca Oriente. En este proceso astillas tectónicas compuestas por secuencias de la Cuenca Oriente son asimiladas en la orogenia (modelo de relleno y canibalización de cuencas de antepaís); este proceso ha sido ampliamente documentado en la margen noroccidental sudamericana a lo largo del flanco oriental de los Andes [4; 45].



**Figura 7.** Discriminación tectónica en función de análisis geoquímicos. A. Diagrama triangular Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-SiO<sub>2</sub>, utilizado para discriminar entre series de sedimentos finos marinos y continentales [26]. B. Diagrama triangular Co - Th - Zr/10 utilizado para discriminar el ambiente de depósito de sedimentos clásticos; OIA: arco de islas oceánico, CIA: arco de islas continental; ACM: Margen continental activa PM: Margen pasiva [31]. C. Diagrama binario Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> utilizado para discriminar entre series de carbonatos marinos y continentales [33]. D. Diagrama ternario Sr-Rb\*100-Ba\*10, utilizado para discriminar el ambiente de depósito de series de carbonatos [33]. E. Diagramas spider normalizados a PAAS del G1: FLP, FPC y LNC, considerando a [36] después de [37]. F. Diagramas spider normalizados a PAAS del G2: CWs-CMs, considerando a [36] después de [37]

## 5. Conclusiones

- En el sector de San Marcos en las márgenes del río Oyacachi, la Formación Napo incluye a: filitas y pizarras negras, con cementación calcárea metamorfoseadas (FPC), lutitas negras calcáreas, laminadas con nódulos calcáreos deformadas (LNC), areniscas finas calcáreas metamorfoseadas (AFC), calizas masivas recrystalizadas (Cs), calizas *wackstone* (CWs) y *mudstone* (CMs) metamorfoseadas. Su registro fósil incluye los amonites *Lyeilliceras* sp., *Mantelliceras* sp., *Dipoloceras* sp., *Brancoceras* sp. y *Oxytopidoceras* sp., esto permite vincular a esta secuencia a la Formación Napo.
- Asambleas minerales en niveles de filitas y pizarras incluyen a illita, calcita, cuarzo, prehnita, sericita, clorita, caolinita, esmectita, moscovita y óxidos de Fe. Por lo cual, estas litofacies deformadas son el resultado de metamorfismo de bajo grado de la Formación Napo.
- Datos geoquímicos permitieron agrupar las facies descritas en dos grupos: FPC, LPC y LNC en el set G1 mientras que a CWs y CMs en el set G2.

Proporciones de óxidos mayores indican que el set G1 contiene a lutitas y lodolitas margosas, de origen marino depositadas en una margen pasiva. Mientras que el set G2 agrupa a calizas de ambiente marino somero.

- Con respecto a elementos traza y REE, en el set G1 se observa: depletamiento de LREE con respecto a HREE, bajas concentraciones de Nd, anomalías positivas de Eu y altos ratios de Nd<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub>. Esto sugiere que estas facies finas fueron influenciadas por un ligero input de detrito continental. Anomalías negativas de Ce y anomalías positivas de Gd y La sugieren que el set G1 se depositó en ambiente anóxico. En el set G2 se observa bajas concentraciones de REE, altas proporciones de CaO y bajas proporciones de SiO<sub>2</sub> como resultado del dominio de carbonatos en la sedimentación.
- Las características geoquímicas reportadas para los sets G1 y G2 son comunes en procesos de sedimentación en mares someros o epicontinentales. Este ambiente de sedimentación ha sido sugerido por anteriores autores para la Formación Napo en el Cretácico Superior.

- La presencia de la Formación Napo al oeste de la falla Cosanga sugiere que esta falla no es un límite tectónico, sino más bien, es una zona de propagación de la deformación, a partir de la cual segmentos de la Cuenca Oriente son asimilados a la orogenia.

## 6. Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios radiométricos para contrarrestar estos datos con edades bioestratigráficas reportadas. También es recomendable realizar estudios barométricos en esta sección.

