

CLASIFICACIÓN QUÍMICA Y GEOTERMOMETRÍA DE LAS CLORITAS DE LAS FORMACIONES CRETÁICAS SANTA ROSA Y LUTITAS DE MACANAL, CINTURÓN ESMERALDÍFERO ORIENTAL, CORDILLERA ORIENTAL, COLOMBIA.

Alejandro Silva Arias¹; Luis Carlos Mantilla Figueroa¹; Roberto Terraza Melo²

RESUMEN.

El estudio de la composición química de las cloritas de las Formaciones Santa Rosa y Lutitas de Macanal en el Cinturón Esmeraldífero Oriental (Cordillera Oriental), es usado para estimar la temperatura de formación de estos minerales y de los fluidos hidrotermales asociados. Las cloritas analizadas fueron clasificadas según las propuestas de Hey (1954), Foster (1962), y Bailey (1980); y la temperatura de formación se calculó a partir de los geotermómetros empíricos de Kranidiotis and MacLean (1987), Cathelineau (1988), Jowett (1991) y Xie *et al.* (1997). Las cloritas en rocas con alteración hidrotermal asociadas a mineralizaciones esmeraldíferas de la Formación Santa Rosa se clasifican como clinocloros y se forman a temperaturas de ~354°C, esta temperatura es consistente con la medida en inclusiones fluidas en esmeraldas de la misma Formación. Las cloritas de venas en la Formación Lutitas de Macanal se clasifican como chamositas y se forman a temperaturas menores de entre 210-225°C.

Palabras claves: Cordillera Oriental, Cloritas, Cinturón Esmeraldífero Oriental, Geotermometría.

CHEMICAL CLASSIFICATION AND GEOTERMOMETRY OF CHLORITES FROM THE CRETACEOUS SANTA ROSA AND LUTITAS DE MACANAL FORMATIONS, EASTERN EMERALD BELT, EASTERN CORDILLERA, COLOMBIA.

ABSTRACT.

The study of the chemical composition of chlorites from the Santa Rosa and Lutitas de Macanal Formations in the Eastern Emerald Belt (Eastern Cordillera), are used to estimate the formation temperature of these minerals and the associated hydrothermal fluids. The chlorites were analyzed using the classification proposed by Hey (1954), Foster (1962), and Bailey (1980); and the formation temperature is calculated from empirical geothermometers from Kranidiotis and MacLean (1987), Cathelineau (1988), Jowett (1991) and Xie *et al.* (1997). Chlorites in hydrothermally altered rocks associated with emerald mineralization of the Santa Rosa Formation is classified as clinocllore and formed at temperatures of ~354°C, this temperature is consistent with the fluid inclusions in emeralds of the same formation. Chlorites in veins from Lutitas de Macanal Formation are classified as chamosites and formed at lower temperatures between 210-225°C.

Key words: Eastern Cordillera, Chlorites, Eastern Emerald Belt, Geotermometry.

¹ Escuela de Geología. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia. A.A. 678. alejosilvaarias@hotmail.com, lcmantill@uis.edu.co

² Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), Bogotá

INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO.

Las características composiciones de la clorita tienen el potencial de almacenar información valiosa de las condiciones físico-químicas bajo las cuales se forma. Por este motivo, la composición química y la clasificación de las cloritas de Formaciones con y sin mineralización esmeradífera, hace posible estimar la temperatura de formación de estos minerales que al ser comparada con otros métodos geotermométricos aporta nueva información de los procesos de condicionan la formación de las esmeraldas.

El área de estudio se localiza en el Cinturón Esmeraldífero Oriental (Cordillera Oriental, Colombia) (Figura 1) en donde afloran rocas sedimentarias de edad cretácico inferior agrupadas dentro del Grupo Cáqueza, más específicamente relacionadas con las Formaciones Santa

Rosa y Lutitas de Macanal (Figura 2). Según estudios recientes del INGEOMINAS (Terraza *et al.*, 2008), se define a la Formación (Fm.) Santa Rosa (de edad berriasiana) como una secuencia que inicia de base a techo con conglomerados basales de hasta 1 m de espesor, sobre el cual reposan unos 30 m de arenisca de grano fino a medio en capas medianas a gruesas y luego un paquete grueso de arcillolita (calcárea en su parte baja) de hasta 250 m de espesor que hospeda las mineralizaciones hidrotermales de esmeraldas. La Fm. Lutitas de Macanal (de edad valangoniana) está constituida hacia la base por arcillolitas grises en capas medias a delgadas, las cuales dan paso a un paquete intermedio de arcillolitas con frecuentes intercalaciones de areniscas y termina hacia el tope con un paquete de arcillolitas con intercalaciones de niveles de areniscas y limolitas. Información más detallada relacionada con la geología y estratigrafía del área de estudio se presenta en Terraza *et al.*, (2008), Mantilla *et al.*, (2008) y Ortegón (2008).

