

# ESTUDIO DE PROVENIENCIA DE LAS PELITAS DE LAS FORMACIONES CASTELLANOS Y MIGUES (CRETACICO) DE LA CUENCA SANTA LUCÍA, URUGUAY

## PROVENANCE STUDY OF THE CASTELLANOS AND MIGUES FORMATIONS (CRETACEOUS), SANTA LUCIA BASIN, URUGUAY

Peel, E.<sup>(1,a)</sup> & Veroslavsky, G.<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Evolución de Cuencas – Facultad de Ciencias, Udelar

<sup>(a)</sup> elena@fcien.edu.uy

### RESUMEN

Se ha realizado un estudio de proveniencia geoquímica en las pelitas de las formaciones Castellanos y Migues (Cretácico Inferior) que conforman parte del relleno de la Cuenca Santa Lucía, suroeste del Uruguay. Las principales observaciones realizadas indican que estas pelitas están dominadas por esmectita e illita, subordinadamente aparece la caolinita. Conjuntamente con las arcillas se observa la presencia de feldespatos, hematita y calcita. La composición química de las pelitas muestra que están enriquecidas en Cr y V con respecto al PAAS, NASC y Corteza Continental Superior. De la aplicación de los índices geoquímicos de alteración (CIA, CIW e ICV) y de diagramas ternarios ACNK y ACNK-FM se establece un bajo grado de meteorización para las áreas de aporte, al igual que inmadurez composicional. Asimismo, el empleo de otros índices geoquímicos y de diagramas de discriminación geotectónica y de roca madre, muestran que la composición química es semejante a la de las litologías pertenecientes al cratón del Río de la Plata, establecida como área de aporte de la cuenca.

Como conclusiones principales se establece que las condiciones climáticas eran de aridez a semiaridez con humedad variable al momento de la depositación de las formaciones estudiadas. Además, el establecimiento del cratón del Río de la Plata como el área de aporte de la cuenca sugiere que no estaba cubierto por depósitos paleozoicos al momento de la acumulación de las formaciones Castellanos y Migues.

**Palabras clave:** proveniencia, pelitas cretácicas, cuenca Santa Lucía, Uruguay.

### ABSTRACT

A geochemical provenance study was conducted on the shales of Castellanos and Migues formations (Lower Cretaceous), which conform part of the filling of the Santa Lucía basin, southwest of Uruguay. The main features observed indicate that the shales are dominated by illite and smectite, subordinately appears kaolinite. Besides, feldspar, hematite and calcite are observed. Shale chemical composition is enriched in Cr and V with respect to the PAAS, NASC and Upper Continental Crust. From the application of the geochemical indexes of alteration (CIA, CIW and ICV) and of ternary diagrams ACNK and ACNK-FM, a low weathering degree is determined for the source areas, together with compositional immaturity. The use of other geochemical indexes and diagrams of geotectonic discrimination and source rock shows similar chemical composition with respect to the Río de la Plata Craton lithologies, which were established as the basin source rocks.

It is concluded that the climatic conditions were arid to semi-arid with variable humidity at the time of the deposition. In addition, the establishment of Río de la Plata Craton as the basin source area suggests that the craton was not covered by Paleozoic sediments at the time of deposition of the studied units.

**Key words:** provenance, cretaceous shales, Santa Lucía basin, Uruguay.

## INTRODUCCION

El término proveniencia, empleado por los sedimentólogos, abarca todos los factores relativos a la producción del sedimento y de la roca sedimentaria. Los aspectos más importantes de los estudios de proveniencia son la identificación de la roca madre, el relieve y el clima del área fuente, el ambiente tectónico, la historia del transporte y las modificaciones diagenéticas (Schieber, 1992).

A partir de los estudios petrográficos que implican análisis texturales y composicionales en areniscas, se han podido determinar roca madre (Pettijohn *et al.*, 1987; Basu *et al.*, 1975), relieve y clima del área fuente (Folk, 1980), al igual que la historia del transporte (Pettijohn *et al.*, *op. cit.*) y ambiente tectónico (Dickinson, 1985).

En lo que respecta a las limolitas y arcilitas, el estudio petrográfico se hace dificultoso debido al pequeño tamaño de los granos minerales y a las modificaciones diagenéticas introducidas en las arcillas, principales constituyentes de estas rocas. Es por esto que se emplea la composición química global para los estudios de proveniencia en estas litologías. A través de los índices químicos, basados en la abundancia de los elementos mayores, se han inferido condiciones de meteorización y clima (Nesbitt & Young, 1982; Harnois, 1988; Cox *et al.*, 1995). También algunos diagramas como SiO<sub>2</sub> versus K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O (Roser & Korsch, 1986) se han empleado para determinar ambientes geotectónicos.

En este trabajo se presentan los estudios de proveniencia basados fundamentalmente en los análisis químicos de elementos mayores de 16 muestras de pelitas pertenecientes a las formaciones Castellanos y Migues (Cretácico Inferior), unidades que conforman parte del relleno de la cuenca Santa Lucía. Estas muestras fueron tomadas de seis pozos profundos realizados por la Administración Nacional de Combustibles, Alcoholes y Portland (ANCAP) durante dos campañas de prospección de hidrocarburos en dicha cuenca. Asimismo, se discuten los resultados obtenidos en estudios anteriores que involucraron fundamentalmente aspectos estratigráficos y sedimentológicos.

Los principales resultados obtenidos mostraron que existe semejanza en la composición química de las pelitas con la del craton del Río de la Plata (*sensu* Almeida *et al.*, 1973), basamento de la cuenca. Además, se estableció un bajo grado de meteorización para las áreas de aporte. De igual forma, se indican condiciones climáticas de aridez a semiaridez con humedad variable al momento de la depositación de las formaciones.

