

CONDICIONES GEOLÓGICAS FAVORABLES DE LAS SEDIMENTITAS CRETÁICAS DE LA CORDILLERA ORIENTAL DE COLOMBIA PARA LA EXISTENCIA DE DEPÓSITOS EXHALATIVOS SUBMARINOS DE PLOMO Y ZINC

Sarmiento Rojas L. F.¹

RESUMEN

La geología de la Cordillera Oriental de Colombia presenta las siguientes características comunes con otras áreas geológicas del mundo, que contienen depósitos exhalativos sedimentarios estratiformes de metales base encajados en rocas sedimentarias: (1) Existencia de una cuenca mayor de sedimentación con dimensiones del orden de varios centenares de kilómetros o cuenca de primer orden, que contiene una secuencia gruesa de sedimentitas y que esta infrayacida por basamento de naturaleza cratónica. (2) Existencia de cuencas menores de segundo orden con dimensiones del orden de varias decenas de kilómetros; estas cuencas están evidenciadas por variaciones laterales de facies y espesor de las sedimentitas. (3) Fallas y alineamientos en las márgenes de las cuencas de primer y segundo orden. Estas fallas fueron activas durante la sedimentación. (4) Intrusiones pequeñas que evidencian actividad ígnea menor contemporánea con la sedimentación. (5) Existencia de cuencas menores restringidas (cuencas de tercer orden) en donde la sedimentación ocurrió en un medio euxínico de baja energía. (6) Evidencias que indican actividad tectónica de fallas simultáneamente con la sedimentación, en las cuencas de tercer orden. A partir de lo anterior, se concluye que las sedimentitas Cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia ofrecen excelentes posibilidades para el hallazgo de depósitos exhalativos de metales base. A manera de ejemplo se discute brevemente la favorabilidad geológica del área de la plancha 208, Villeta.

Palabras clave: depósitos exhalativos sedimentarios estratiformes de Pb y Zn, Colombia, Cordillera Oriental.

ABSTRACT

The Eastern Cordillera of Colombia has the following common features with the areas that contain sediment hosted submarine exhalative lead zinc deposits in the world: (1) Existence of a major sedimentary basin with several hundreds of kilometers in size, that contain a thick sedimentary sequence and underlain by cratonic basement. (2) Existence of minor second order basins with several tenths of kilometers in size; these basins are evidenced by lateral changes of sediment thickness and facies. (3) Faults and alignments along the margins of the first and second order basins. These faults were active during sedimentation. (4) Small igneous intrusions indicating minor igneous activity during sedimentation. (5) Existence of minor restricted basins (third order basins) with sediments deposited in an euxinic low energy environment. (6) Evidence of faults that were tectonically active during sedimentation in third order basins. In conclusion the Cretaceous sedimentary rocks of the Colombian Eastern Cordillera offer an excellent possibility to find sediment hosted exhalative lead zinc deposits. As an example the favorable geological conditions of the Villeta area are discussed.

Key words: sedimentary exhalative stratiform lead zinc deposits, Colombia, Cordillera Oriental.

¹Ecopetrol-ICP Instituto Colombiano del Petróleo, Piedecuesta, Santander,
P O Box 4185-Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: luis.sarmiento@ecopetrol.com.co

INTRODUCCIÓN

Desde el siglo antepasado se tiene conocimiento de la existencia de manifestaciones de sulfuros de Pb y Zn en las sedimentitas Cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia (Fisane, 1881). Varios autores (Mariño, 1976; McLaughlin y Arce, 1972; Mutis Jurado, 1983; Otero, 1975; Rodríguez, 1972; Wokittel, 1960) han mencionado y descrito brevemente las mineralizaciones, las cuales en la mayoría de los casos son de tamaño pequeño. Algunas mineralizaciones consisten en masas estratiformes de sulfuros encajadas en lodolitas negras, las cuales tienen características comunes con los depósitos exhalativos de sulfuros masivos encajados en sedimentitas que son objeto de este trabajo. En otros casos las mineralizaciones consisten predominantemente en venas de sulfuros, relleno de cavidades, en la matriz de brechas, o en nidos e impregnaciones de forma irregular encajados en caliza o arenita calcárea. Aquellas mineralizaciones encajadas en calizas se asemejan con aquellas de los depósitos de plomo y zinc encajados en carbonatos (Carbonate hosted lead zinc deposits, Snyder, 1968; Heyl, 1968; Hagni, 1976; Crawford y Hogland, 1968; Anderson, 1980; Cox, 1983; Sawkins, 1984. A manera de ejemplo Mendoza (1983) ha considerado la mineralización de Montenegro en el Departamento de Santander perteneciente a esta última categoría.

Durante los trabajos de cartografía y estratigrafía de la plancha 208 Villeta se encontró en el sitio denominado Cascajeras sobre la carretera que de Pacho conduce a El Peñón (X=1.066.430, Y=980.050) una manifestación estratiforme de sulfuros masivos de Zn y Fe dentro de shales negros del Grupo Villeta. El hallazgo de esta mineralización, así como la existencia de algunas manifestaciones similares mencionadas en la literatura, las cuales consisten en capas o en laminas de sulfuros encajados en lodolitas grises o negras del Cretácico Inferior, sugiere la posible existencia de depósitos exhalativos de sulfuros de Pb, Zn masivos estratiformes emplazados en sedimentitas submarinas (Sediment hosted submarine exhalative lead zinc deposits, Large, 1980; Gustafson y Williams, 1981; Sangster, 1976; Cox, 1983; Sawkins, 1976, 1984;) como lo plantea Ingeominas-USGS (1983). Aspecto de gran importancia para

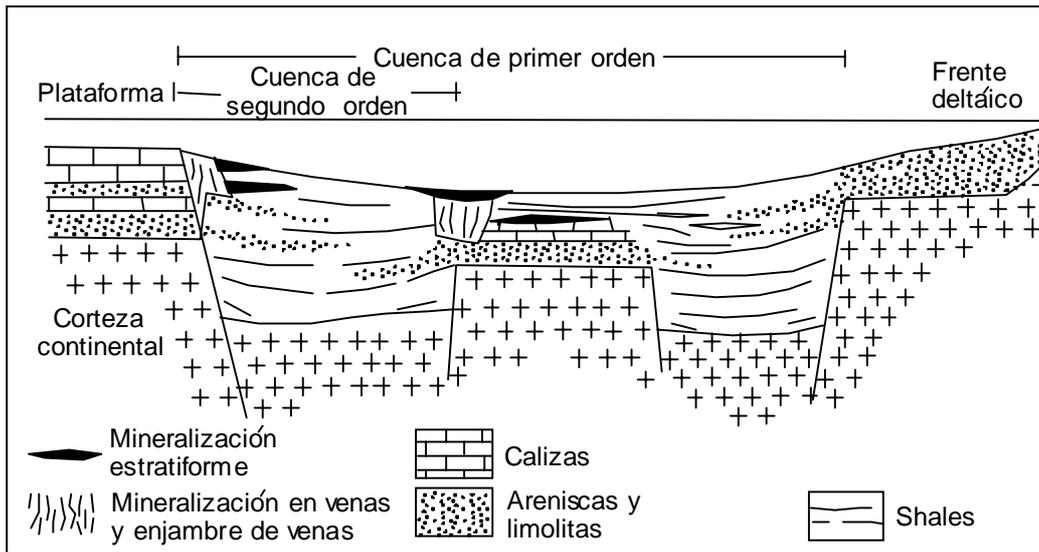
Colombia, si se tiene en cuenta que los depósitos de Pb – Zn estratiformes encajados en sedimentitas contienen más del 50 % de las reservas mundiales de Pb y Zn (Goodfellow *et al.*, 1993).

Para comprobar o descartar la anterior hipótesis, es necesario determinar si las sedimentitas Cretácicas de la Cordillera Oriental presentan características geológicas favorables para la existencia de este tipo de depósitos, lo cual es el objeto de este trabajo. Para esto se hará una comparación generalizada de las características estratigráficas y tectónicas indicativas de las condiciones paleo ambientales y paleo tectónicas durante el depósito de las sedimentitas Cretácicas de la Cordillera Oriental con aquellas de las áreas que contienen depósitos exhalativos de sulfuros masivos de plomo y zinc encajados en sedimentitas. Estas características están resumidas en la TABLA 1 y se ilustran en la FIGURA 1.

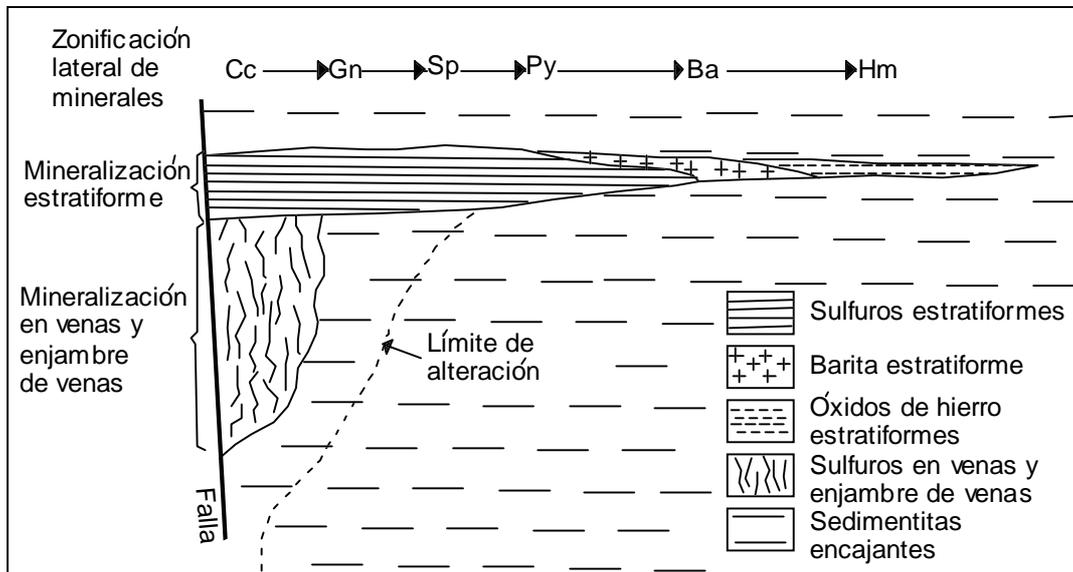
COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA CUENCA CRETÁCICA DE LA CORDILLERA ORIENTAL CON LAS DE LAS ÁREAS CON DEPÓSITOS EXHALATIVOS DE Pb Y Zn EN EL MUNDO.