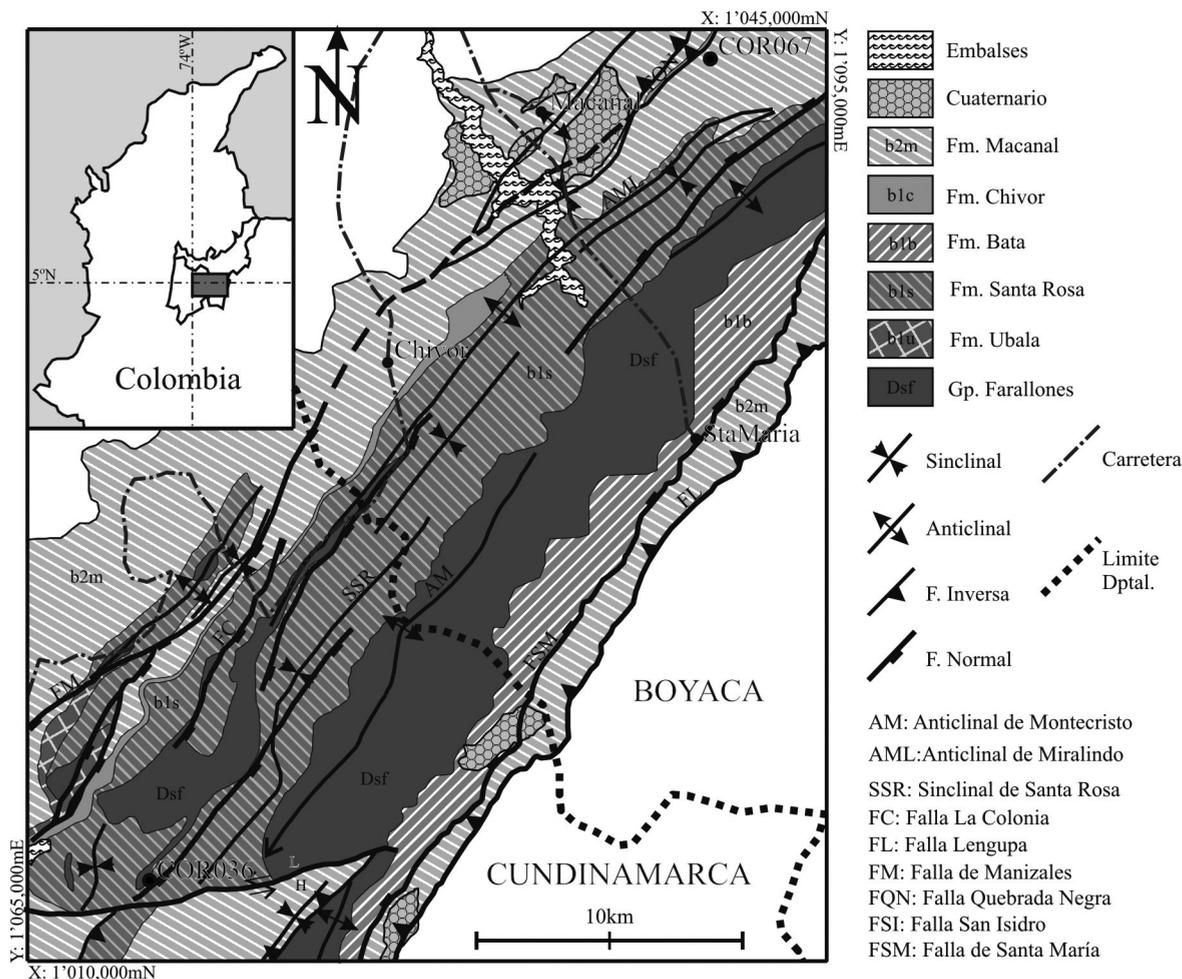


FIGURA 1. Localización del área de estudio. Modificado de Terraza *et al.* (2008).

Ma	Era	Periodo	Edad	Cinturón Esmeraldífero Oriental			
				Sector W	Sector Central	Sector E	
108	Mesozoico	Cretácico	Albiano	Fm. Fόμεque			
113			Aptiano				
117			Barremiano				
123			Hauteriviano	Fm. Las Juntas	Fm. Las Juntas	Fm. Las Juntas	
131			Valanginian o	Gp. Cáqueza	Fm. Lutitas de Macanal	Gp. Cáqueza	Fm. Lutitas de Macanal
	Berriasiano		Fm. Ubalá		Fm. Chivor		Fm. Batá
135					Fm. Sta. Rosa		
355	Paleozoico	Carbonífero	Gp. Farallones				
410		Devónico					

FIGURA 2. Columna estratigráfica generalizada del área de estudio. Modificado de Terraza *et al.* (2008).

METODOLOGÍA.