## MARCO GEOLÓGICO

Las formaciones Castellanos y Migues, ambas de edad Cretácico Temprano (Albiano), constituyen parte del relleno rift de la cuenca Santa Lucía. Dicha cuenca ocupa un área aflorante de aproximadamente 8.000 km<sup>2</sup> y su relleno está constituido por una sucesión

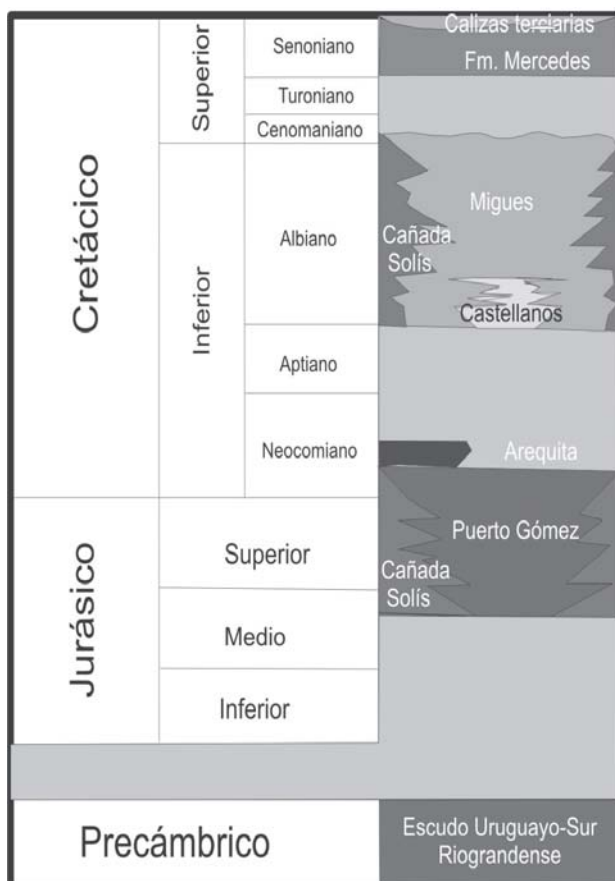


Figura N° 1. Mapa de ubicación de la Cuenca Santa Lucía y columna estratigráfica de la misma.

Figure 1. Location map of Santa Lucía Basin and stratigraphic column.

volcano-sedimentaria con edades desde Jurásico Tardío a Cretácico (Figura N° 1). La misma alcanza una potencia máxima de 2400 m y es cubierta por una delgada cobertura de sedimentitas y sedimentos cenozoicos.

Geológicamente, esta cuenca está limitada hacia el norte por los altos cratónicos cristalinos de Colonia y, hacia el sur, por los del Plata (Dalla Salda *et al.*, 1988; Bossi *et al.*, 1998), así como por la disposición de fallas en gradería submeridionales al Este. La porción aflorante posee un diseño en planta aproximadamente romboidal a lo largo de 150 km (según un eje longitudinal dispuesto en dirección N 60/70°) y 45 km de ancho (promedio).

La cuenca Santa Lucía es un *pull-apart*, (Veroslavsky, 1999, Rossello *et al.*, 2001) que se inició durante el Jurásico con las primeras manifestaciones tectono-magmáticas relacionadas a la desagregación del continente Gondwana y posterior apertura Atlántica. Su desarrollo está íntimamente ligado a las principales discontinuidades precámbricas (Sprechmann *et al.*, 1981).

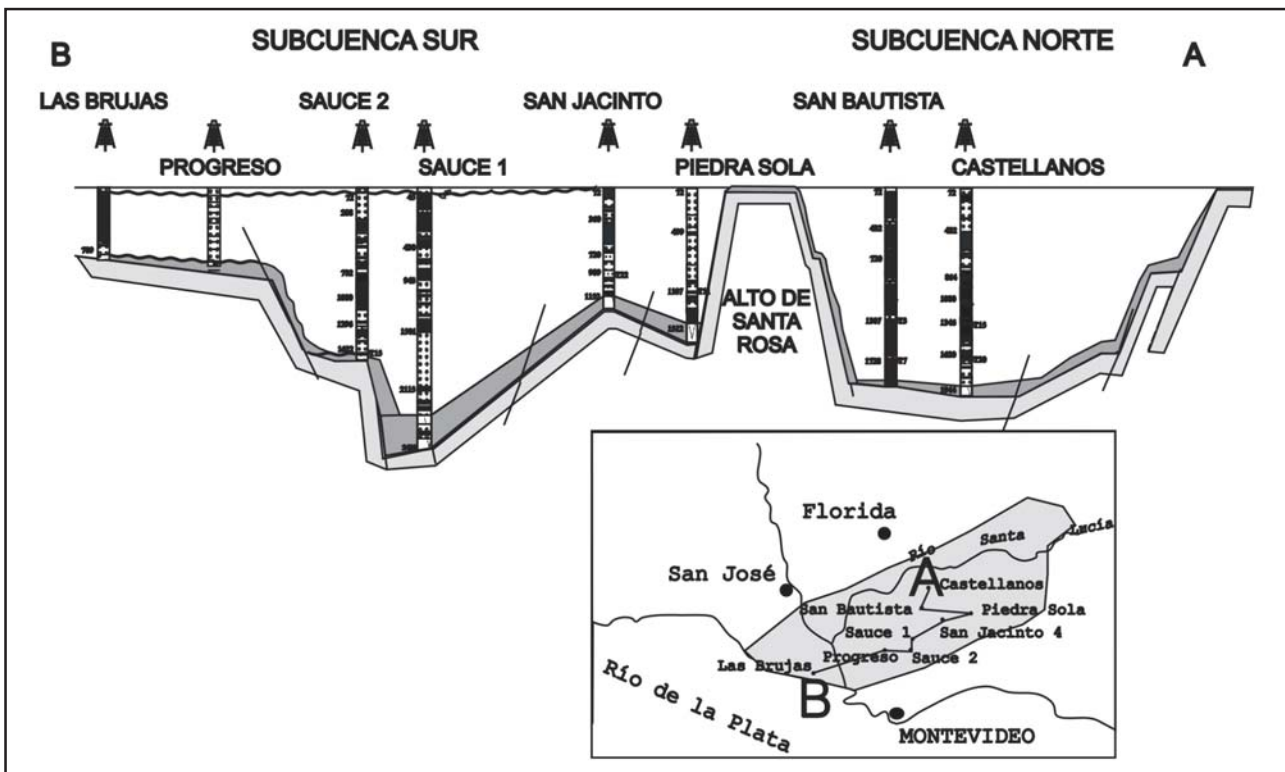
Conforma la parte occidental del Lineamiento Santa Lucía – Aiguá – Merín (SaLAM de Rossello *et al.*, 2000), un corredor tectónico extensivo y transcurrente dextral que con dirección general NEE se sobrepone al basamento precámbrico (escudo uruguayo *sensu* Masquelin, 2006).