Con el propósito de presentar esquemáticamente las características de la cuenca cretácica de la Cordillera Oriental se seleccionaron tres secciones con dirección WNW-ESE, perpendiculares con el rumbo de la cordillera (véanse FIGURAS 2 a 5). No se consideraron las sedimentitas terciarias. Los trabajos consultados para realizar las secciones se citan en la TABLA 2.

En las secciones se muestran características comunes con las de las áreas que contienen depósitos exhalativos, entre ellas la litología predominante, la presencia de minerales evaporíticos y de fragmentos líticos volcánicos y de feldespato en las unidades de arenitas. También se muestra la localización aproximada de las intrusiones máficas conocidas de la Cordillera Oriental y de las manifestaciones minerales de cobre, plomo, zinc, hierro y barita.



a



b

FIGURA 1. (a) Localización geotectónica de los depósitos exhalativos de Pb - Zn encajados en sedimentitas. (b) Modelo de un depósito exhalativo (tomado de Large, 1980).

**Condiciones geológicas favorables de las Sedimentitas Cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia
para la existencia de depósitos Exhalativos Submarinos de Plomo y Zinc**

TABLA 1. Resumen de las características geológicas de las áreas con depósitos exhalativos de Pb – Zn encajados en sedimentitas (tomado de Large, 1980).

CARACTERISTICAS INDICATIVAS DE MINERALIZACION POTENCIAL	COMPARACION EN COLOMBIA
	En Cretácico Cordillera Oriental
CUENCAS DE PRIMER ORDEN	x
a) Cuencas epicratónicas e intracratónicas (tamaño ~ 100 km)	x
b) Limitadas por fallas en las márgenes	x
c) Sucesiones gruesas de sedimentitas clásticas	x
Carbonatos marinos someros	x
Areniscas deltáicas y turbiditas	x
CUENCAS DE SEGUNDO ORDEN	x
	x
a) Depresiones y paleoaltos topográficos (tamaño ~ 10 km)	x
b) Cambios abruptos en las facies y espesor de la sucesión sedimentaria en los márgenes de la cuenca	x
ACTIVIDAD IGNEA CONTEMPORANEA	x
a) Tobas, sedimentitas tobáceas, cenizas volcánicas (espesor ~ 1 m, de grano fino)	x
b) Actividad volcánica bimodal en la cuenca de primer orden	x
c) Intrusiones menores	x
	En área de Villeta (plancha 208)
CUENCAS DE TERCER ORDEN	x
a) Depresión local (tamaño entre 100 y 10 km)	x
b) Ambientes euxínicos (shale negro)	x
c) Ambientes de baja energía (sedimentitas autóctonas encajantes de grano fino)	x
d) Alto contenido de carbono orgánico	x
e) Pirita diagenética y fósiles piritizados	x
ACTIVIDAD SINSEDIMENTARIA DE FALLAS Y FALLAS DE CRECIMIENTO	x
a) Cambios locales abruptos en las facies y espesor de las sedimentitas	x
b) Brechas de derrumbamiento	x
c) Conglomerados intraformacionales (sedimentitas encajantes alóctonas)	x
d) Zonas locales de plegamiento y fallamiento intensos	x
EDAD	
Desde Proterozóico a Cenozóico	x
pero la mayoría de los depósitos son del:	
a) Proterozóico Medio (1700-1400 Ma)	
b) Paleozóico Inferior – Medio (530-300 Ma)	

TABLA 1. Continuación

CARACTERISTICAS INDICATIVAS DE LA PRESENCIA DE MINERALIZACION	A definir en estudios futuros en la Cordillera Oriental
SEDIMENTITAS ESTRATIFORMES HIDROTERMALES	?
a) Chert	?
b) Barita	?
ALTERACION Y MINERALIZACION EPIGENETICA	?
a) Silicificación	?
b) Turmalinización	?
c) Brechamiento de sedimentos alterados	?
d) Disminución de carbonato alrededor del depósito	?
e) Mineralización de tipo venas con relaciones características de isótopos de Pb y S	?
ZONIFICACION GEOQUIMICA DE ELEMENTOS	?
a) Zonificación vertical Cu, Zn, Pb, Ba	?
b) Zonificación lateral Cu, Pb, Zn, Ba	?
c) Halo de Mn, Fe, Zn, Pb, Ti en las sedimentitas encajantes	?
ISOTOPOS DE Pb	?
a) Gráfico cercano a la curva de crecimiento	?
b) Homogéneos	?
ISOTOPOS DE S	?
a) S de piritita derivada de sulfato reducido del agua del mar	?
b) S de galena, esfalerita pirrotita proveniente de una fuente profunda	?
c) S de barita derivado de sulfato del agua del mar	?

Características indicativas de la mineralización potencial.

- ♦ *Cuencas de primer orden en áreas con depósitos exhalativos.*

Large (1980) denomina así a las cuencas sedimentarias mayores de 100 km. Aquellas que contienen depósitos de metales base pueden ser epicratónicas o intracratónicas, frecuentemente están limitadas por fallas asociadas con grabenes y presentan secuencias gruesas de sedimentitas clásticas o de carbonatos y areniscas de ambientes marinos someros, areniscas y limolitas de frentes deltáicos,

turbiditas de plataforma y talud continentales, carbonatos pelágicos, así como shales y cherts de aguas profundas. Las secuencias de plataforma comúnmente presentan evaporitas (Large, 1980; Gustafson y Williams, 1981). Estas cuencas están limitadas por fallas que controlan zonas de “bisagra”, - zonas de bloques subsidentes rotacionales (fault – controlled hinge zones), las cuales fueron activas durante el depósito de la secuencia sedimentaria; esta actividad se manifiesta por el contraste de espesor y cambios faciales a través de zonas de “bisagra” (hinge zones). La reactivación posterior de esas fallas forma alineamientos bien definidos (Large, 1980).

Condiciones geológicas favorables de las Sedimentitas Cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia para la existencia de depósitos Exhalativos Submarinos de Plomo y Zinc

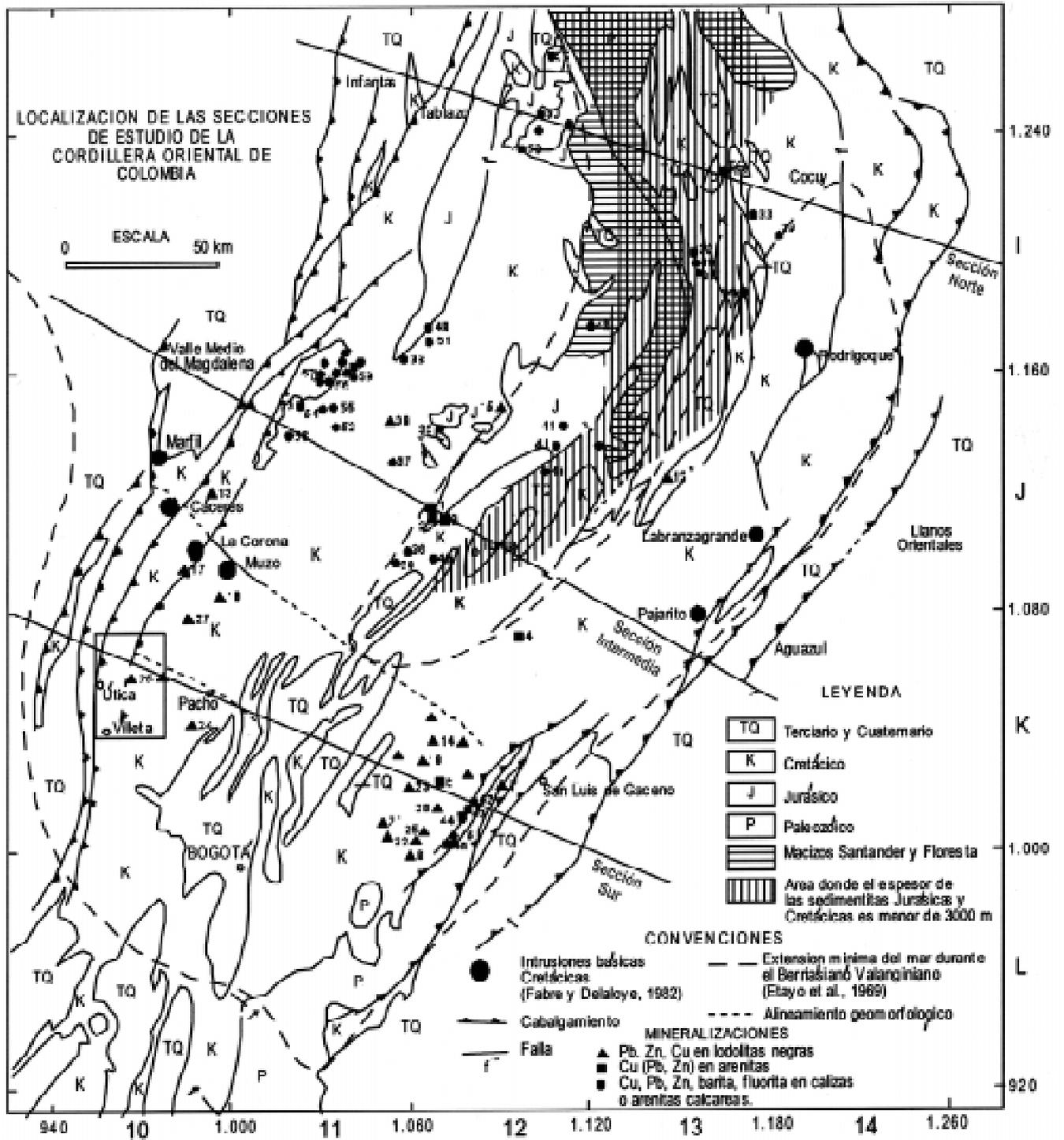


FIGURA 2. Mapa de localización de las secciones de estudio en la Cordillera Oriental de Colombia (modificado de Ingeominas, 1976 y Sarmiento, 1987a,b).

TABLA 2. Referencias bibliográficas de las secciones de estudio de la Cordillera Oriental de Colombia.