## 7. Referencias bibliográficas

- [1] W. T. Pratt, P. Duque and M. Ponce, "An autochthonous geological model for the eastern Andes of Ecuador.," *Tectonophysics*, vol. 399, no. 1-4, pp. 251-278, 2005.
- [2] P. Baby, M. Rivadeneira, R. Barragán and F. Christophoul, "Thick-skinned tectonics in the Oriente foreland basin of Ecuador," *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 377, no. 1, pp. 59-76, 2013.
- [3] M. Litherland, J. A. Aspden and R. A. Jemielita, *The metamorphic belts of Ecuador*, Vol. 11, London: Overseas Memoir of the British Geological, 1994.
- [4] Gutiérrez, E. G., Horton, B. K., Vallejo, C., Jackson, L. J., & George, S. W. Provenance and geochronological insights into Late Cretaceous-Cenozoic foreland basin development in the Subandean Zone and Oriente Basin of Ecuador. In *Andean Tectonics*. Elsevier. pp. 237-268. 2019.
- [5] A. Gramal-Aguilar, F. Carranco-Andino, C. Romero-Cóndor, R. Pulupa-Vela, D. Calderón-Romero, y S. Toainga-Oñate, "Evidencias de canibalización de secuencias Cretácicas y Paleógenas de la Cuenca Oriente en la cuña orogénica de los Andes ecuatorianos", *Bol. Geol.*, vol. 43, n.º 3, pp. 15-34, sep. 2021.
- [6] R. J. Colony y J. H. Sinclair, "METAMORPHIC AND IGNEOUS ROCKS OF EASTERN ECUADOR", *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 34, n.º 1, pp. 1-53, marzo de 1932.
- [7] W. C. Stoll, "Notes on the mineral resources of Ecuador", *Economic Geology*, vol. 57, n.º 5, pp. 799-808, agosto de 1962.
- [8] W. Sauer, *Geología del Ecuador*. Quito: Ministerio de Educación, 1965.
- [9] R. Trouw, "Cuatro cortes por la faja metamórfica de la Cordillera Real, Ecuador", *Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil*, 1976.
- [10] Tomas Feininger (2), "Origin of Petroleum in the Oriente of Ecuador", *AAPG Bulletin*, vol. 59, 1975.
- [11] J. Baldock, "Geología del Ecuador," *Min. de Rec. Nat. y Energ. División General de Geología y Minas*, Quito, Ecuador, 1982, pp. 66-70.
- [12] J. A. Aspden y M. Litherland, "The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador", *Tectonophysics*, vol. 205, n.º 1-3, pp. 187-204, abril de 1992.
- [13] C. R. Bristow, *Guide to the geology of the Baeza road, north Ecuador*, vol. 3. Quito: Ecuadorian Geological and Geophysical Society, 1973.
- [14] BGS. *Geological and Metal occurrence maps of the northern cordillera real metamorphic belt, Ecuador*. Scale 1: 500 000. Ministerio de Energia y Minas y United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland. Overseas Development Administration ODA. 1994
- [15] H. J. Tschopp, "Oil explorations in the Oriente of Ecuador, 1938-1950," *AAPG Bulletin*, vol. 37, no. 10, pp. 2303-2347, 1953.
- [16] N. P. James and R. W. Dalrymple, "Facies models 4," *Canadian Sedimentology Research Group, Geological Association of Canada*, p. 574, 2010.
- [17] S. Mukherjee, "Introduction to Tectonics and Structural Geology: Indian Context", en *Tectonics and Structural Geology: Indian Context*. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 1-5.
- [18] D. W. Burbank y R. S. Anderson, *Tectonic Geomorphology*. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2011.
- [19] A. A. Bunaciu, E. g. Udriștioiu y H. Y. Aboul-Enen, "X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications", *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, vol. 45, n.º 4, pp. 289-299, abril de 2015.
- [20] M. M. Herron, "Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data," *Journal of Sedimentary Research*, vol. 58, no. 5, pp. 820-829, 1988.
- [21] L. A. Spalletti, E. Schwarz y G. D. Veiga, "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*, vol. 41, n.º 2, mayo de 2014.

[22] E. Jaillard, M. Caron, A. Dhondt and M. Ordoñez, *Síntesis estratigráfica y sedimentológica del Cretáceo y Paleógeno de la cuenca oriental del Ecuador*, Orstom-Petroproduccion eds, 164, 1997.

[23] S. J. Mills, “Micropaleontological examination of cuttings and cores from weil Tiguino-I.” *Anglo-Ecuadorian Oilfields Ltd, Ecuadorian Oriente Geological note* 23, pp. 6, Informe interno s.n; Petroproducción, Quito, 1971

[24] B. Faucher, S. Benites Acosta y E. Savoyat, *Esquema geológico de los Andes ecuatorianos*. Guayaquil, 1975.

[25] L. G. Bulot, W. J. Kennedy, E. Jaillard y E. Robert, “Late Middle–early Late Albian ammonites from Ecuador”, *Cretaceous Research*, vol. 26, n.º 3, pp. 450–459, junio de 2005.

[26] K. T. Ratcliffe, A. C. Morton, D. H. Ritcey y C. A. Evenchick, “Whole-rock geochemistry and heavy mineral analysis as petroleum exploration tools in the Bowser and Sustut basins, British Columbia, Canada”, *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 55, n.º 4, pp. 320–336, diciembre de 2007.

[27] K. T. Ratcliffe, A. M. Wright y K. Schmidt, “Application of inorganic whole-rock geochemistry to shale resource plays: an example from the Eagle Ford Shale Formation, Texas”, *The Sedimentary Record*, vol. 10, n.º 2, pp. 4–9, junio de 2012.