La Cuenca Santa Lucía muestra una compartimentación compleja (Figura N° 2), la que propició la existencia de varios depocentros que albergaron una sedimentación continental de tipo

*playa-lake* con depósitos aluviales, fluviales y lacustres. Según Veroslavsky (*op. cit.*), la sedimentación albiana, representada por las formaciones Castellanos y Migués, es casi exclusivamente siliciclástica, aunque existen ocasionales niveles de yeso (hasta métricos) a los que, a su vez, se asociarían presumiblemente otras sales según la interpretación de las diagráfiyas de pozo.

La Formación Castellanos ocurre exclusivamente en subsuelo con espesores variables (263 m en pozo San Jacinto y 160 m en pozo Sauce 1). Zambrano (1974) fue quien empleó esta denominación para designar una sucesión de pelitas y arenitas finas grises y negras, situadas en discordancia y estratigráficamente por encima de los basaltos, conglomerados y arenitas inmaduras rojizas correspondientes a las formaciones Puerto Gómez y Cañada Solís. La Formación Castellanos consiste de lutitas, pelitas y arenitas finas gris oscuras a negras, macizas y laminadas, muchas veces con presencia de pirita, estructuras deformacionales, fosilíferas y con algunas intercalaciones de niveles de anhidrita y yeso, pudiendo gradar localmente a pelitas margosas delgadas con intercalaciones centimétricas de carbonatos. Muestra relaciones de interdigitación con la suprayacente Formación Migués en los sectores profundos mientras que otras veces el pasaje es concordante.

La Formación Migués está constituida por arenitas de grano fino a muy fino, de color rojo a castaño, con estratificación cruzada, alternadas con camadas de



**Figura N° 2.** Representación esquemática en corte SW-NE de la compartimentación de la cuenca y de la ubicación de los pozos empleados.

**Figure 2.** Schematic profile (SW-NE) showing the main structural features and well locations within the Santa Lucía Basin.

## Estudio de proveniencia de las pelitas de las formaciones Castellanos y Migues ...

pelitas, arcillitas y arenitas pelíticas de coloración castaña a rojiza, a veces verdosas, ya sean macizas o laminadas. De acuerdo con Veroslavsky (1999), en esta unidad es común la presencia de cuerpos lenticulares conglomerádicos y presenta como estructuras sedimentarias más conspicuas a nivel de afloramiento estratificación cruzada acanalada y planoparalela; aunque es muy común que las arenitas finas posean aspecto masivo. También es muy característico el acuñamiento de estratos y la presencia de lentes arenosos y arcillosos. La potencia máxima de esta unidad se registra en el pozo Sauce 1 con 2160 m. La Formación Migues tiene relaciones estratigráficas concordantes con la infrayacente Formación Castellanos, y en sectores reposa directamente sobre el basamento cristalino y/o basaltos mesozoicos (ver Figura N° 1). Hacia los bordes de cuenca o altos internos, se interdigita con la Formación Cañada Solís, unidad que reúne a conglomerados y areniscas conglomerádicas, subordinadamente pelitas, que representan los términos proximales de los sistemas aluviales.

Sobre la base de información paleontológica, geoquímica y sedimentaria, se les ha asignado a los términos pelíticos y lutíticos de las formaciones Castellanos y Migues, un origen continental lacustre sin influencia marina (Sprechmann, 1981; Campos, 1997; Peel *et al.*, 1998; Veroslavsky, 1999). Sin embargo, las litologías finas muestran arreglos de facies que permiten ser interpretadas como perteneciendo a términos distales de sistema de tipo *playa-lake* (Veroslavsky, *op. cit.*).

## METODOLOGÍA

Se realizó un muestreo en los niveles arcillosos de los testigos de los pozos disponibles en la Administración Nacional de Combustibles, Alcoholes y Portland (ANCAP). Los pozos estudiados fueron San Jacinto 2 (muestras M1, M2, M3, M4, M5, M6, C1 y C2), Sauce 1 (muestras M7 y C3), Sauce 2 (muestra M8), Piedra Sola (muestras M9 y C5), Castellanos (muestra C4) y San Bautista (muestras C6 y C7). M corresponde a la Formación Migues y C a la Formación Castellanos.

En las 16 muestras analizadas se realizaron estudios mineralógicos por difracción de rayos X. Para la identificación mineralógica de los minerales arcillosos presentes se prepararon láminas orientadas de la fracción menor a 2 $\mu$ , las cuales fueron sometidas a tratamientos específicos incluyendo tratamiento térmico y con etilenglicol, de acuerdo a los procedimientos indicados por Souza Santos (1989).

Por otro lado, se realizó el análisis químico cuantitativo de las muestras, determinándose los tenores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Fe total), MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, LOI, B, V, Ga, Rb, Sr y Cr. Todas las dosificaciones previamente mencionadas se realizaron por el método de fluorescencia de rayos X (equipo Philips sequential X-ray spectrometer system PW 2400) en el Laboratorio de Caracterização Tecnológica – Escola Politécnica – USP (Brasil). Todos los datos discutidos en este trabajo han sido recalculados en base anhidra.

Muestra	Caolinita	Illita	Esmectita	Cuarzo	Calcita	Micas	Hematita	K feldes.	Plagiocl
M1	+	+	++		+	+ (biot)	+		+
M2	+		++	+		+ (musc)	+		
M3	+	++		+	+	+ (musc)	+	+	
M4	+	+	++	+		+ (musc)			+
M5	+		++	+	+	+ (musc)			+
M6	+	++	+	+	+	+ (musc)		+	
C1		+	++	+	+	+ (musc)		+	
C2	+		++	+		+ (musc)			
M7		+	++	+		+ (musc)		+	
C3	+	++	+	+			+		+
M8	+	+	++	+	+	+ (musc)	+		+
C4	+	++		+	+	+ (biot, clincl)			+
M9	+	++	+	+	+	+ (biot, clincl)	+		+
C5	+	+	++			+ (musc)		+	
C6	+	++		+		+ (flogop)			+
C7	+	++				+ (flogop, musc)			+

+ :minerales presentes. La cantidad de cruces indica una estimación cuantitativa de su abundancia en la muestra analizada. Abreviaturas: musc: muscovita; biot: biotita; clincl: clinocloro; flogop: flogopita.

**Tabla N° I.** Composición mineralógica cualitativa de las pelitas de las formaciones Castellanos y Migues.

**Table I.** Qualitative mineralogic composition of pelites from Castellanos and Migues formations.

**RESULTADOS**

**A. Mineralogía**

De las 16 determinaciones por XRD, 7 muestras pertenecen a la Formación Castellanos y 9 a la Formación Migues. En la Tabla N° I se presentan los resultados obtenidos del análisis por difracción de rayos x.