SECCIÓN NORTE	SECCIÓN INTERMEDIA
Bürgl, 1966	Bürgl, 1966
Cediel, 1968	Cooper et al., 1995
Cooper et al., 1995	Etayo-Serna, 1964, 1968, 1978
Etayo-Serna et al., 1969	Etayo-Serna et al., 1969
Fabre, 1981, 1983a, b, c; 1987	Fabre y Delaloye, 1982, 1983, 1987
Fabre y Delaloye, 1982	Ingeominas, 1976
Ingeominas, 1976	Julivert, 1958b, 1961 a, 1968
Julivert, 1958b, 1959, 1961 a,d, 1963b, 1968	Mariño, 1976
Morales et al., 1958	Morales et al., 1958
Otero, 1975	Pulido, 1979
Servicio Geol. Nal e Inventario Min. Nal., 1961, 1966b	Renzoni, 1967
Taborda, 1965	Rodríguez, 1972
Vargas et al., 1976	Taborda, 1965
Villamil, 1994	Ulloa, en progreso
Ward et al., 1973	Ulloa y Rodríguez, 1976
Wokittel, 1960	Villamil, 1994
	Wokittel, 1960
SECCIÓN SUR	
Bürgl, 1957, 1961, 1966	García, 1973
Cáceres y Etayo, 1969	Gil, 1976
Calvache y Muñoz, 1984	Ingeominas, 1976
Campbell y Burgl, 1965	Julivert, 1963c, 1968
Cardozo et al., 1987	McLaughlin, 1972
Cooper et al., 1995	Polanía y Rodríguez, 1978
Champetier de Rives et al., 1961	Sarmiento, 1989
Escovar, 1979	Segovia y Renzoni, 1966
Etayo-Serna, 1964	Ulloa et al., 1978
Etayo-Serna et al., 1969	Villami., 1994
Fabre y Delaloye, 1982	Wokittel, 1960

♦ *Cuencas de primer orden en la Cordillera Oriental.*

En la Cordillera Oriental de Colombia, la cuenca Cretácica fue desarrollada sobre corteza continental. Contiene una secuencia gruesa (hasta 8 km.) de sedimentitas clásticas y en menor proporción carbonatos en facies isópicas heterocronas que fueron depositadas en ambientes continentales, litorales o neríticos, localmente con evaporitas (Etayo-Serna y otros, 1983, véase también autores citados en la TABLA 2). En algunos sitios hubo desarrollo de turbiditas (Polanía y Rodríguez, 1978, Sarmiento, 1989; Moreno, 1990a,b).

El contraste de espesor y los cambios laterales de facies de las sedimentitas probablemente son el resultado de la subsidencia diferencial de bloques limitados por fallas normales activas durante la sedimentación, las cuales pudieron ser reactivadas

como fallas inversas durante las deformación de las sedimentitas y la formación de la Cordillera Oriental (Julivert y Téllez, 1963; Julivert, 1970; Fabre, 1983; Sarmiento 2001).

♦ *Cuencas de segundo orden en áreas con depósitos exhalativos.*

Large (1980) denomina así a cuencas menores de varias decenas de kilómetros localizadas dentro de cuencas de primer orden. Según este autor, las cuencas de segundo orden son formadas por tectonismo vertical, local y penecontemporáneo con la formación de la cuenca principal. La presencia de cuencas de segundo orden es indicada por cambios abruptos de facies y espesor de la sucesión sedimentaria.

♦ *Cuencas de segundo orden en la Cordillera Oriental.*

En la Cordillera Oriental de Colombia, a partir del estudio de cambios de espesor y facies, Fabre (1983), Cooper *et al.* (1995) y Sarmiento (2001) entre otros identificaron dos subcuencas subsidentes de tipo graben con dirección N-S a NNE-SSW: (1) la de Tablazo-Magdalena Medio, y (2) la del Cocuy, separadas por el Paleomacizo de Santander-Floresta, en el cual la subsidencia fue menor y no hay registro estratigráfico del inicio del Cretácico Inferior (Fabre, 1983) (véase FIGURA 3). Hacia el sur, en la sección Valle Medio del Magdalena-Tunja-Aguazul (véase FIGURA 4); los cambios laterales de facies y espesor de la secuencia cretácica, en sentido ENE-WSW, señalan la continuación de las dos subcuencas separadas por un bloque menos subsidente, que parece ser la prolongación al sur del Paleomacizo de Floresta; éste parece hundirse progresivamente hacia el sur, de manera que en la sección Útica-Pacho-San Luis de Gaceno (véase FIGURA 5) el modelo gravimétrico elaborado por Calvache y Muñoz (1984) sugiere la existencia de una sola cuenca sin la presencia de un bloque levantado en la parte central de la sección, en la región de la Sabana de Bogotá.

♦ *Actividad ígnea contemporánea con los depósitos exhalativos.*

Los depósitos exhalativos Pb-Zn mejor estudiados están asociados con características geológicas que indican actividad ígnea penecontemporánea, que se evidencia por la presencia de tobas y sedimentitas tobáceas dentro de la sucesión sedimentaria encajante (Large, 1980). Se trata de estratos lateralmente continuos, de 2 a 20 cm de espesor, de tobas de grano fino carentes de lapilli, de color verdoso y fractura concoide; en sección delgada muestran pseudomorfo de feldespato potásico remplazando fragmentos (shards) de vidrio volcánico; la matriz generalmente es feldespática y clorítica; su contenido en K_2O es alto (c.f. Large, 1980). Los centros eruptivos generalmente no se han identificado (Large, 1980).

Debajo de la formación que contiene el depósito de Tom en Canadá se han identificado horizontes

volcánicos básicos (c.f. Large, 1980). También la actividad ígnea se manifiesta por intrusiones que pueden estar cerca de los depósitos (Large, 1980); por ejemplo, el depósito de Sullivan presenta un stock de granodiorita-pegmatita aproximadamente contemporánea con la mineralización (Large, 1980). Se ha sugerido que debajo del depósito de Megen hay intrusiones profundas y Ehrenbert *et al.* (1954) y Scherp (1974) proponen que esas intrusiones han suministrado calor para la circulación convectiva de las soluciones hidrotermales metalíferas (c.f. Large, 1980).

Se considera que la evidencia de que existió un gradiente geotérmico anómalamente alto cuando se originaron las mineralizaciones, es un parámetro muy importante en el reconocimiento de áreas favorables para mineralizaciones exhalativas encajadas en sedimentitas (c.f. Large, 1980; Gustafson y Williams, 1981; Sawkins, 1984).

♦ *Actividad ígnea en la Cordillera Oriental.*

En la región de Villa de Leiva, Bürgl (1954) fue el primero en mencionar la existencia de "capas o lentes tobáceos" en la Formación Paja; Forero y Sarmiento (1982) hallaron en esas capas rutilo, mineral comúnmente derivado de vulcanitas (c.f. Forero y Sarmiento, 1982). Rocas volcanoclasticas cretácicas han sido reportadas por Rodríguez y Rojas (1985), Rubiano (1989) y Villamil y Arango (1998).

En algunas perforaciones de la Formación Girón en el Valle Medio del Magdalena se han hallado riolitas (Morales y otros, 1968), brechas porfiríticas, feldespáticas de flujo (Taborda, 1965) y pórfidos dacíticos que cortan la Formación Tambor (Ward *et al.* 1973). Las areniscas del Cretácico inferior que afloran entre Útica y Villeta y en la carretera El Peñón-La Peña contiene fragmentos líticos volcánicos (Kuslansky, 1982; Sarmiento, 1989; Moreno, 1990b, 1991). Además, varios autores (véase tabla 3) han reportado la existencia de intrusiones básicas en la sucesión cretácica, las cuales han sido estudiadas por Fabre y Delaloye (1982) y Moreno y Cooncha (1993); según estos autores, son cuerpos de tamaño pequeño, diques y silos de composición gabrítica, toleíticos a

alcalinos, que presentan evidencias de alteración hidrotermal; se encuentran dentro de shales oscuros del Cretácico Inferior. Fabre y Delaloye (1982), basados en dataciones radiométricas K/Ar efectuadas por ellos, concluyen que las intrusiones no son necesariamente coetáneas, e interpretan una actividad magmática continua desde el Cretácico Inferior hasta el Cenomaniano. Según Fabre y Delaloye (1982), Fabre (1983) y Sarmiento (2001) las intrusiones están localizadas en la parte más subsidente de la cuenca donde la litosfera fue adelgazada; probablemente hubo fusión incipiente del manto y se crearon las condiciones para el emplazamiento de las intrusiones, tal vez controlado por fracturas profundas por las que pudo ascender el magma. Las fracturas eran probablemente fallas normales de tensión que limitaban los bloques más subsidentes (Fabre y Delaloye, 1982; Fabre, 1983; Sarmiento 2001).

En las partes más subsidentes, durante el Cretácico Inferior, el flujo y el gradiente térmico fueron elevados (Fabre, 1983), hecho que favoreció la circulación de fluidos hidrotermales y la removilización de iones de Pb, Zn, Cu, Ba y Fe (Sawkins, 1984; Fabre, 1983).

♦ *Actividad tectónica y alineamientos en áreas con depósitos exhalativos.*

Los depósitos exhalativos submarinos de Pb – Zn frecuentemente ocurren cerca de fallas marginales de las cuencas de primer o segundo orden, fallas asociadas con cambios de facies y espesor de las sedimentitas: esas fallas son zonas de debilidad de la corteza que pueden haber actuado como conductos para el ascenso de soluciones hidrotermales (Large, 1980; Gustafson y Williams, 1981; Sawkins, 1984).

A partir de evidencias geofísicas, o de la distribución geográfica de centros eruptivos, se han postulado fracturas profundas de la corteza, las cuales no tienen extensión superficial visible (c.f. Large, 1980). La intersección de los alineamientos relacionados con cambios de facies y espesor de la sucesión sedimentaria, con otros alineamientos asociados con características indicativas de alto flujo de calor, pueden ser sitios ideales para el ascenso de soluciones hidrotermales (Large, 1980).

Los niveles estratigráficos en los cuales se presentan los sulfuros estratiformes frecuentemente están asociados con un cambio rápido en las facies sedimentarias regionales, el cual puede reflejar una actividad tectónica penecontemporánea en los márgenes de las cuencas de primer o segundo orden (Large, 1980).

♦ *Actividad tectónica y alineamientos en la Cordillera Oriental.*

Los sitios en los cuales cambia notablemente el espesor y las facies de las sedimentitas cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia, son los bordes de las cuencas de primer o segundo orden y coinciden aproximadamente con fallas inversas o alineamientos paralelos con el rumbo regional de la cordillera, estos alineamientos parecen haber sido fallas normales activas durante la sedimentación que posiblemente fueron reactivadas durante la fase de compresión Mioceno - Plioceno y la formación de la Cordillera Oriental (Julivert y Téllez, 1963; Julivert, 1970; Fabre, 1983; Cooper *et al.*, 1995; Sarmiento, 2001).