A partir de una intensiva actividad de campo en el Cinturón Esmeraldífero Oriental y de la elaboración de secciones delgadas pulidas de las muestras colectadas para su análisis petrográfico, se seleccionaron secciones con cloritas de dos sectores. Estos son: A) Sector minero de Gachalá (Municipio de Gachalá, Dpto. de Cundinamarca) en el área de las minas Las Cruces y El Diamante (X:1°013,030mN, Y:1°069,586mE) en donde la clorita aparece en rocas de la Fm. Santa Rosa y, B) Quebrada Trabajos (Municipio de Macanal, Dpto. de Boyacá) dentro del área de explotación de la empresa Aguablanca Grande (X:1°043,889mN, Y:1°090,633mE) en donde la clorita aparece en rocas de la Fm. Lutitas de Macanal (Figura 1). Con el objeto de determinar la composición química y establecer diferencias composicionales de las cloritas de las Formaciones seleccionadas, se realizaron análisis de microsonda electrónica que fueron realizados en el *UCLEMA Laboratory (Laboratory for Electron Microbeam Analysis, Dept. of Geology and Geophysics, Calgary University, Alberta, Canadá)*, usando un analizador *JEOL JXA-8200*, el cual cuenta con cinco espectrómetros tipo WDS (*wavelength-dispersive spectrometers*) y un espectrómetro tipo EDS (*energy dispersive spectrometer*). Una vez obtenidos los análisis de química mineral de las cloritas, se realizó el recálculo de éstos

sobre la base de 28 átomos de oxígeno equivalentes por unidad de fórmula (apfu, *atoms per formula unit*). Este recálculo se efectuó mediante el programa de ordenador *MINPET Geological Software V.2.0*. Para la clasificación de las cloritas se utilizaron las propuestas de Hey (1954), Foster (1962) y Bailey (1980). Finalmente se calculó la temperatura de formación de las cloritas por medio de geotermómetros empíricos, como los de Kranidiotis and MacLean (1987), Cathelineau (1988), Jowett (1991) y Xie *et al.* (1997).

RESULTADOS

En la Fm. Santa Rosa se muestreó un nivel de lodolita blanca alterada hidrotermalmente por procesos de albitización-dolomitización, en donde aparece clorita de aspecto tabular, diseminada o en agregados radiales (Figura 3). Este nivel, está asociado a la secuencia hospedadora de la mineralización esmeraldífera. En la Fm. Lutitas de Macanal, se muestreó un paquete de arcillolitas laminadas carbonosas que presentan: A) Venas de pirita+carbonatos (dolomita-calcita)+clorita (de aspecto vermicular y formando un agregado tabular en el contacto vena-roca caja) (Figura 4A), y B) Venas de carbonatos (dolomita-calcita-ankerita)+pirita+clorita (de aspecto vermicular, en agregados fibrosos hacia el contacto vena-roca caja) (Figura 4B).

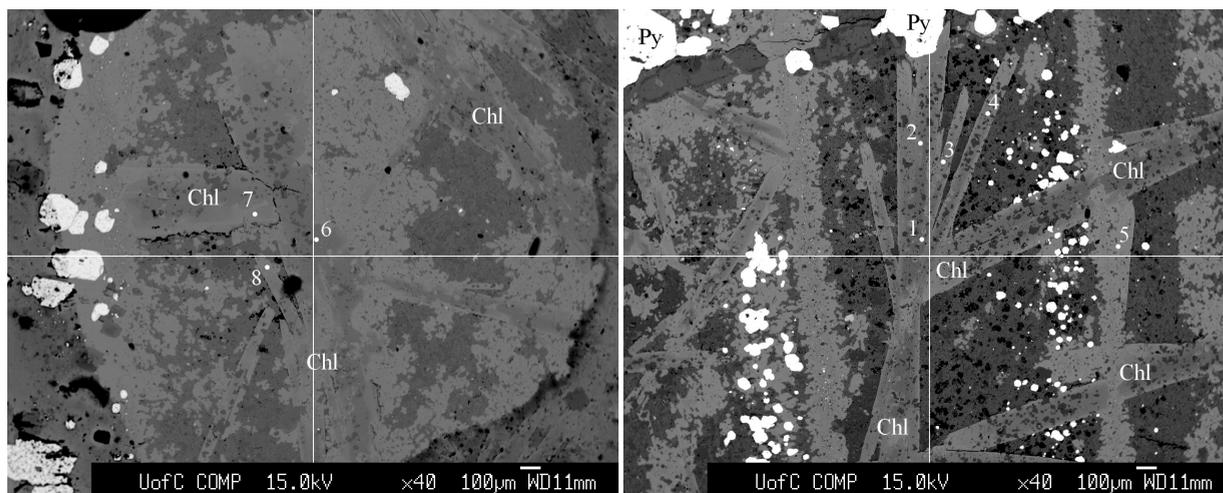


FIGURA 3. Aspecto de las cloritas presentes en la Fm. Santa Rosa con los puntos de análisis (imagen de electrones retrodispersados).