[28] V. K. Srivastava y B. P. Singh, “Depositional environments and sources for the middle Eocene Fulra Limestone Formation, Kachchh Basin, western India: Evidences from facies analysis, mineralogy, and geochemistry”, *Geological Journal*, vol. 54, n.º 1, pp. 62–82, febrero de 2018

[29] R. F. Berry, K. Goemann, J. Thompson, S. Mefre y R. Bottrill, “Geochemistry and provenance of the Turquoise Bluff Slate, northeastern Tasmania: tectonic significance”, *Australian Journal of Earth Sciences*, vol. 66, n.º 2, pp. 227–246, diciembre de 2018.

[30] L. D. Nothdurft, G. E. Webb y B. S. Kamber, “Rare earth element geochemistry of Late Devonian reefal carbonates, Canning Basin, Western Australia:

confirmation of a seawater REE proxy in ancient limestones”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 68, n.º 2, pp. 263–283, enero de 2004.

[31] B. K. Das, A. S. AL-Mikhlafl y P. Kaur, “Geochemistry of Mansar Lake sediments, Jammu, India: Implication for source-area weathering, provenance, and tectonic setting”, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 26, n.º 6, pp. 649–668, mayo de 2006.

[32] B. P. Roser and R. J. Korsch, “Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio,” *The Journal of Geology*, vol. 94, no. 5, pp. 635-650, 1986.

[33] Zhang, K. J., Li, Q. H., Yan, L. L., Zeng, L., Lu, L., Zhang, Y. X., ... & Tang, X. C. “Geochemistry of limestones deposited in various plate tectonic settings”. *Earth-Science Reviews*, vol.167, pp.27-46. 2017.

[34] Nagarajan, R., Madhavaraju, J., Armstrong-Altrin, J. S., & Nagendra, R. Geochemistry of neoproterozoic limestones of the Shahabad formation, Bhima basin, Karnataka, southern India. *Geosciences Journal*, vol.15, no.1, pp. 9-25. 2011.

[35] S. Temur, H. Orhan y A. Deli, “Geochemistry of the limestone of Mortas Formation and related terra rossa, Seydisehir, Konya, Turkey”, *Geochemistry International*, vol. 47, n.º 1, pp. 67–93, enero de 2009.

[36] S. M. McLennan y S. R. Taylor, “Sedimentary Rocks and Crustal Evolution: Tectonic Setting and Secular Trends”, *The Journal of Geology*, vol. 99, n.º 1, pp. 1–21, enero de 1991.

[37] A. Pourmand, N. Dauphas y T. J. Ireland, “A novel extraction chromatography and MC-ICP-MS technique for rapid analysis of REE, Sc and Y: Revisiting CI-chondrite and Post-Archean Australian Shale (PAAS) abundances”, *Chemical Geology*, vol. 291, pp. 38–54, enero de 2012.

[38] H. Elderfield, “The oceanic chemistry of the rare-earth elements”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 325, n.º 1583, pp. 105–126, mayo de 1988.

[39] E. Sholkovitz y R. Szymczak, “The estuarine chemistry of rare earth elements: comparison of the Amazon, Fly, Sepik and the Gulf of Papua systems”, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 179, n.º 2, pp. 299–309, junio de 2000.

[40] A. Bellanca, D. Masetti y R. Neri, “Rare earth elements in limestone/marlstone couplets from the Albian-Cenomanian Cismon section (Venetian region, northern Italy) : assessing REE sensitivity to environmental changes”, *Chemical Geology*, vol. 141, n.º 3-4, pp. 141–152, septiembre de 1997.

[41] C. R. German y H. Elderfield, “Application of the Ce anomaly as a paleoredox indicator: The ground rules”, *Paleoceanography*, vol. 5, n.º 5, pp. 823–833, octubre de 1990.

[42] E. R. Sholkovitz, W. M. Landing y B. L. Lewis, “Ocean particle chemistry: The fractionation of rare earth elements between suspended particles and seawater”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 58, n.º 6, pp. 1567–1579, marzo de 1994.

[43] J. Madhavaraju & C.M. González-León. “Depositional conditions and source of rare earth elements in carbonate strata of the Aptian-Albian Mural Formation, Pitaycachi section, northeastern Sonora, Mexico”. *Revista mexicana de ciencias geológicas*. vol. 29, no.2, pp.463-477. 2012.

[44] H. J. White, R. A. Skopec, F. A. Ramirez, J. A. Rodas y G. Bonilla, “Reservoir Characterization of the Hollin and Napo Formations, Western Oriente Basin, Ecuador”, en *Petroleum Basins of South America*. American Association of Petroleum Geologists, 1995.

[45] L. F. Sarmiento-Rojas, “Cretaceous Stratigraphy and Paleo-Facies Maps of Northwestern South America”, en *Geology and Tectonics of Northwestern South America*. Cham: Springer International Publishing, pp. 673–747, 2019.

[46] C. Vallejo et al., “Jurassic to Early Paleogene sedimentation in the Amazon region of Ecuador: Implications for the paleogeographic evolution of northwestern South America”, *Global and Planetary Change*, vol. 204, p. 103555, septiembre de 2021.

[47] M. G. Best, *Igneous and Metamorphic Petrology*. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2013.