En las FIGURAS 3a, 4a y 5a puede apreciarse que las manifestaciones minerales conocidas de Cu, Pb, Zn, Fe y Barita están localizadas en unidades litoestratigráficas no más jóvenes que el Cenomaniano (Fabre y Delaloye, 1982) y están localizadas cerca de probables fallas asociadas con cambios de facies y espesor de las sedimentitas.

Las intrusiones de Pajarito (Fabre y Delaloye, 1982), Labranzagrande (A. Fabre comunicación personal), Río Nuevo, Río Cravo Sur, y Río Guacavía, (Moreno y Concha, 1993) parecen estar asociadas con el sistema de fallas del borde llanero (véase FIGURA 2). La localización de las intrusiones de Cáceres, La Corona (Fabre y Delaloye, 1982), Quebrada Las Palomas, Quebrada La Culebra, Marfil, Quebrada Grande, Quebrada La Chorrera, La Chunchalita, Quebrada La Fiebre (Moreno y Concha, 1993) y una descubierta por José Guerrero y Ariulfo García (comunicación personal) cerca de las minas esmeraldíferas de Muzo, parecen corresponder a la intersección de un alineamiento con dirección NNW-SSE con el sistema de fallas de La Salina. La

TABLA 3. Referencias bibliográficas sobre las intrusiones básicas y la actividad magmática en la Cordillera Oriental de Colombia.

REFERENCIAS MAGMATISMO CORDILLERA ORIENTAL	
Fabre, 1983a, 1987	Rubiano, 1989
Fabre y Delaloye, 1982	Sarmiento, 1989, 2001
Gansser, 1956, 1963, 1973	Shell Condor de Colombia, 1962
Morales et al., 1958	Taborda, 1965
Moreno, 1990 a, b	Trumpy, 1943
Moreno y Concha, 1993	Ulloa y Rodríguez, 1976
Olsson, 1956	Villamil, 1994
Pratt, 1961	Villamil y Arango, 1998
Radelli, 1961	Ward et al., 1973

proyección del lineamiento NNW-SSE del cual hace parte la falla del Río Itoco (véase FIGURA 2) hacia el SSE cruzaría el área de Chivor, Almeida, donde existen mineralizaciones de Pb-Zn, Cu y Fe. A pesar de que este alineamiento no tiene una expresión superficial visible es posible que corresponda a una fractura profunda en la corteza, asociada con alto flujo calorífico. Algunos alineamientos geomorfológicos con dirección NWN-ESE, tales como el del Río Negro (Plancha 208), han sido interpretados por Naciones Unidas - Ingeominas (1975) como fallas; sin embargo, no se observa un desplazamiento apreciable de las unidades litoestratigráficas afectadas. Es probable que la intersección de estos alineamientos con las fallas inversas asociadas con cambios de facies y espesor de la sucesión sedimentaria sean sitios favorables para el ascenso de fluidos hidrotermales (c.f. Large, 1980).

♦ *Cuencas de tercer orden en áreas con depósitos exhalativos.*

Las cuencas de tercer orden son depresiones locales cuyo tamaño varía entre centenares de metros y algunos kilómetros y son las trampas morfológicas que contienen las mineralizaciones estratiformes de sulfuros. Large (1980) describe las cuencas de tercer orden de la siguiente manera: contienen una variedad de litologías que pueden clasificarse como litologías autóctonas – que indican un ambiente sedimentario de baja energía dentro de la cuenca – o como litologías alóctonas que señalan un influjo de alta energía de material clástico. Las litologías autóctonas generalmente son shales y limolitas o calizas y

dolomitas finogranulares; presentan un alto contenido de carbono orgánico, pirita diagenética y fósiles piritizados que evidencian condiciones euxínicas de depósito. Las litologías alóctonas son sedimentitas clásticas interestratificadas dentro de litologías autóctonas; consisten en conglomerados, brechas intraformacionales y areniscas que fueron rápidamente introducidas en la cuenca, comparativamente con la tasa baja de depósito de las litologías autóctonas. Las litologías alóctonas muestran características que indican un rápido influjo de esos sedimentos asociado con actividad contemporánea de fallas, tales como estratificación gradada de posible origen turbidítico y estructuras de erosión y arrastre relacionadas con deslizamientos. La composición de las litologías alóctonas refleja la composición de las facies marginales de la cuenca de tercer orden. Durante el proceso exhalativo que da origen a la mineralización, la sedimentación ocurre en ambientes con profundidad de agua variables entre marino somero hasta cerca de 500 m. Según Finlow – Bates y Large (1978) si el proceso de exhalación de las soluciones hidrotermales ocurre a una profundidad de agua mayor de aproximadamente 400 m, la presión hidrostática inhibe el hervor de las soluciones y se origina una mineralización estratiforme; si por el contrario, la exhalación de las soluciones hidrotermales ocurre en condiciones de agua somera, la presión hidrostática no es suficiente para evitar la ebullición de las soluciones y la precipitación de los sulfuros ocurre en venas o en enjambre de venas (stockwork; Finlow-Bates y Large, 1978).

Condiciones geológicas favorables de las Sedimentitas Cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia para la existencia de depósitos Exhalativos Submarinos de Plomo y Zinc

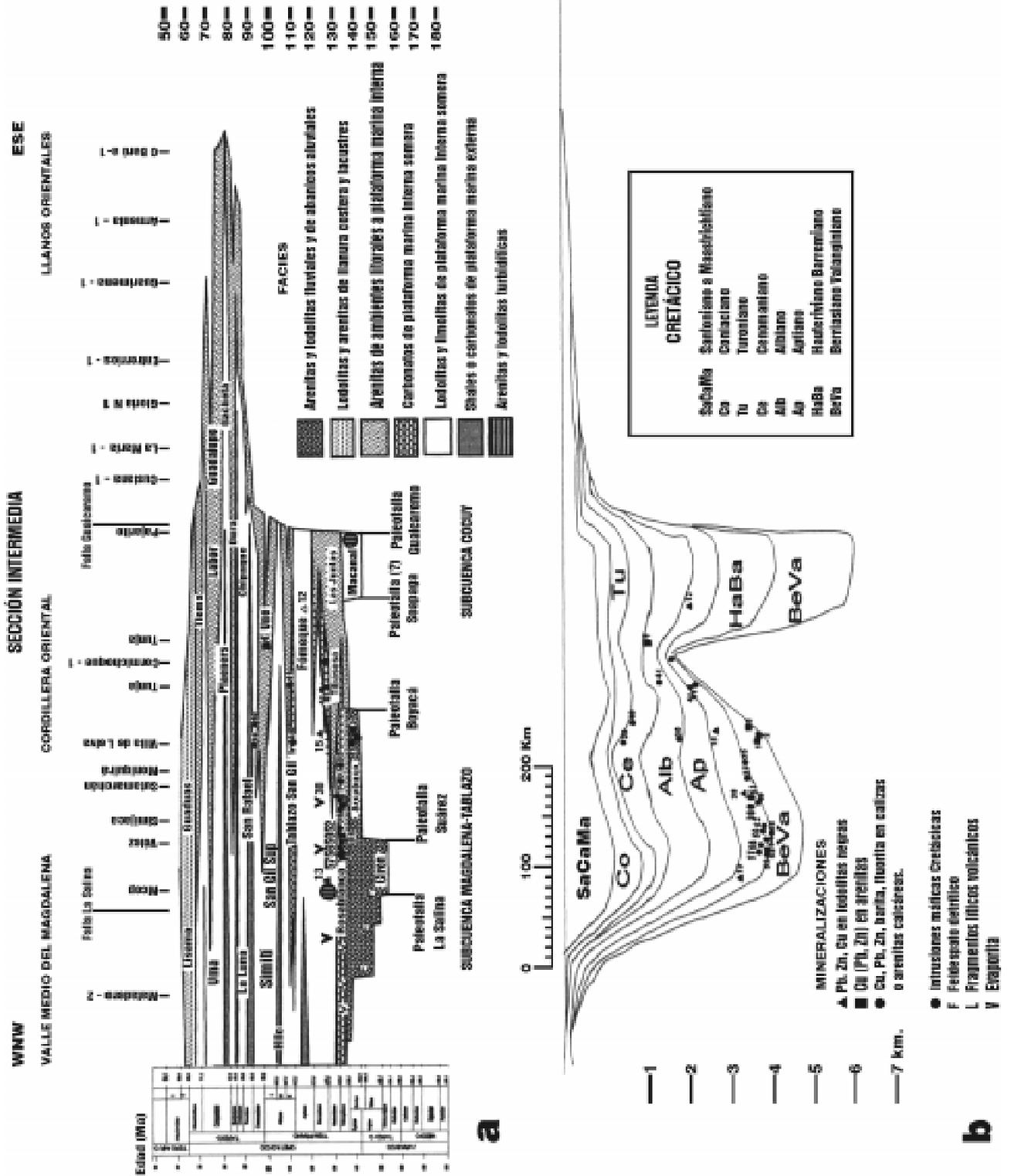


FIGURA 4. Sección transversal intermedia (después de Fabre, 1985, 1987; Villamil, 1994 and Cooper *et al.*, 1995). La sección intermedia atraviesa el Valle Medio Del Magdalena, Tunja y Aguazul. Otras explicaciones como en la FIGURA 3.

♦ *Cuencas de tercer orden en la Cordillera Oriental.*

Para identificar cuencas de tercer orden en la Cordillera Oriental de Colombia es necesario construir mapas que muestren con suficiente detalle la distribución de las facies y las variaciones de espesor de las sedimentitas (Large, 1980). Como ejemplo se plantea a manera de hipótesis de trabajo la posible existencia de una cuenca de tercer orden en el área de Villeta – Plancha 208 –. Allí, la sucesión estratigráfica cretácica presenta cambios laterales de facies y espesor reconocibles en sentido ENE – WSW, los cuales sugieren la existencia de una cuenca de tercer orden. La estratigrafía del área se esquematiza en la FIGURA 6 tomada de Sarmiento y otros (1985). El intervalo litoestratigráfico A1, de arenisca, presenta características que señalan que fue depositado en un ambiente litoral a marino somero (García, 1983; Sarmiento, 1989); en tanto que el intervalo litoestratigráfico A2, de arenisca, que aflora al ENE del anterior y es aproximadamente de la misma edad (ambos intervalos infrayacen un mismo intervalo de shale B), tiene características que indican que fue depositado como un cuerpo turbidítico (Cardozo y otros, 1987; Sarmiento, 1989). El mayor espesor de la secuencia estratigráfica al oriente de la falla Canoas – La Peña, donde aflora el intervalo litoestratigráfico A2 (véanse FIGURAS 6 y 7), así como la variación lateral de facies, sugiere la existencia de una depresión local –cuenca de tercer orden–; en ella, la sucesión del Cretácico Inferior pre-Albiano presenta un predominio de shale gris oscuro a negro con materia orgánica, donde es frecuente la piritita y los fósiles piritizados – litologías autóctonas –, con interestratificaciones de arenisca de probable origen turbidítico – litologías alóctonas – con estratificación gradada, estructuras de erosión y arrastre, intraclastos, conglomerados intraformacionales, que en conjunto indican un rápido influjo de los sedimentos asociados con actividad tectónica contemporánea. La existencia de una manifestación estratiforme de piritita y esfalerita dentro del shale negro calcáreo en la vereda Cascajeras, al oriente de la falla Canoas – La Peña, concuerda con la posible existencia de una cuenca de tercer orden en el área.