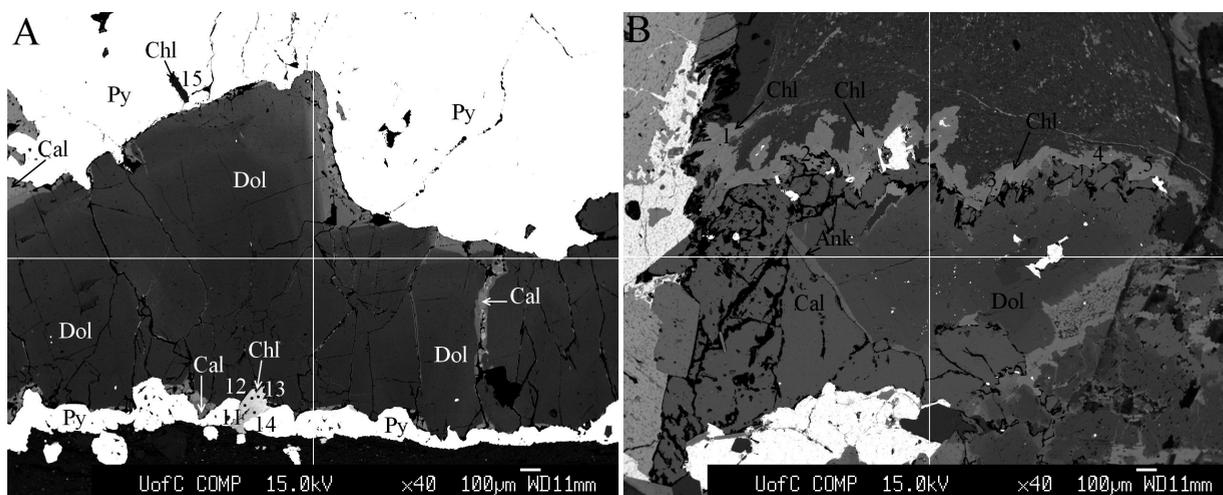


FIGURA 4. Aspecto de las cloritas presentes en la Fm. Macanal: A) Vena I (pirita+carbonato+clorita) y B) Vena II (carbonato+pirita+clorita), adicionalmente se indican los puntos analizados (imagen de electrones retrodispersados).

Análisis de química mineral

En la Tabla 1 se presentan los resultados de química mineral obtenidos mediante análisis de microsonda electrónica de las cloritas de las Formaciones Santa Rosa y Lutitas de Macanal. Todas las cloritas analizadas muestran una sumatoria $2Ca+Na+K < 0,05$ apfu (14 átomos de oxígeno equivalentes), lo cual indica que se tratan de cloritas puras y libres de interestratificados (De Caritat *et al.*, 1993).

Las clasificaciones de Hey (1954) y Foster (1962) se basan principalmente en dos parámetros, la tasa Fe^{2+}/R^{2+} y la sustitución Si-Al en el sitio tetrahedral (Cathelineau

and Nievas, 1985). Según Hey (1954) (relación Fe^{2+} vs. Si) las cloritas de la Fm. Santa Rosa y las cloritas de la vena de pirita+carbonato+clorita (vena I) de la Fm. Lutitas de Macanal se pueden clasificar como ripidolitas mientras que en la vena de carbonato+pirita+clorita (vena II) de la Fm. Lutitas de Macanal aparecen tres tipos de clorita: daphnita, pseudo-thuringita y ripidolita. La clasificación de cloritas según Foster (1962) se basa en la relación $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg^{2+})$ vs. Si, según esta relación la mayoría de las cloritas se pueden clasificar como ripidolitas, excepto en dos cristales de la Fm. Lutitas de Macanal (vena II) que se clasifican como thuringitas y un cristal de clorita de la Fm. Santa Rosa que se clasifica como brunsvigita.

TABLA 1. Resultados de química mineral en cloritas (óxidos en wt%- porcentaje en peso) y resultados recalculados (cationes en apfu).

% en peso Fm.	Análisis									
	Lutitas de Macanal									
	11	12	13	14	15	1	2	3	4	5
SiO ₂	23,29	23,04	22,87	23,32	23,32	21,14	23,72	22,51	20,81	23,04
Al ₂ O ₃	23,16	22,76	21,83	22,04	22,03	19,14	21,14	22,16	20,97	21,56
TiO ₂	0,01	0,02	0,02	0,04	0,00	0,04	0,04	0,03	5,19	0,02
FeO	33,62	34,59	34,44	35,15	35,25	37,46	34,61	35,73	32,48	35,78
MnO	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06
MgO	7,79	7,04	6,62	6,53	6,57	6,12	7,66	6,37	7,03	6,72
CaO	0,11	0,04	0,09	0,03	0,06	0,11	0,09	0,07	0,13	0,04
Na ₂ O	0,00				0,01			0,01		
K ₂ O	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
ZnO	0,02	0,09	0,01	0,09	0,00	0,05	0,01	0,04	0,06	0,21
Cr ₂ O ₃	0,00							0,01	0,02	
H ₂ O calc	10,91	10,78	10,54	10,69	10,70	10,00	10,73	10,60	10,65	10,65
Total	98,96	98,42	96,48	97,94	98,02	94,11	98,05	97,61	97,42	98,10
Σ cationes	19.852	19.862	19.847	19.832	19.849	20.184	19.889	19.919	19.607	19.905
<i>Fórmula estructural basada en 28 O equivalentes (átomos por unidad de fórmula, apfu)</i>										
Si	5,12	5,12	5,20	5,23	5,22	5,02	5,30	5,09	4,68	5,18
Al	6,00	5,96	5,85	5,82	5,82	5,36	5,56	5,91	5,56	5,72
Ti ⁴⁺	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,88	0,00
Fe ⁺³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ²⁺	6,18	6,43	6,55	6,59	6,60	6,93	6,46	6,76	6,11	6,73
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Mg	2,55	2,33	2,24	2,18	2,19	2,17	2,55	2,15	2,36	2,25
Ca	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Zn	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,03
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OH	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
Fe ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,06	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	33,62	34,59	34,44	35,15	35,25	34,89	34,61	35,73	32,48	35,78
Total corregido	98,96	98,42	96,48	97,94	98,02	94,61	98,05	97,61	97,42	98,10

El contenido de H₂O se calculó como el necesario para dar 16 (OH) en la fórmula estructural.