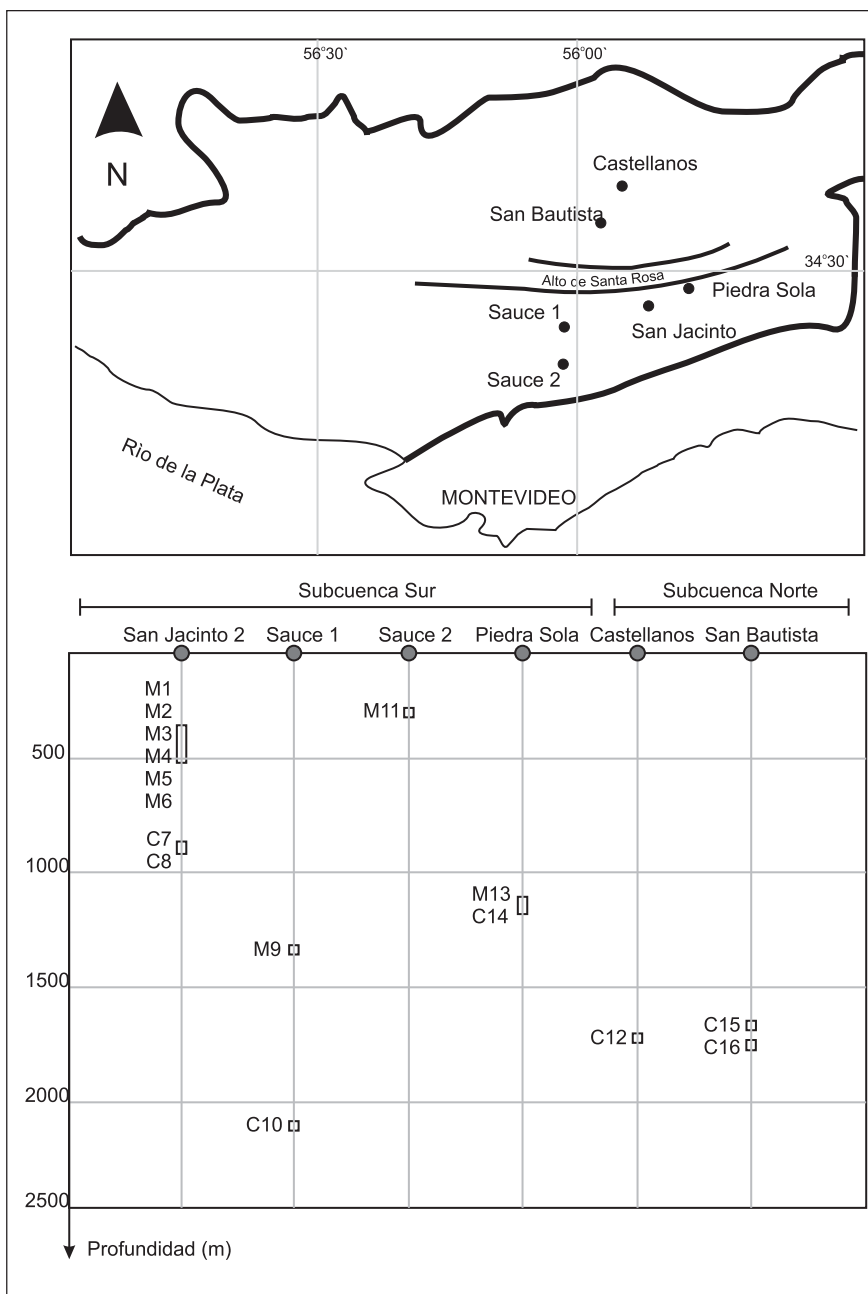
La illita y la esmectita son las arcillas más abundantes, apareciendo siempre con ellas la caolinita. En general, cuando la esmectita no es la arcilla más abundante o no está presente, la illita es la más abundante.

Tanto el cuarzo como las micas, a veces biotita otras muscovita, aparecen siempre como constituyentes aparentemente menos abundantes, pero consecuentes. Hematita, calcita, plagioclasa y feldespato potásico lo hacen como minoritarios y no en todas las muestras.

Por otro lado, tomando en cuenta la distribución espacial de los pozos, las profundidades a las que se tomaron las muestras (Figura N° 3) y los minerales determinados (Tabla N° I), se observa que la esmectita y la hematita están ausentes en las dos perforaciones situadas en la sub-cuenca norte (pozos San Bautista y Castellanos). En la sub-cuenca sur tanto la esmectita como la hematita son registradas en todos los pozos y a distintas profundidades. A su vez se observa, considerando todas las perforaciones, que hay mayor presencia de illita hacia la base y de hematita hacia el tope.

**B. Geoquímica de roca total**

Las pelitas son muy apropiadas para los estudios de proveniencia de sedimentos clásticos debido a su relativa homogeneidad, su impermeabilidad post-depositacional y porque dominan el balance de masa sedimentario. Aunque se piensa comúnmente que la composición de la roca madre es el factor principal que controla la composición del sedimento, los procesos como meteorización, transporte y diagénesis pueden producir cambios muy profundos en los sedimentos (Wronkiewicz & Condie, 1987; Cullers *et al.*, 1987). Es por esta causa que se emplean para el estudio geoquímico de proveniencia, elementos químicos con baja movilidad en los ambientes geológicos superficiales.