♦ *Actividad de fallas simultánea con la sedimentación, en áreas con depósitos exhalativos.*

En las áreas con depósitos exhalativos de Pb - Zn las evidencias de la actividad de fallas simultánea con la sedimentación están representadas por cambios de facies y espesor de las sedimentitas a través de la zona de falla, la presencia de brechas de deslizamiento y conglomerados intraformacionales y zonas locales de plegamiento y fallamiento de gran intensidad comparados con la deformación regional (Large, 1980). Muchos depósitos están limitados por una falla y los sulfuros bandeados están deformados por deslizamiento y plegamiento sinsedimentario, a veces están asociados con turbiditas (Sangster, 1976; Large, 1980; Sawkins, 1984).

Las fallas tienen características de fallas de crecimiento (growth faults) y tienen evidencia de actividad durante un corto evento mineralizante de sulfuros; en algunos casos la reactivación posterior produce alineamientos. Durante el movimiento, en la zona de falla la dilatación entre los bloques fallados origina sitios favorables para el ascenso de fluidos hidrotermales; los movimientos pequeños en los planos de falla pueden bombear a la superficie grandes volúmenes de fluidos mineralizantes (c.f. Large, 1980). La zonificación geoquímica dentro de los depósitos señala un centro de exhalación de soluciones cercano a las fallas (Williams, 1978; Taylor y Andrew, 1978; en Large, 1980).

♦ *Actividad de fallas simultánea con la sedimentación en la Cordillera Oriental.*

Los cambios faciales y de espesor de las sedimentitas cretácicas de la Cordillera Oriental son evidencia de fallas activas que limitaban bloques más subsidentes durante la sedimentación (Julivert y Téllez, 1963; Julivert, 1970; Fabre, 1983; Cooper *et al.*, 1995; Sarmiento, 2001).

En el área de Villeta – Plancha 208 – los cambios laterales de facies y espesor a través de la zona de falla de Canoas – La Peña, así como la presencia de intraclastos, conglomerados intraformacionales, y estructuras producidas por la deformación de

Condiciones geológicas favorables de las Sedimentitas Cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia para la existencia de depósitos Exhalativos Submarinos de Plomo y Zinc

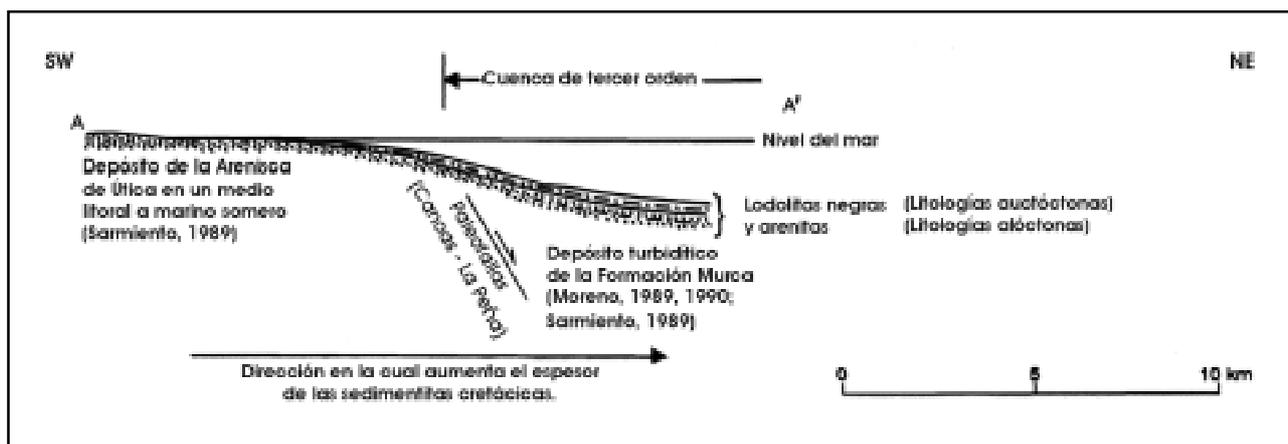


FIGURA 7. Corte esquemático (SW-NE) durante el depósito de las unidades inferiores de arenisca en el área de Villeta.

sedimento blando, asociados con procesos turbidíticos en la unidad de arenisca de Pinzaima (Sarmiento, 1989; Fm. Murca, Moreno, 1990) son evidencia de actividad tectónica simultánea con la sedimentación.

♦ *Edad.*

Los depósitos estratiformes de Pb - Zn encajados en sedimentitas conocidos en el mundo se han formado en un rango de tiempo desde aproximadamente 2.000 millones de años hasta el presente (Gustafson y Williams, 1981). Parece haber dos períodos principales de formación de depósitos: el Proterozoico medio (1.700 – 1.400 Ma) y el Paleozoico inferior y medio (530 – 300 Ma; Large, 1980).

Sawkins (1984) argumenta que la escasez de depósitos estratiformes de Pb, Zn hallados en sedimentitas mesozóicas y cenozoicas no necesariamente indican que no se hayan formado durante este tiempo, sino que los depósitos con esta edad yacen enterrados en profundidad en cuencas epicratónicas e intracratónicas.

En Colombia las condiciones propicias para la formación de estos depósitos se han desarrollado en las sedimentitas cretácicas de la Cordillera Oriental (Ingeominas – USGS, 1983; Sarmiento, 1987a,b).

Características que indican la presencia de mineralización

En la TABLA 1 se enumeran las características presentes en los depósitos exhalativos estratiformes encajados en sedimentitas, que pueden ser indicativas de mineralización.

En el área de Villeta (Cundinamarca), Sarmiento y otros (1985), con base en análisis químicos de muestras de roca colectadas por funcionarios del Proyecto Minerales Metálicos del Ingeominas y facilitados por Jorge Valdiri W., determinaron anomalías geoquímicas de Zn, Cd y Mo restringidas al intervalo estratigráfico comprendido por los shales y lodolitas de edad Aptiano superior – Albiano que afloran en el sector del Río Zumbé al norte de Útica, las cuales probablemente reflejan mineralizaciones estratoconfinadas de sulfuros de esos metales.

En las sedimentitas cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia no se han hallado depósitos exhalativos de metales base y la única fuente de información disponible son las manifestaciones de sulfuros de Pb, Zn, Cu, minerales de hierro, barita y fluorita; éstas están restringidas a las unidades litoestratigráficas del Cretácico anterior al Turoniano (Fabre y Delaloye, 1982; véase TABLA 3), por lo tanto, es aconsejable estudiar las manifestaciones, así como efectuar estudios geoquímicos alrededor de ellas.

TABLA 4. Manifestaciones minerales de Pb, Zn, Cu, Fe, barita y esmeraldas en la Cordillera Oriental de Colombia.

MINERALIZACIONES		REFERENCIAS
Lugar, Municipio, Minerales, Formación, Tipo		
1)	Montenegro, Mpio. Concepción, Galena, Esfalerita; F. Mercedes; lentes paralelos con estratificación y mineralización diseminada.	Vargas et al., 1976
2)	Mina Machacuta, Mpio. Soatá; Galena (Esfalerita), F. Capacho; no precisado.	“
3)	Mina Alcohol, Mpio. Soata; Galena, Esfalerita; F. Aguardiente; zona de falla mineralizada.	“
4)	El Jeque, Mpio. Tipacoque; Galena, Esfalerita; F. Capacho; en venas pequeñas y como cemento en areniscas.	“
5)	Las Mercedes, Mpio. Chiscas, Galena, Esfalerita (Calcopirita); F. Capacho; venas pequeñas de 1 a 5 cm espesor.	“
6)	El Escobal, Mpio. La Uvita; Galena, Esfalerita; F. Capacho; cuerpos lenticulares; cuerpos lenticulares en zona de falla.	“
7)	Prospecto Q. Cedrilla, Mpio. Coromoro; Galena (Esfalerita, Calcopirita), F. Rosablanca; lentes irregulares.	“
8)	Vereda San Juan, Mpio. Guacamayo, Galena, Baritina; F. Rosablanca; conocida por rodados.	“
9)	Las Juntas Sur, Mpio. Jordan; Baritina (Galena, Malaquita); dos filones, espesor hasta 2.50 m.	“
10)	San Martín, Mpio. La Aguada; Baritina, Fluorita, F. Rosablanca; no precisado.	“
11)	Santa Isabel, Mpio. Nobsa, Galena, Esfalerita (Calcopirita); F. Fómeque, venas.	Ingeominas, 1978
12)	Vereda Carare, Mpio. Toguí; Galena; F. Rosablanca; venas.	Rodríguez, 1972
13)	Río Samacá, Mpio. Villa de Leiva, Galena, Esfalerita; F. Arenisca de Arcabuco; venas.	“
14)	La Candelaria, Mpio. Ráquira; Galena (Limonita), F. San Gil. Inf.; vena 10 cm.	Etayo, com pers.
15)	Las Minas, Mpio. Gachantivá; Calcopirita; F. Rosablanca; dos filones, espesor de 15 a 60 cm.	Ulloa y Rodríguez, 1979
16)	Mina Los Locos; Mpio. Sucre; Calcopirita; F. Rosablanca; relleno de fracturas y lentes.	“
17)	Mina Peras Blancas, Mpio. Sabanalarga; Galena, Esfalerita; F. Rosablanca; diseminada y en fracturas.	“
18)	Las Rata, Mpio. Sucre; Galena, Calcosina; F. Rosablanca; filones irregulares.	“
19)	Tres Esquinas, Mpio. Guavatá; Esfalerita, Malaquita (Limonita); F. Paja; venas.	“
20)	Minas El Púlpito y Motua, Mpio. Bolívar; F. Rosablanca; relleno de fracturas.	“
21)	Varias Minas, Mpio. Bolívar; Barita; F. Rosablanca; relleno de fracturas.	“
22)	Mina Monteoscuro, Mpio. Bolívar; Barita, F. Rosablanca; relleno de fracturas y de cavidades.	“
23)	Mina La Belleza, Mpio. Jesus María; Barita; F. Rosablanca; filón 20 cm de espesor.	“
24)	Varias Minas, Mpios. Bolívar y Vélez; Calcopirita (Siderita); F. Rosablanca; hilos y filoncitos.	Ingeominas, 1978
25)	Q. La Mina, Mpio. Paime; Esfalerita; F. Paja; venas.	Rodríguez, 1972
26)	Q. La Mina, Mpio. Yacopí, Pirita, Malaquita; F. San Gil. Inf.; relleno de fracturas.	Gil, 1976
27)	Mpio de Otanche, Galena, Pirita, F. Paja, venas.	Ingeominas, 1978
28)	Varias Minas, Mpios. Muzo, Yacopí, Otanche, El Peñón; Esmeraldas; F. Paja; en venas.	“
29)	Veredas Las Mercedes y Manizales, Mpio. Ubalá; Siderita; F. Caliza del Guavio; relleno de fracturas.	Gil, 1976
30)	Q. Berría, Mpio. San Eduardo; Siderita; F. Areniscas de Las Juntas; relleno de fracturas.	Ulloa y Rodríguez, 1976
31)	Tominejas, Mpio. Gachalá; Esfalerita (Calcopirita); F. Lutitas de Macanal; filón de 3 m de espesor.	“
32)	Las Minas, Mpio. Manta; Siderita (Calcopirita); F. Fómeque; diseminada, zona de 2 m de espesor.	“
33)	Cueva Oscura y San Rafael, Mpio. Ubal; Galena, Calcopirita, Siderita; F. Caliza del Guavio; diseminada.	“
34)	Q. Porras, Mpio. Zetaquirá; Galena (Esfalerita); F. Une; relleno de fracturas.	“
35)	Vereda Nazareth; Mpio. Ubalá; Esfalerita (Galena); F. Lutitas de Macanal; relleno fracturas y diseminado.	“
36)	Q. Colorada, Mpio. San Eduardo; Manganeso; F. Fómeque?; acumulación residual.	“