Los contenidos de Fe²⁺ y Fe³⁺ se calcularon siguiendo el método de Droop (1987).

El total corregido incluye el Fe calculado como FeO y Fe₂O₃.

Bailey (1980) clasifica genéticamente las cloritas por medio del contenido de Al^{IV} vs. Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg²⁺), de acuerdo con esta clasificación las cloritas analizadas de las dos Formaciones se clasifican como cloritas metamórficas IIb que son cloritas de temperaturas elevadas similares a las presentadas durante procesos

metamórficos de bajo grado (200-320°C), en el caso de las cloritas listonadas en rocas alteradas hidrotermalmente por procesos de albitización-dolomitización de la Fm. Santa Rosa pertenecen a la variedad clinocloro IIb y las cloritas de venas (I y II) de la Fm. Lutitas de Macanal son de la variedad chamosita IIb (Figura 5).

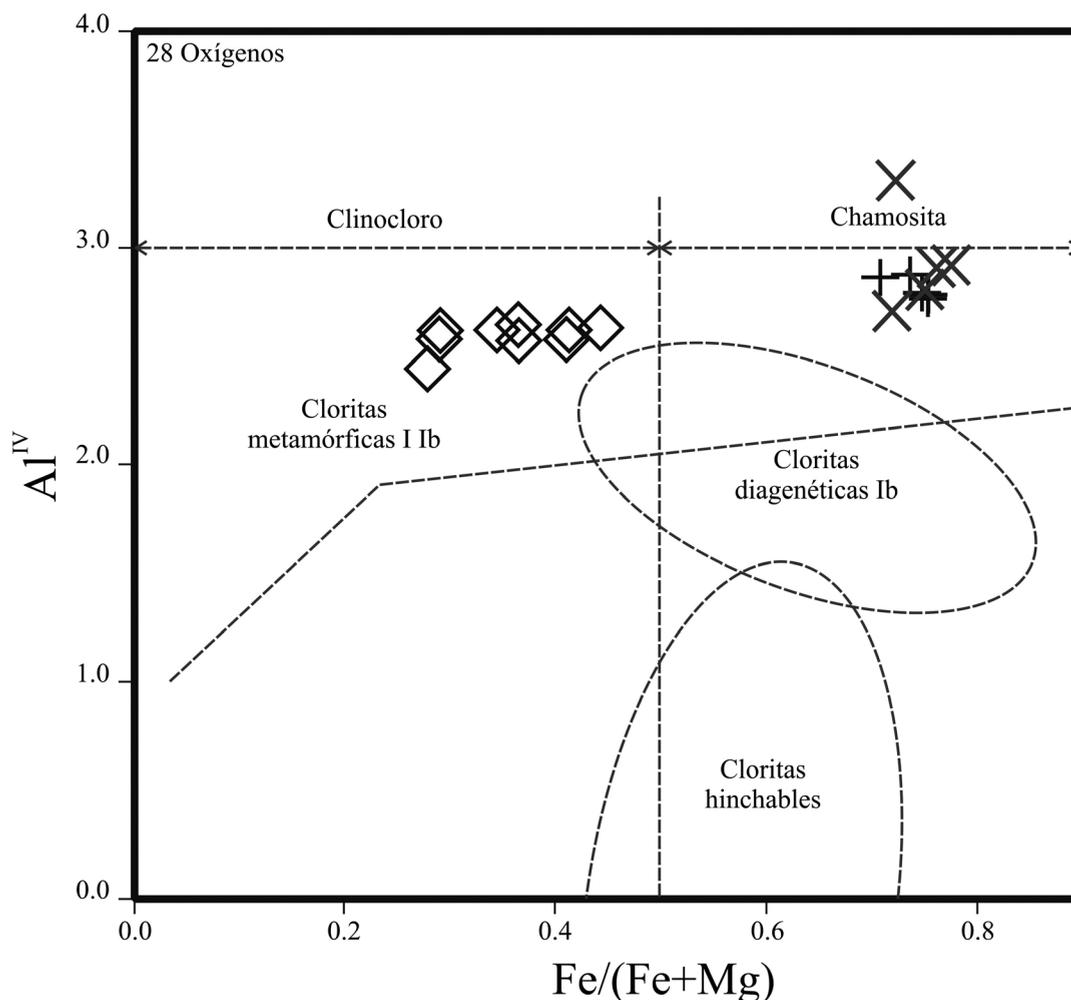


FIGURA 5. Clasificación genética de cloritas, según Bailey (1980). Fm. Lutitas de Macanal (+) Vena tipo I y (x) Vena tipo II, Fm. Santa Rosa (◊).