**Figura N° 3.** Distribución espacial de los pozos empleados y ubicación de las muestras en cada perforación.

**Figura 3.** Geographic distribution of wells and sampling locations within the profiles.

**ELEMENTOS MAYORES**

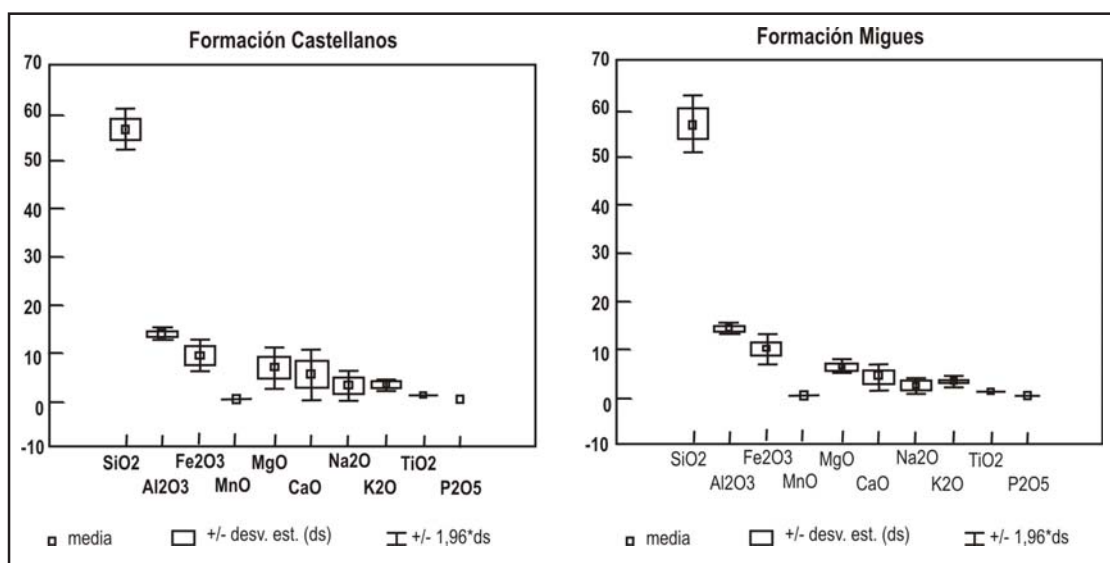
En la Tabla N° II se presentan los resultados del análisis por fluorescencia de rayos x, y en la figura 4 se representan los valores medios de cada parámetro analizado para cada formación. Los contenidos de SiO<sub>2</sub> no son muy variables, se encuentran en un rango que va desde 53,79% a 64,59% en peso. El TiO<sub>2</sub> presenta un rango más amplio de variación que va desde 0,82% a 1,28% en peso. En lo que respecta al contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, este varía muy poco entre 12,75% y 15,14%; el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se encuentra entre 6,97% y 13,07%. Los contenidos de MgO, CaO y MnO son altos comparados con los valores del PAAS (Post Archean Australian Shale, Taylor & McLennan, 1985),

## Estudio de proveniencia de las pelitas de las formaciones Castellanos y Migues ...

Muestra	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	TNP	NASC	PAAS	TPA	UC
SiO <sub>2</sub>	56.02	54.51	60.25	56.94	57.19	58.24	53.79	55.56	54.08	56.67	55.94	57.33	55.03	64.59	58.16	57.24	67.55	64.80	62.80	66.44	66.00
TiO <sub>2</sub>	0.89	0.92	1.06	1.28	1.01	0.94	1.02	0.91	0.88	0.85	0.99	0.82	0.86	0.96	0.96	1.25	0.57	0.70	1.00	0.52	0.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.75	14.41	14.11	13.84	14.28	14.02	13.55	13.75	14.97	15.10	14.22	15.14	14.51	14.73	14.56	14.95	14.52	16.90	18.90	14.24	15.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.14	11.67	9.92	9.95	10.07	7.07	6.97	13.07	10.62	9.38	10.12	10.27	11.58	7.30	10.31	10.68	6.84	5.65	7.22	4.13	5.00
MnO	0.14	0.17	0.13	0.06	0.13	0.07	0.11	0.16	0.14	0.14	0.13	0.15	0.14	0.07	0.11	0.14	0.11	0.06	0.11	0.09	0.08
MgO	9.08	7.75	6.55	7.75	8.86	2.79	5.87	7.83	6.87	6.51	6.63	6.74	5.90	5.57	6.72	5.78	2.00	8.86	2.20	2.32	2.20
CaO	6.14	4.53	2.02	4.20	3.61	6.95	10.31	3.39	5.98	5.12	5.84	3.02	4.90	1.74	4.70	3.97	3.35	3.63	1.30	3.99	4.20
Na <sub>2</sub> O	2.40	2.25	1.96	2.63	1.91	5.65	5.15	1.73	2.97	3.10	2.51	3.21	3.57	2.01	1.00	2.42	3.60	1.14	1.20	3.57	3.90
K <sub>2</sub> O	2.29	3.62	3.76	3.08	2.74	3.88	2.96	3.47	3.27	3.01	3.42	3.10	3.34	2.84	3.30	3.26	3.24	3.97	3.70	2.71	3.40
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.17	0.24	0.27	0.20	0.39	0.27	0.13	0.22	0.22	0.20	0.22	0.17	0.19	0.18	0.31	0.18	0.13	0.16	0.13	----
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	----	----	----	----	----
Rb	58	95	129	93	73	104	72	92	97	90	89	97	85	69	86	90	134	125	160	119	112
Sr	373	285	176	341	308	473	466	434	433	362	488	323	413	251	263	236	556	142	200	143	350
Ga	15	18	18	18	17	16	14	16	17	15	15	17	16	11	14	19	20	----	----	10	17
Cr	106	122	165	212	127	193	95	134	102	120	171	114	93	367	97	191	86	125	110	84	35
V	222	116	128	116	177	94	66	144	82	80	77	82	78	90	86	85	131	130	150	73	60
B	39	47	27	53	43	32	28	36	23	31	19	22	35	12	18	62	----	----	----	----	----
CIA	43.33	46.67	56.00	48.28	53.85	35.90	30.95	50.00	44.12	46.88	43.75	53.57	42.42	60.87	50.00	51.72	48.28	58.62	70.37	46.67	45.45
CIW	46.43	53.85	66.67	53.85	60.87	40.00	33.33	59.09	48.39	51.72	50.00	60.00	48.28	70.00	58.33	57.69	53.85	68.00	82.61	51.85	51.72
ICV	3.62	3.07	2.43	3.00	2.93	2.64	3.77	3.23	2.93	2.67	3.00	2.47	3.00	2.07	2.71	2.47	1.79	2.29	1.05	1.86	1.87
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.18	0.25	0.27	0.22	0.19	0.28	0.22	0.25	0.22	0.20	0.24	0.20	0.23	0.19	0.23	0.22	0.22	0.23	0.20	0.19	0.22
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.39	3.78	4.27	4.11	4.00	4.15	3.97	4.04	3.61	3.75	3.93	3.79	3.79	4.38	3.99	3.83	4.65	3.83	3.32	4.67	4.34

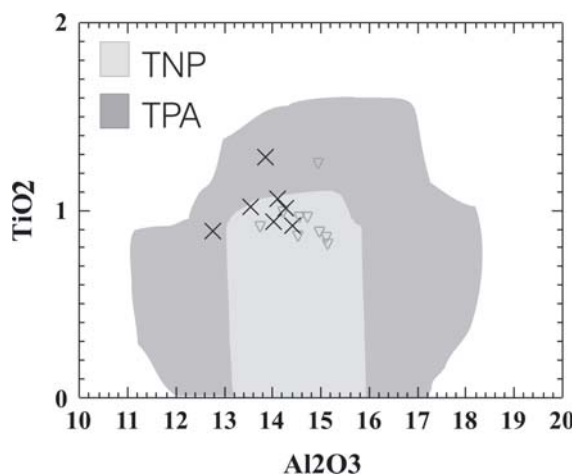
**Tabla N° II.** Resultados del análisis químico por fluorescencia de rayos X.