**Condiciones geológicas favorables de las Sedimentitas Cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia
para la existencia de depósitos Exhalativos Submarinos de Plomo y Zinc**

TABLA 4. (Continuación)

MINERALIZACIONES		REFERENCIAS
Lugar, Municipio, Minerales, Formación, Tipo		
37)	Chivor y varias minas, Mpios. Ubalá, Gachalá, Almeida, Somondoco; Esmeraldas; Fms. Caliza del Guavio, Lutitas de Macanal y Areniscas de Las Juntas; en venas.	“
38)	La Cascada, Mpio. Ubalá; Barita; F. Caliza del Guavio; filón de 20 cm, relleno de fracturas.	“
39)	El Salitre, Mpio. Tiribitá; Hematita, Siderita (Calcopirita); F. Fόμεque; capas y diseminaciones.	Gil, 1976
40)	Santa Polaina, Mpio. Junín; Calcopirita, Siderita; F. Fόμεque; diseminaciones y nidos.	“
41)	Mina El Rincón, Mpio Junín; Esfalerita, Calcopirita, Arsenopirita, Siderita; F. Fόμεque; vetas.	“
42)	Muchindote, Mpio. Gachetá; esfalerita (Malaquita); F. Fόμεque; nidos e impregnaciones.	“
43)	La Playa, Mpio. Junín; Esfalerita, Siderita; F. Fόμεque; bloques rodados de vetas.	“
44)	Vereda Providencia, Mpio. Supatá; Galena, Esfalerita; Grupo Villeta, k5; dos vetas de 1 cm de espesor.	McLaughlin, et al., 1972
45)	Algodones, Mpio. Pacho; Limonita, Grupo Villeta, k5; tres capas de 2.80 m cada una.	Gil, 1976
46)	Q. Barro Blanco, Mpio. Pacho; Limonita; Grupo Villeta, k5; un filón de 2 m de espesor.	“
47)	Escuela del Cedro, Mpio. Pacho; Limonita; Grupo Villeta, k5; un filón de 2.50 de espesor.	“
48)	Vereda La Capilla, Mpio. Villa de Leiva; Limonita, F. Arcabuco; una capa de 20 cm de espesor.	Mariño, 1976
49)	Corregimiento Chíquiza, Mpio. Tunja; Galena; F. Arcabuco; venitas de 1 cm de espesor.	“
50)	Gámbita Centro, Mpio. Gámbita; Galena, Calcopirita, Pirita; F. Paja; lentejones de 5 a 10 cm de espesor.	Otero, 1975
51)	Vereda Amarillo, Mpio. La Paz; Barita (Fluorita, Malaquita); F. Rosablanca; venas.	“
52)	Loma de Cocunche, Mpio. Nocaima; Malaquita, Azurita, Siderita (Limonita); Gr. Villeta (shale de la Q. Terama, Int. b); matriz en brecha de falla.	Cardozo y otros (1987)
53)	Vereda Cascajeras, Mpio. El Peñón; Pirita, Esfalerita, Siderita; Gr. Villeta (shale de Cerinza, Int. d); estratos masivos de sulfuros con espesor entre 2 y 5 cm, venas.	“

TABLA 5. Distribución en el tiempo geológico de los depósitos estratiformes de Pb – Zn encajados en sedimentitas en el mundo.

EDAD	NUMERO DE DEPÓSITOS
Precámbrico	15
Paleozóico	9
Mesozóico	2
Cenozóico	2

CONCLUSIONES

- 1) Las sedimentitas cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia tienen características faciales y estructurales comunes con las sedimentitas que contienen los depósitos exhalativos estratiformes de metales base en el mundo.
- 2) Existen excelentes posibilidades para el hallazgo de depósitos exhalativos estratiformes de metales base en las sedimentitas cretácicas de la Cordillera Oriental de Colombia.

- 3) A manera de ejemplo, el área de Villeta – plancha 208 – tiene características geológicas favorables para la existencia de depósitos exhalativos estratiformes de metales básicos encajados en sedimentitas, como parece reafirmarlo las anomalías geoquímicas estratoconfinadas de Zn, Cd y Mo.

RECOMENDACIONES

- 1) Estudio stratigráfico y estructural de las sedimentitas del Cretácico de la Cordillera Oriental de Colombia con el objeto de reconocer áreas con evidencias indicativas de mineralización potencial: Cuencas restringidas de pequeña escala, con sedimentitas depositadas en ambientes euxínicos de baja energía, fallas sinsedimentarias que controlaron la subsidencia diferencial de bloques, evidencias de actividad magmática y fuentes de calor.

- 2) Estudios magnéticos y gravimétricos con el objeto de complementar la información estratigráfica y estructural en profundidad, así como detectar la presencia de masas ígneas que no afloran.
- 3) Construcción de secciones y mapas que representan las variaciones de facies y espesor de las sedimentitas cretácicas, e incluyan las fallas y alineamientos relacionados con la subsidencia diferencial de bloques durante la sedimentación, con el detalle suficiente para permitir la delimitación de áreas favorables para el hallazgo de depósitos.
- 4) Estudio de las manifestaciones minerales conocidas y su relación con las áreas favorables para la existencia de los depósitos.
- 5) Estudios geoquímicos, especialmente en áreas favorables, con el objeto de delimitar áreas más restringidas en las cuales pueden utilizarse métodos electromagnéticos para detectar posibles mineralizaciones.
- 6) Estudio de detalle de la geología del área de Villeta, especialmente el sector del Río Zumbé, al norte de Útica donde se presentan los valores anómalos de Zn, Cd y Mo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue hecho hace mas de quince años cuando el autor trabajaba en Ingeominas, sin embargo se actualizo con algunas referencias recientes. Agradezco al Ingeominas y a mis compañeros y amigos de ese entonces. Agradezco a los doctores Herman Duque-Caro, Giancarlo Renzoni y Antoine Fabre por sus comentarios y sugerencias, así como a los geólogos y compañeros de trabajo de esa época Hugo Forero O, Eduardo Cardozo P y Carlos Ramírez Q, quienes además de hacer sugerencias corrigieron el texto y facilitaron la información relativa al área de Villeta. También se agradece a un corrector anonimo, a la secretaria Isabel Cárdenas T. y al personal de dibujo de Ingeominas su colaboración.

REFERENCIAS

- Anderson, G. M. (1980). Mississippi Valley – Type deposits. Ore deposits workshop. Toronto, Section 1, pp. 3-45.
- Bürgl, H. (1954). El Cretáceo Inferior en los alrededores de Villa de Leiva, Boyacá. Bol. Geol., Serv. Geol. Nal. Bogotá, Vol. 2(1), pp. 5-22.
- Bürgl, H. (1957). Bioestratigrafía de la Sabana de Bogotá y sus alrededores. Bol. Geol., Serv. Geol. Nal., Bogotá, Vol. 5(2), pp. 113-185.
- Bürgl, H. (1961). Historia geológica de Colombia. Revista de la Acad. Colomb. De Ciencias Exact. Fis. y Nat., Bogotá, Vol. 11(43), pp. 137-191.
- Bürgl, H. (1966). *Precambrian to middle Cretaceous stratigraphy of Colombia*. Translated by Charles G. Allen and Normal R. Rowlinson, Feb. 1973, Bogotá, p. 214.
- Cáceres, C., Etayo, F. (1969). Bosquejo geológico de la región del Tequendama. Primer Cong. Colomb. De Geología. Opúsculo guía de la Excursión pre-Congreso., Bogotá, p. 22.
- Calvache, J., Muñoz, F. (1984). Modelo de la corteza terrestre en una zona aledaña al Municipio de Cumaral, departamento del Meta, Colombia. Trabajo de grado Univ. Nal de Colombia, Bogotá, p. 116.
- Campbell, C. J., Burgl, H. (1965). Section through de Eastern Cordillera of Colombial, S. A., A.A.P.G., Bull., Vol.76(5), pp. 567-589.
- Cardozo-Puentes, E., Forero-Onofre, H., Ramírez-Quiroga, C., Sarmiento-Rojas, L. (1987). Geología, estratigrafía y geoquímica de la plancha 208, Villeta. Informe interno Ingeominas, Bogotá, p. 60.
- Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa Mesozóica de la Cordillera Oriental. Bol. Geol. Ingeominas, Bogotá, Vol. 6(1-3), pp. 5-96.
- Conybeare, C. E. B. (1979). *Lithostratigraphic analysis of sedimentary basins*. Academic Press, New York, p. 555.

- Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, A.A.P.G. Bull., Vol. 79 (10), pp. 1421-1443.
- Cox, D. P. (1983). Mineral assesment of Colombia: Ore deposit models. U.S.G.S., Ingeominas. Open file report 83-423, Menlo Park, California, p. 71.
- Crawford, J., Hogland, A. D. (1968). The Mascot – Jefferson City Zinc District, Tennessee, Inc: Ridge, J.D. (Ed.), *Ore deposits of the United States*, 1933-1967, AIME, New York, pp. 242-250.
- Champetier de Ribes, G., Weecksteen, G., Quintero, R. (1961). Mapa geológico de la plancha K-10 Villeta. Escala 1:200.000. Serv. Geol. Nal., Bogotá.
- Escobar, R. (1979). Geología y geoquímica de las minas de esmeraldas de Gachalá, Cundinamarca. Bol. Geol. Ingeominas, Bogotá, Vol. 22(3), pp. 118-153.
- Etayo-Serna, F. (1964). Posición de las faunas en los depósitos cretácicos Colombianos y su valor en la subdivisión cronológica de los mismos. Bol. Geología Univ. Ind. Santander, Bucaramanga, Vol.16-17, pp. 1-142.
- Etayo-Serna, F. (1968). El Sistema Cretáceo en la región de Villa de Leiva y zonas próximas. Geología Colombiana, Bogotá, Vol. 5, pp. 5-74.
- Etayo-Serna, F. (1978). Ideas para la reinterpretación de ambientes de sedimentación del Sistema Cretáceo en la región de Villa de Leiva (Departamento de Boyacá), Colombia. II Congreso Colombiano de Geología, Bogotá, p. 19.
- Etayo, F., Renzoni, G., Barrero, D. (1976). Contornos sucesivos del mar Cretáceo de Colombia. Primer Congreso Colombiano de Geología, Memoria, Bogotá, pp. 217-252.
- Etayo-Serna, F., Barrero, D., Lozano, H., Espinosa, A., González, H., Orrego, A., Zambrano, F., Duque, H., Vargas, R., Núñez, A., Álvarez, J., Ropaín, C., Ballesteros, I., Cardozo, E., Forero, H., Galvis, N., Ramírez, C., Sarmiento, L. (1983). *Mapa de terrenos geológicos de Colombia*, Ingeominas Publicación Geológica Especial 14, Bogotá, p. 235.
- Fabre, A. (1981). Estratigrafía de la Sierra Nevada del Cocuy. Geología Norandina, Bogotá, Vol. 4, pp. 3-12.
- Fabre, A. (1983a). Geología de la extremidad sur de la Sierra Nevada del Cocuy y los alrededores de La Salina y Sacama. Plancha 153 Chita, Boyacá, Arauca y Casanare. Ingeominas Informe 1911, Bogotá, p. 250.
- Fabre, A. (1983b). La subsidencia de la Cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia) durante el Cretáceo y el Terciario Inferior. Primera parte: Estudio cuantitativo de la subsidencia. Geología Norandina, Bogotá, Vol. 8, pp. 49-61.
- Fabre, A. (1983c). La subsidencia de la Cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia) durante el Cretáceo y el Terciario Inferior. Segunda parte: Esquema de evolución tectónica. Geología Norandina, Bogotá, Vol. 8, pp. 21-27.
- Fabre, A., Delaloye, M. (1983). Intrusiones básicas Cretácicas de la Cordillera Oriental. Geología. Norandina, Bogotá, Vol. 6, pp. 19-28.
- Fabre A. (1985a). Dinámica de la sedimentación Cretácica en la región de la Sierra Nevada del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia). In: F. Etayo-Serna and F. Laverde-Montaña (eds.), *Proyecto Cretácico, contribuciones*. Chapter XIX, Ingeominas Publicación Geológica Especial 16, Bogotá, p. 20.
- Fabre, A. (1987). Tectonique et génération d'hydrocarbures: Un modèle de l'évolution de la Cordillère Orientale de Colombie et du Bassin des Llanos pendant le Crétacé et le Tertiaire. Arch. Sc. Genève, Vol. 40 (Fasc. 2), pp. 145-190.
- Finlow, B., Large, D.E. (1978). Water depth as a major control on the formation of submarine exhalative ore deposits. Geol. Jb., Hannover, Vol. D 30, pp. 27-39.
- Fisanne, C. (1881). La Galena de Tenza. Anales de instrucción pública, Bogotá, Tomo 2(8).

- Forero-Onofre, H., Sarmiento-Rojas, L. (1982). Ambiente de sedimentación del miembro arcillolitas abigarradas Formación Paja, área de Villa de Leiva. Trabajo de Grado, Univ. Nal. De Colombia, Bogotá, p. 187.
- Gansser, A. (1956). Ein Beitrag zur Geologie und Petrographie der Sierra Nevada de Santa Marta (Kolumbien, Sudamerika). *Min Petr. Mitt.*, Vol. 35(2), pp. 209-279.
- Gansser, A. (1963). Quartz Kristalle aus den Iolumbianischen Anden (Sudamerika). *Schweiz. Miner. Petro. Mitt.*, Vol. 43, pp. 91-103.
- Gansser, A. (1973). Facts and theories on the Andes. *Jour. Soc. London*. Vol. 129, pp. 93-131.
- García, M.-D. (1983). Estratigrafía de la unidad basal de la serie Cretáceo Inferior en la región de Villeta. Trabajo de Grado. Univ. Nal. De Colombia Bogotá, p. 40.
- Gil, E.E. (1976). Ocurrencias minerales en el Departamento de Cundinamarca. Ingeominas Informe 1708., Bogotá, p. 40.
- Goodfellow, W. D., Lydon, J. W., Turner, R. (1993). Geology and genesis of stratiform sediment-hosted (sedex) Zn-Pb-Ag sulphide deposits. *Geol. Soc. of Canada Special Paper 40*, pp. 201-251.
- Gustafson, L.B., Williams, N. (1981). Sediment-hosted stratiform deposits of copper, lead and zinc. *Economic Geology 75th Anniversary volume*, pp. 139-178.
- Hagni, R. D. (1976). Tri-State ore deposits: the character of their host rocks and their genesis. In: Wolfe, K. H., (Ed.). *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits*, Elsevier Amsterdam, Vol. 6, pp. 457-491.
- Heyl, A. V. (1968). The Upper Mississippi Valley Base Metal District. In: Ridge, J. D., (Ed.). *Ore deposits of the United States, 1933-1967*. AIME., New York, Vol. I, pp. 433-457.
- Ingeominas (1976). Mapa geológico de Colombia, escala 1:1.500.000, Bogotá.
- Ingeominas, U.S.G.S. (1983). Evaluación de los recursos minerales no combustibles de Colombia. Informe del Proyecto Cooperativo Ingeominas – U.S.G.S., Bogotá, p. 38.
- Julivert, M. (1958). Geología de la zona tabular entre San Gil y Chiquinquirá, Cordillera Oriental, Colombia. *Bol. Geol. Univ. Ind. Santander, Bucaramanga*, Vol. 2, pp. 33-45.
- Julivert, M. (1960). Geología de la vertiente W del Macizo de Santander en el sector de Bucaramanga. *Bol. Geol. Univ. Ind. Santander, Bucaramanga*, Vol. 3, pp. 15-33.
- Julivert, M. (1960). Geología de la región occidental de García Rovira (Cordillera Oriental de Colombia). *Bol. Geol. Univ. Ind. Santander, Bucaramanga*, Vol. 5, pp. 5-32.
- Julivert, M., (1961a). Las estructuras del Valle Medio del Magdalena y su significación. *Bol. Geol. Univ. Ind. Santander, Bucaramanga*, Vol. 6, pp. 33-52.
- Julivert, M. (1961). Geología de la vertiente W de la Cordillera Oriental en el sector de Bucaramanga. *Bol. Geol. Univ. Ind. Santander, Bucaramanga*, Vol. 6, pp. 39-42.
- Julivert, M. (1963a). Nuevos datos sobre la dinámica del ámbito del Macizo de Santander durante el secundario (Cordillera Oriental, Colombia). *Bol. Geol. Univ. Ind. Santander, Bucaramanga*, Vol. 12, pp. 45-49.
- Julivert, M. (1963b). Rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá, los mecanismos de formación de las estructuras. *Bol. Geol. Univ. Ind. Santander, Bucaramanga*, Vol. 13-14, pp. 1-104.
- Julivert, M. (1968). *Lexique Stratigraphique International*; vol. V, Fasc. 4^a. *Amerique Latine, Colombie (Premiere partie)*. Precambrien, Paleozoique, Mesozoique, Paris, p. 651.
- Julivert, M. (1970). Cover and basement tectonics in the Cordillera Oriental of Colombia South America, and comparison with some other folded chains. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, Vol. 81, pp. 3623-3646.