Geotermometría de cloritas

Consideraciones preliminares

En términos generales, la clorita es un filosilicato que muestra un amplio rango de composiciones y presenta una fórmula cristaloquímica general definida mediante la siguiente fórmula: $(R_u^{2+} R_y^{3+} \square_z)^{VI} (Si_{4-x} Al_x)^{IV} O_{10+w} (OH)_{8-w}$; en donde $u + y + z = 6$, $z = (y - w - x)/2$, w generalmente es cero (0) o un número pequeño, R^{2+} representa Mg^{2+} o Fe^{2+} , R^{3+} generalmente representa Al^{3+} o Fe^{3+} , y \square representa vacancias estructurales (De Caritat *et al.*, 1993). Algunos de los geotermómetros propuestos se fundamentan en el número de vacancias octaédricas (\square), Al^{IV} y X_{Fe} , entre otros aspectos (Cathelineau and Nieva, 1985; Cathelineau, 1988; Kranidiotis and MacLean, 1987; Jowett, 1991; Zang and Fyfe, 1995; Xie *et al.*, 1997). Sin embargo, la composición química

de la clorita no sólo depende de la temperatura a la cual se forma, sino de otros factores como la composición química de la roca original, la paragénesis mineral e incluso la existencia de interestratificados que modifican las temperaturas obtenidas. El uso de la composición química de la clorita para estimar la temperatura de formación es un procedimiento efectivo, sobre la base de que algunos principios básicos sean observados, principalmente: a) Consistencia entre los datos químicos de las cloritas estudiadas y aquellos de las cloritas usadas en la calibración de los geotermómetros, b) Correlación entre la relación X_{Fe} y el contenido de Al^{IV} ; y c) Los resultados sean comparados con estimaciones de temperatura independientes (a partir de otros métodos) (Klein *et al.*, 2007).

Para el cálculo de la temperatura (T, °C) de formación de las cloritas, se utilizaron en el presente estudio los siguientes geotermómetros empíricos: Kranidiotis and MacLean (1987): $T = 106[(Al^{IV} + 0,7X_{Fe})] + 18$ (mejores resultados cuando $X_{Fe} > 0,74$); Cathelineau (1988): $T = -61,92 + 321,98Al^{IV}$; Jowett (1991): $T = 319(Al^{IV} + 0,1X_{Fe}) - 69$ (Si $X_{Fe} < 0,6$); y Xie *et al.* (1997): $T = 321,98[Al^{IV} - 1,33(X_{Fe} - 0,31)] - 61,92$ (Si $X_{Fe} > 0,31$) o $T = 321,98[Al^{IV} + 1,33(0,31 - X_{Fe})] - 61,92$ (Si $X_{Fe} < 0,31$).

Datos de temperatura obtenidos

Los parámetros que permiten calcular la temperatura de formación, junto con las temperaturas estimadas empleando los diversos geotermómetros se presentan en la tabla 2. En el caso de la chamosita de la Fm. Lutitas de Macanal no se usó el geotermómetro de Jowett (1991) debido a que presentan valores de $X_{Fe} > 0,6$.

TABLA 2. Temperaturas de formación de cloritas de las Formaciones Santa Rosa y Lutitas de Macanal.

Fm.	Tipo	Clasificación	Análisis	Si	Al ^{IV}	Fe ²⁺	Mg	X _{Fe}	KM '87	C '88	J '91
Lutitas de Macanal	Vena I: pirita+carbonato +clorita	chamosita IIb	11	2,57	1,44	3,08	1,27	0,71	223	400	
			12	2,56	1,44	3,22	1,17	0,73	225	401	
			13	2,60	1,40	3,27	1,12	0,75	222	389	
			14	2,61	1,39	3,30	1,09	0,75	221	384	
			15	2,61	1,39	3,30	1,10	0,75	221	385	
	Vena II: carbonato+pirita +clorita	chamosita Iib	2	2,65	1,35	3,23	1,28	0,72	215	373	
			5	2,60	1,41	3,37	1,13	0,75	223	390	
			3	2,55	1,45	3,38	1,07	0,76	228	406	
			1	2,53	1,47	3,76	1,09	0,77	231	410	
			4	2,34	1,66	3,06	1,18	0,72	247	472	
Santa Rosa	Clorita diseminada en rocas alteradas hidrotermalmente	clinocloro IIb	1	2,78	1,22	1,31	3,43	0,28	168	331	329
			2	2,70	1,30	1,60	3,09	0,34	182	358	358
			3	2,68	1,32	1,68	2,97	0,36	185	363	363
			4	2,71	1,29	1,69	2,97	0,36	181	352	353
			5	2,69	1,31	2,07	2,63	0,44	190	360	363
			6	2,71	1,29	1,34	3,33	0,29	176	353	352
			7	2,70	1,31	1,35	3,33	0,29	178	358	356
			8	2,72	1,28	1,90	2,76	0,41	184	350	353
			9	2,70	1,30	1,93	2,79	0,41	187	358	360