**Table II.** Major and trace element concentrations (XRF analysis).



**Figura N° 4.** Caracterización estadística de las formaciones Castellanos y Migues

**Figure 4.** Statistics of Castellanos and Migues formations.



**Figura N° 5.** Diagrama Ti vs Al aplicado a las pelitas de las formaciones Castellanos (X) y Migues (triángulo).

**Figure 5.** Ti vs. Al diagram applied to the pelites of Castellanos (X) and Migues (triangle) formations.

del NASC (North American Shale Composite de Gromet *et al.*, 1984) y de la Corteza Continental Superior (Taylor & McLennan, *op. cit.*). Desde el punto de vista geoquímico no existe una diferenciación estadísticamente significativa entre las dos formaciones geológicas estudiadas con el número de muestras empleado.

El contenido de Na<sub>2</sub>O se encuentra entre 1,00% a 5,65% mostrando gran variación y altos tenores si se compara con los valores presentados por Brownlow (1996) para esta litología. Los tenores de K<sub>2</sub>O se encuentran entre 2,29% y 3,88%.

**ELEMENTOS TRAZA**

En lo que respecta a los elementos traza analizados, las muestras estudiadas muestran un enriquecimiento en los contenidos tanto de V como de Cr en comparación a los indicados para el PAAS, el NASC y Corteza Continental Superior empleados anteriormente.

Los valores en las muestras se encuentran entre 66 y 222 ppm para el V y entre 93 y 367 ppm para el Cr. Asimismo, los valores de Rb y, en menor proporción, de Sr de las muestras son inferiores a los establecidos para los comparadores (ver Tabla N° II).

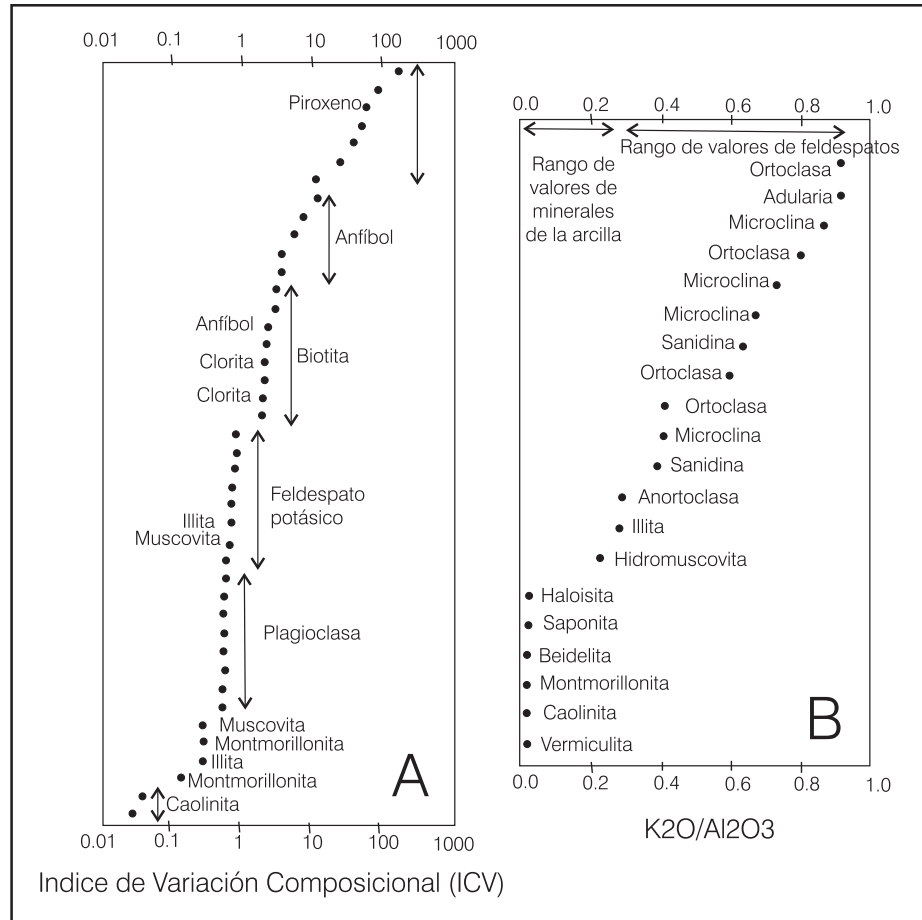
**C. Aplicación de índices geoquímicos**

**INDICE DE PROVENIENCIA**

Varios autores propusieron el empleo de distintas relaciones elementales para caracterizar la proveniencia de los materiales pelíticos. McLennan *et al.* (1979) propusieron utilizar la relación Ti/Al como un índice de proveniencia y un estimador de la composición química global del área fuente basándose en la baja solubilidad y en el comportamiento similar que tienen estos dos elementos químicos durante la meteorización. En la Figura N° 5 se puede observar la distribución de las 16 muestras. De acuerdo con lo mostrado en el gráfico, las muestras presentan relaciones semejantes a las de las litologías pertenecientes a las distintas unidades que conforman el escudo uruguayo.

**ÍNDICES GEOQUÍMICOS DE ALTERACIÓN**

Tres índices de meteorización, el CIA (Chemical Index of Alteration,  $[(Al_2O_3)/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O +$



**Figura N° 6.** Índice de variación composicional y relación K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de algunos minerales formadores de roca (tomado de Cox *et al.*, 1995)

**Figure 6.** Index of compositional variability and K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio of some rock-forming minerals (from Cox *et al.*, 1995).