- Julivert, M., Tellez, N. (1963). Sobre la presencia de fallas de edad precretácica y post-Girón (Jura-Triásico) en el flanco W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). Bol. Geol. Univ. Ind. Santander, Bucaramanga, Vol. 12, pp. 5-18.
- Kuslansky, G. H. (1982). Petrographic descriptions of samples from Cenozoic and Mesozoic Formations, Middle and Upper Magdalena Valley, Colombia. Exploration Memo. Pennzoil Exploration and Production Company, Houston, p. 45.
- Large, D. E. (1980). Geological parameters associated with sediment-hosted submarine exhalative Pb-Zn deposits: An empirical model for mineral exploration. Geol. Jb. Hannover, Vol. D 40, pp. 59-129.
- Mariño, J. A. (1976). Ocurrencias minerales en el Departamento de Boyacá – Compilación. Ingeominas, Informe 1710, Bogotá, p. 41.
- McLaughlin, D. (1972). Evaporite deposits of Bogotá area, Cordillera Oriental, Colombia. A.A.P.G. Bull. Vol. 56(11), pp. 2240-2259.
- McLaughlin, D., Arce, M. (1972). Recursos minerales de parte de los Deptos. De Cundinamarca, Boyacá y Meta, Informe Ingeominas, Bogotá, p. 100.
- McLaughlin, D., Arce, M. (1975). Mapa geológico del Cuadrángulo Zipaquirá (K-11). Colombia. U.S. Geol. Surv. Ingeominas. Escala 1:100.000, Bogotá.
- Mendoza-Forero, H. (1981). Proyecto minerales metálicos Cordillera Oriental. Informe de progreso. Ingeominas Regional Bogotá. Informe interno, Bogotá, p. 14.
- Mendoza-Forero, H. (1981). Mineralizaciones estratoconfinadas de metales básicos en la Cordillera Oriental de Colombia. Tercer Congreso Colombiano de Geología, Resúmenes, Medellín, p. 52.
- Mendoza-Forero, H. (1983). Distribución y metalogénesis de los depósitos minerales de la Cordillera Oriental de Colombia, entre los 4° y 9° latitud norte. 10ª. Conferencia Geológica del Caribe, Cartagena, Resúmenes, p. 53.
- Morales, L. G., and the Colombian Petroleum Industry (1956). General geology and oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia. In: L. G. Weeks (ed.), Habitat of the Middle and Upper Magdalena basins, Colombia. *Oil - a symposium*, A.A.P.G., pp. 641-695.
- Moreno, J. M. (1990a). Stratigraphy of the Lower Cretaceous Rosablanca Formation, west flank, Eastern Cordillera, Colombia. Geología Colombiana, Bogotá, Vol. 17, pp. 65-86.
- Moreno, J. M. (1991). Provenance of the Lower Cretaceous sedimentary sequences, central part, Eastern Cordillera, Colombia. Revista Academia Colombiana Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Vol. 18(69), p. 159-173.
- Moreno, J. M., Concha, A.E. (1993). Nuevas manifestaciones ígneas básicas en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, Colombia. Geología Colombiana, Vol. 18, pp. 143-150.
- Mutis-Jurado, V. (1983). *Catálogo de los yacimientos, prospectos y manifestaciones minerales de Colombia*. Publicación Geológica Especial 13, Ingeominas Bogotá, p. 462.
- Naciones Unidas, Ingeominas. (1975). Proyecto de esmeraldas. Informe técnico final, Bogotá, p. 71.
- Olsson, A. (1956). Colombia. In: *Handbook of South America Geology*. Geol. Soc. Amer. Mem. 65, pp. 297-315.
- Otero, A.J. (1975). Ocurrencias minerales en el Departamento de Santander del Sur. Ingeominas, Informe 1686, Bucaramanga, p. 107.
- Polanía, J. H. y Rodríguez, O. G. (1978). Posibles turbiditas del Cretáceo Inferior (Miembro Socotá) en el área de Anapoima (Cundinamarca); una investigación sedimentológica basada en registros gráficos. Geología Colombiana, Bogotá, Vol. 10, pp. 87-91.
- Porta, J. (1965). La estratigrafía del Cretácico Superior y Terciario en el extremo S del Valle Medio del Magdalena. Univ. Industrial de Santander, Bucaramanga, Boletín Geológico Vol. 19, pp. 5-30.

- Pratt, S. (1961). The Muzo emerald mine. Geological field-trips Colombia, 1959-1978. Col. Soc. Petrol. Geol. Geoph, Bogotá, pp. 33-63.
- Renzoni, G. (1981). Geología del Cuadrángulo J-12, Tunja. Ingeominas Informe 1546 de 1967. Boletín Geológico, Ingeominas, Bogotá, Vol. 24(2), pp. 32-48.
- Rodríguez, E. (1993). Geología del Cuadrángulo J-10, La Palma. Mapa geológico escala 1.100.000, Ingeominas Bogotá.
- Rodríguez, C. Rojas, R. (1985). Estratigrafía y tectónica de la serie InfraCretácica en los alrededores de San Félix, Cordillera Central de Colombia. In: F. Etayo-Serna and F. Laverde-Montaña (eds.), *Proyecto Cretácico, contribuciones*. Chapter XXI, Ingeominas Publicación Geológica Especial 16, Bogotá, p. 21.
- Rodríguez, E. (1972). Ocurrencias minerales en los cuadrángulos J-11 Chiquinquirá, J-12 Tunja, J-13 Sogamoso y parte del J-10 La Palma y del K-10 Villeta. Ingeominas Informe 1617. Bogotá, 50 p.
- Rubiano, J. L. (1989). Petrography and stratigraphy of the Villeta Group, Cordillera Oriental, Colombia, South America. M.Sc. Thesis, Univ. South Carolina, Columbia, SC., p. 96.
- Sangster, D.F. (1976a). Carbonate-hosted lead-zinc deposits. In: Wolfe, K. H: (Ed.). *Handbook of stratabound and stratiform ore deposits*. Elsevier, Amsterdam, Vol. 6, pp. 447-454.
- Sangster, D.F. (1976b). Sulphur and lead isotopes in stratabound and stratiform ore deposits. In: Wolfe, K. H: (Ed.). *Handbook of stratabound and stratiform ore deposits*. Elsevier, Amsterdam, Vol. 2, p. 219-266.
- Sarmiento, L. F. (1987a). Minerales de plomo. En: Villegas, A. (ed.), *Recursos minerales de Colombia*. Publ. Geol. Especial 1, Ingeominas, 2ª edición. Tomo 1 Minerales preciosos, Minerales metálicos, Bogotá, pp. 369-443.
- Sarmiento, L. F. (1987b). Minerales de zinc. En: Villegas, A. (ed.), *Recursos minerales de Colombia*. Publ. Geol. Especial 1, Ingeominas, 2ª edición. Tomo 1 Minerales preciosos, Minerales metálicos, Bogotá, pp. 490-563.
- Sarmiento, L. F. (1989). Stratigraphy of the Cordillera Oriental west of Bogotá, Colombia. M.Sc. Thesis University of South Carolina, Columbia, SC., p. 102.
- Sarmiento, L. F. (2001). Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. Inferences from tectonic models. Ph.D. Thesis Vrije Universiteit, Amsterdam, p. 330.
- Sarmiento-Rojas, L., Forero-Onofre, H., Cardozo-Puentes, E., Ramírez-Quiroga, C. (1985). Importancia de la estratigrafía en la evaluación de anomalías geoquímicas: caso del área del río Zumbe, Útica (Cundinamarca). In: F. Etayo-Serna, F. and Laverde-Montaña (Eds.), *Proyecto Cretácico, contribuciones*. Publ. Geol. Especial 16, Ingeominas, Capitulo XXVIII, pp. 5-10.
- Sawkins, F. J. (1976). Metal deposits related to intracontinental hotspot rifting environments. *Jour. of Geol.* Vol. 84(76), pp. 653-672.
- Segovia, A., Renzoni, G. (1966). Geología del Cuadrángulo L-12, Medina. Servicio Geológico e Inventario Minero Nacional, Mapa geológico escala 1:200.000, Bogotá.
- Snyder, F.G. (1968). Geology and mineral deposits. Midcontinent United States. In: Ridge, J.D., (Ed.). *Ore deposits of the United States, 1933-1967*. AIME., New York, Vol. 1, pp. 270-286.
- Taborda, A. B. (1965). Guidebook to the geology of the Mares Concession. Field-trip 1965. Colomb. Soc. Petrol. Geol. Geoph., Bogotá, p. 25.
- Trumpy, D. (1943). Pre-Cretaceous of Colombia. *Geol. Soc. Amer. Bull.* Vol. 54, pp. 1281-1304.
- Ulloa, C. (1973). Geología del Cuadrángulo J-13, Sogamoso. Mapa geológico escala 1:100.000, Ingeominas, Bogotá.
- Ulloa, C. (1980). Ambiente geológico de los yacimientos esmeraldíferos en Colombia. *Bol. Soc. Geol. Perú*, Vol. 65, pp. 157-170.

- Ulloa, C., (in prep). Mapa de compilación de los cuadrángulos geológicos de la parte central de la Cordillera Oriental. Escala 1: 500.000. Ingeominas, Bogotá.
- Ulloa, C., Rodríguez, E. (1976a). Geología del cuadrángulo K-12, Guateque. Boletín Geológico, Ingeominas, Bogotá, Vol. 22(1), pp. 4-55.
- Ulloa, C., Rodríguez, E. (1976b). Mapa geológico Cuadrángulo K-13. Tauramena . Cuenca de los Farallones. Escala 1:100.000, Ingeominas, Bogotá.
- Ulloa, C., Rodríguez, E. (1979a). Geología de las planchas 170 Vélez y 190 Chiquinquirá, Colombia. Ingeominas Informe 1794, Sogamoso, p. 45.
- Ulloa, C., Rodríguez, E. (1979b). Geología del Cuadrángulo K-13, Tauramena. Boletín Geológico, Ingeominas, Bogotá, Vol. 24(2), pp. 3-30.
- Ulloa, C., Rodríguez, E. (1987). Mapa geológico de la plancha 190, Chiquinquirá, Mapa escala 1:100.000, Ingeominas, Bogotá.
- Ulloa, C., Rodríguez, E. (1991). Mapa geológico de Colombia, plancha 190-Chiquinquira (Departamento de Boyacá), Escala 1:100.000, Ingeominas, Santafé de Bogotá, p. 26.
- Ulloa, C., Rodríguez, E., Guerra, A. (1973). Mapa geológico de la plancha 172 Paz de Río. Escala 1:100.000, Ingeominas Bogotá.
- Ulloa, C., Camacho, R., Escobar, R. (1975). Mapa Geológico de la Plancha K-12 de Guateque: Ingeominas, Esc 1:100.000, Bogotá.
- Ulloa, C., Escobar, R., Pacheco, A. (1976). Mapa Geológico de la Plancha 230 de Monterrey: Ingeominas, Esc 1:100.000, Bogotá.
- Vargas, R., Arias, L., Jaramillo, L., Tellez, N. (1984a). Geología del cuadrángulo I-13, Malaga, Boletín Geológico Ingeominas, Bogotá, Vol. 24(3), pp. 1.76.
- Vargas, R., Arias, L., Jaramillo, L., Tellez, N. (1984b). Mapa geológico preliminar de la plancha 136, Málaga, Escala 1:100.000, Ingeominas, Bogotá.
- Villamil, T. (1994). High-resolution stratigraphy, chronology and relative sea level of the Albian-Santonian (Cretaceous) of Colombia. Ph.D. Thesis Univ. Of Colorado at Boulder, p. 446.
- Villamil, T., Arango, C. (1998). Integrated stratigraphy of latest Cenomanian and early Turonian facies of Colombia. Paleogeographic evolution and non-glacial eustasy, Northern South America, SEPM Spec. Publ. 58, pp. 129-159.
- Ward, D., Golsmith, R., Cruz, J., Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Depto. de Santander. Boletín Geológico Ingeominas, Bogotá, Vol 21 (1-3), pp. 1-132.
- Wokittel, R. (1960). Recursos minerales de Colombia. Comp. Est. Geol. Oficial. Colombia, Bogotá, Vol. 10, p. 393.

Trabajo recibido: septiembre 19 de 2001

Trabajo aceptado: Enero 30 de 2002