Con el fin de procesar los datos de temperatura de las cloritas analizadas (Tabla 2) y reportar un rango más preciso para la temperatura de formación, se confrontó su composición química con las cloritas reportadas por De Caritat *et al.* (1993), quienes presentan una comparación entre la temperatura calculada mediante geotermómetros empíricos, con la temperatura medida directamente o estimada mediante otras técnicas, para cada una de las clorita usadas en la calibración de los geotermómetros empíricos. En la Tabla 3 se presenta la composición química, clasificación y temperatura de formación (medida y calculada por geotermómetros empíricos) de las cloritas analizadas por De Caritat *et al.* (1993).

Analizando la información de la tabla 3, se establece que para el clinocloro (análisis LA9) los geotermómetros de Cathelineau (1988) y Jowett (1991) aportan las temperaturas más cercanas a la temperatura medida, para la chamosita (análisis ON5, VF4) el geotermómetro con temperaturas más cercanas a las medidas es el Xie *et al.* (1997). Al correlacionar la composición química de las cloritas analizadas por De Caritat *et al.* (1993), con las cloritas de las Formaciones Santa Rosa y Lutitas de Macanal presentadas en este artículo, se decidió emplear los geotermómetros con las temperaturas más cercanas a las medidas para cada tipo de clorita.

TABLA 3. Composición química, clasificación y temperatura de formación de cloritas del artículo de De Caritat *et al.* (1993).

Composición química de cloritas									
Ubicación	Análisis	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO		
Offshore Norway	ON5	24,75		23,53	35,77		3,95		
Venture field	VF4	23,71	0,38	22,04	33,07	0,28	4,84		
Broadlands-Ohaaki	BO1	23,03		20,71	37,17	3,03	3,63		
Los Azufres, México	LA9	28,56		18,73	20,54	0,23	19,96		
Recalculo con base en 14 oxígenos									
Análisis	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Fe ²⁺	Cr	Mn	Mg	Ca
ON5	2,73	1,27	1,79		3,30			0,65	
VF4	2,71	1,29	1,68	0,03	3,16		0,03	0,83	0,02
BO1	2,65	1,35	1,45		3,57		0,30	0,62	
LA9	2,91	1,09	1,16		1,75		0,02	3,03	
Clasificación química de cloritas									
Análisis	Hey (1985)			Foster (1962)			Bailey (1980)		
ON5									
VF4	Ripidolita			Thuringita			Chamosita metamórfica I		
BO1									
LA9	Pycnoclorita			Brunsvigita			Clinocloro metamórfico I		
Geotermómetro de cloritas									
Análisis	T°C (medida)			T°C (KM '87)		T°C (C '88)		T°C (J '91)	
ON5	155			215		347			
VF4	140			214		354			
BO1	290			224		373			
LA9	310			161		289		290	

De esta manera, los clinocloros de la Fm. Santa Rosa diseminadas en rocas alteradas hidrotermalmente debieron formarse a temperaturas promedio de 353.7 o 354.1°C, tal como lo indican los geotermómetros de Cathelineau (1988) y Jowett (1991), respectivamente (Tabla 2). Este rango de temperatura es comparable con la temperatura de 334.9°C (Temperatura de fusión de halita, Tpf), obtenida mediante análisis de microtermometría en inclusiones fluidas (IF) polifásicas primarias en esmeraldas de la Fm. Santa Rosa (Mantilla *et al.*, 2008).

En el caso de la Fm. Lutitas de Macanal la temperatura de formación promedio de las chamositas en venas de pirita+carbonato+clorita es de 208.6°C, mientras que la temperatura de formación promedio de las chamositas en venas de carbonato+pirita+clorita es de 224.4°C de acuerdo con el geotermómetro Xie *et al.* (1997) (Tabla 2). Los análisis de geotermometría en IF primarias polifásicas en calcita de esta Formación no fueron satisfactorios por decrepitación de las inclusiones. Las venas de carbonato+pirita+clorita se forman a una temperatura mayor que las venas de pirita+carbonato+clorita.

CONCLUSIONES

Las cloritas presentes en venas de la Fm. Lutitas de Macanal se clasifican como chamositas, mientras que aquellas cloritas de zonas de alteración hidrotermal (albitización-dolomitización) asociadas a mineralizaciones esmeraldíferas en la Fm. Santa Rosa se clasifican como clinocloros. Genéticamente ambos tipos de cloritas son de tipo metamórfico IIb (formadas en condiciones de muy bajo grado de metamorfismo) según la clasificación de Bailey (1980).

Los clinocloros diseminados en la zona de alteración hidrotermal (albitización-dolomitización) asociadas a mineralizaciones esmeraldíferas de la Fm. Santa Rosa se formaron a una temperatura de 353.7-354.1°C, tal como lo indican los geotermómetros de Cathelineau (1988) y Jowett (1991). Esta temperatura es cercana a la temperatura de 334.9°C (Tfh) obtenida mediante microtermometría de IF en esmeraldas de la Fm. Santa Rosa (Mantilla *et al.*, 2008). Las chamositas de la Fm. Lutitas de Macanal en venas de pirita+carbonato+clorita se formaron a 208.6°C,

mientras que la temperatura de formación de aquellas en venas de carbonato+pirita+clorita es de 224.4°C, de acuerdo con el geotermómetro Xie *et al.* (1997).