K<sub>2</sub>O])\*100) de Nesbitt & Young (1982), el CIW (Chemical Index of Weathering,  $[(Al_2O_3)/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O)]*100$ ) de Harnois (1988) y el ICV (Index of Compositional Variability,  $[(Fe_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O + MgO + MnO + TiO_2)/Al_2O_3]*100$ ) de Cox *et al.* (1995) han sido aplicados a las muestras de las formaciones Castellanos y Migues. Los valores de CaO no han sido corregidos por carbonatos secundarios, así que los valores de los índices son valores mínimos en el caso de CIA y CIW y máximos en el caso del ICV; de todos modos algunas de las muestras analizadas no mostraron la presencia de carbonatos en el análisis mineralógico (ver Tabla N° I). De acuerdo con Nesbitt & Young (1982) la caolinita y la clorita tienen un CIA cercano a 100; las pelitas tienen un CIA de 70 a 75; mientras que Taylor & McLennan (1985) reportaron un CIA de 85 a 100 para arcillas residuales. Con respecto al CIW, Condie (1993) reportó valores para la mayoría de las pelitas post-arqueanas de 80 a 95; en contraste, la mayoría de las pelitas arqueanas muestran valores de 90 a 98. En lo que respecta al ICV de Cox *et al.* (1995), éste mide la abundancia del Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en relación a los otros cationes mayores de la roca y se podría ver como una medida de la madurez composicional de las pelitas. Pelitas maduras tendrán valores del ICV bajos y pelitas inmaduras (abundancia de minerales no arcillosos y montmorillonita) tendrán

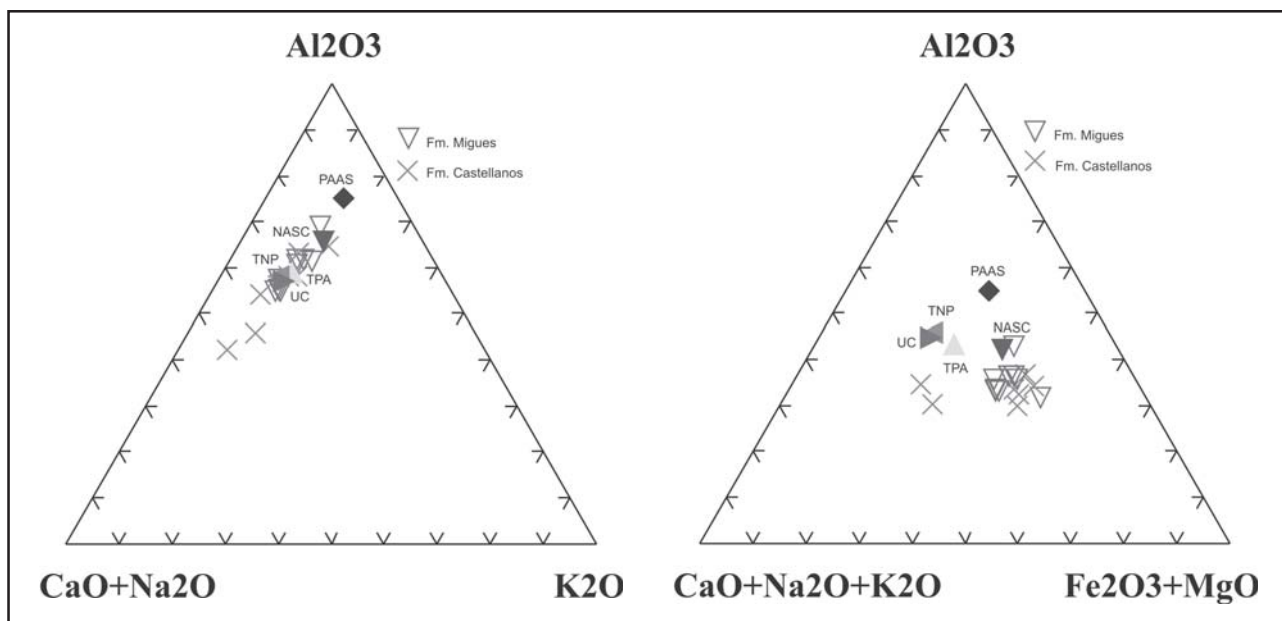


Figura N° 7. Diagramas ACNK y ACNK-FM aplicados a las muestras en estudio.  
 Figure 7. ACNK and ACNK-FM diagrams applied to the studied samples.

ICV altos (Figura N° 6A).

Estos índices aplicados a los análisis de las pelitas de las formaciones en estudio se presentan en la tabla II. El índice CIA en la Formación Migues muestra valores de 43,45 a 55,07 y de 35,91 a 54,09 en la Formación Castellanos. De acuerdo con Nesbitt & Young (1982), los valores de Migues se corresponden con el rango de los granitos y los de Castellanos se corresponden con el rango de los basaltos y granitos. El índice CIW da valores entre 48,86 y 63,03 para la Formación Migues y de 39,08 y 62,35 para la Formación Castellanos. Ambos rangos de valores son muy bajos respecto del PAAS. El índice ICV aplicado a Migues muestra valores entre 2,37 y 3,08; aplicado a la Formación Castellanos presenta valores entre 2,58 y 3,55. En ambos casos los valores caen en el

rango de las micas y los anfíboles.

La relación  $K_2O/Al_2O_3$  propuesta por Cox *et al.* (1995) como un índice de la composición original de pelitas antiguas indica que las muestras se encuentran en el campo de las arcillas, hacia el límite con el campo de los feldespatos (hidromuscovita, illita a anortoclasa; Figura N° 6B).

Finalmente, la relación  $SiO_2/Al_2O_3$ , comúnmente usada como índice de madurez sedimentaria, muestra valores entre 3,61 y 4,39. Los valores de esta relación aumentan durante la meteorización, el transporte y el reciclado, debido al aumento modal del cuarzo a expensas de minerales menos resistentes como los feldespatos, piroxenos, anfíboles y líticos. Para rocas ígneas básicas, los valores de esta relación están en el entorno de 3 y para rocas