Las temperaturas obtenidas mediante la utilización de geotermómetros empíricos cuando se tiene en cuenta la composición y clasificación de las cloritas para las cuales fueron calibrados aportan temperaturas cercanas a las temperaturas medidas directamente o calculadas mediante otros métodos, tal es el caso de los clinocloros de la Fm. Santa Rosa cuya temperatura estimada mediante la composición de la clorita es muy cercana a la temperatura de las IF en esmeraldas de la misma formación. Teniendo en cuenta este comportamiento, la temperatura estimada para las chamositas de la Fm. Lutitas de Macanal pueden reflejar la temperatura de los fluidos hidrotermales que las formaron.

Los fluidos hidrotermales que generan zonas de alteración hidrotermal de tipo albitización-dolomitización asociados a las mineralizaciones esmeraldíferas en la Fm. Santa Rosa con clinocloros (Iib) tabulares diseminados o en agregados radiales son de mayor temperatura (~335-355°C), que aquellos fluidos hidrotermales formadores de venas estériles con chamosita (~210-225°C) en formaciones estratigráficamente superiores.

AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento al Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) y a la Universidad Industrial de Santander (UIS), por el apoyo técnico, económico y científico, a través del proyecto titulado “Estudio de los procesos de interacción fluido-roca en el Cinturón Esmeraldífero Oriental (Cordillera Oriental, Colombia) y su importancia en la exploración de nuevos yacimientos hidrotermales”, el cual se enmarcó en el acuerdo interadministrativo 002 de 2006. Igualmente los autores agradecen a los evaluadores anónimos, cuyos comentarios y observaciones permitieron mejorar este artículo.

REFERENCIAS.

Bailey, S.W. 1980. Structure of layer silicates. En: Brindley, G.W. and Brown, G. (eds.) *Crystal Structures of clay minerals and their X-ray identification*, Mineralogical Society, London. 124p.

Besoain, E. 1985. *Mineralogía de arcillas de suelos*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA, San José, Costa Rica, 1205p.

Cathelineau, M. and Nieva, D. 1985. A chlorite solid solution geothermometer. The Los Azufres (Mexico) geothermal system: *Contrib. Mineral Petrol*, pp. 235-244.

Cathelineau, M. 1988. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature: *Clay Miner*, pp. 471-485.

De Caritat, P., Hutcheon, I. and Walshe, J.L. 1993. Chlorite geothermometry: a review. *Clays and Clay Minerals*, pp. 219-239.

Droop, G.T.R. 1987. A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51: 431-435.

Foster, M.D. 1962. Interpretation of the composition and a classification of the chlorites. *Professional Papers, U.S. Geological Survey*, 414-A: 1-33.

Hey, M.H. 1954. A new revision of chlorites. *Mineralogical Magazine*, 30: 277-292

Jowett, E.C. 1991. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. *GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting (Toronto, May 27-29, 1991)*, Program with Abstracts 16, A62.

Klein, E.L., Harris, C., Giret, A. and Moura, C. 2007. The Cipoeiro gold deposit, Gurupi Belt, Brazil: Geology, chlorite geochemistry, and stable isotope study. *Journal of South American Earth Sciences*, 23: 242-255.

Kranidiotis, P. and MacLean, W.H. 1987. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec: *Econ. Geol.* 82: 1898-1911.

Mantilla, L.C, Silva, A., Conde, J., Gaviria, J.A., Gallo, F.H., Torres, D.A., Ortegón, J.A., Silva, E.N., Tarazona, C.A., Castro, B.J., y García, C.A. 2008. Estudio de los procesos de interacción fluido-roca en el Cinturón Esmeraldífero Oriental (Cordillera Oriental, Colombia) y su importancia en la exploración de nuevos yacimientos hidrotermales. INGEOMINAS, Bogotá. 496p.

Ortegón, M. 2008. Identificación y caracterización de los pulsos paleohidrotermales en rocas de la Formación Calizas del Guavio (Berriasiano, Cretácico Inferior) y su relación con la mineralización esmeraldífera. Municipio de Gachalá (Cundinamarca). Tesis de Pregrado. Escuela de Geología. Universidad Industrial de Santander (UIS). 172p.

Terraza, R., Montoya, D., Reyes, G., Moreno, G., y Fúquen, J. 2008. Geología del Cinturón Esmeraldífero Oriental, Planchas 210, 228 y 229. Informe INGEOMINAS. Bogotá. 126p.

Xie, X., Byerly, G.R. and Ferrell, R.E. 1997. Ilb trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt: crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry. *Contrib. Mineral. Petrol*, pp. 275-291.

Trabajo recibido: Junio 29 de 2010
Trabajo aceptado: Noviembre 9 de 2010