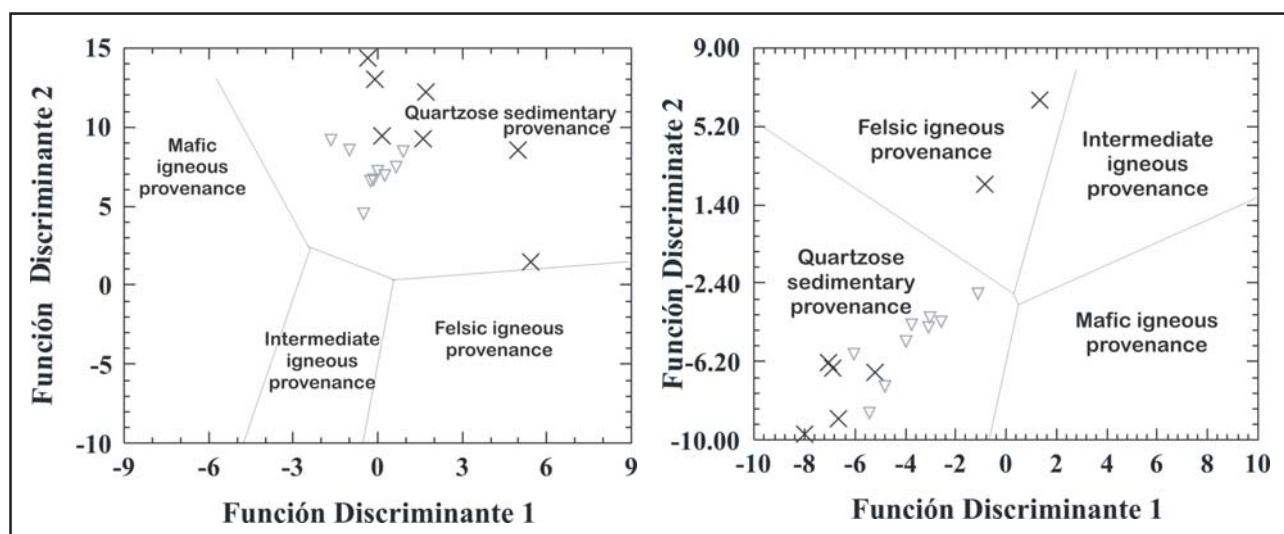


Figura N° 8. Funciones discriminantes de Roser & Korsch (1988) aplicadas a las muestras de las formaciones Castellanos (x) y Migues (triángulo).  
 Figure 8. Discriminant functions of Roser & Korsch (1988) applied to the studied samples (x- Castellanos; triangle- Migues).



ígneas ácidas alrededor de 5. Valores mayores a 5 o 6 en las rocas sedimentarias evidencian madurez sedimentaria (Roser *et al.*, 1996).

#### D. Aplicación de diagramas geoquímicos DIAGRAMAS DE METEORIZACIÓN

Nesbitt & Young (1982; 1984; 1989; 1996) y Nesbitt *et al.* (1996) emplearon diagramas ternarios ACNK ( $Al_2O_3 - CaO + Na_2O - K_2O$ ) y ACNK-FM ( $Fe_2O_3 + MgO - CaO + Na_2O + K_2O - Al_2O_3$ ) para deducir la evolución durante la meteorización. La aplicación de estos diagramas en las muestras estudiadas se puede apreciar en la Figura N° 7. Los puntos correspondientes a las muestras, caen distribuidos hacia el centro-arriba e izquierda en el triángulo, pero alejado del vértice del  $Al_2O_3$ .

Asimismo, se incluyeron en el gráfico para comparación tanto la composición promedio del basamento de la cuenca del Santa Lucía, correspondiente al Terreno Piedra Alta (Bossi *et al.*, 1993), como la de los terrenos meso y neoproterozoicos desarrollados al este de la cuenca (Terreno Nico Pérez -TNP-), del PAAS, del NASC y de la Corteza Continental.

Notoriamente se puede ver que las muestras coinciden con la composición de la corteza continental y con las composiciones tanto del Terreno Piedra Alta (Bossi *et al.*, 1993) como de la porción sur del Dominio Central, desarrollado al este de la cuenca.

#### DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN DE ROCA MADRE

Fueron aplicados a las muestras las funciones discriminantes desarrolladas por Roser & Korsch (1988) para suites arenisca-pelita.

En ambos casos representados en la Figura N° 8, las muestras caen en el campo de proveniencia sedimentaria cuarzosa, con la ocurrencia de dos muestras en el campo de proveniencia ígnea félsica.

#### DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN DE AMBIENTE TECTÓNICO

Fue aplicado el diagrama de discriminación de ambiente tectónico de Roser & Korsch (1986) a las muestras de las formaciones Castellanos y Migués. De acuerdo con Roser *et al.* (1996) este diagrama es aplicable tanto a areniscas como a pelitas. Los resultados obtenidos no son coincidentes con las determinaciones del ambiente tectónico realizados anteriormente (e.g. Veroslavsky, 1999, Rossello *et al.*, 2000), que están fuera de discusión. En la Figura N° 9 se puede observar que las muestras caen en los campos Margen Continental Activa y Arco de Isla.

#### DISCUSIÓN

En estudios anteriores (e.g. Veroslavsky, 1999), se estableció que las formaciones Castellanos y Migués tienen un origen continental y fueron depositadas por procesos aluviales, fluviales y lacustres ligados a sistemas de *playa-lake*. Se ha

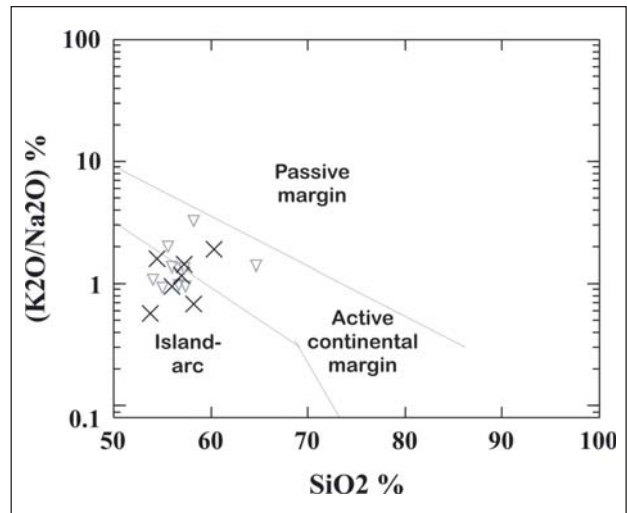


Figura N° 9. Diagrama de discriminación tectónica (Roser & Korsch, 1986) aplicado a las muestras en estudio (Castellanos – X; Migués - triángulo).

Figure 9. Tectonic discrimination diagram of Roser & Korsch (1986) applied to the studied samples (X – Castellanos formation; triangle – Migués formation).

postulado también, sobre la base de información paleontológica y mineralógica fundamentalmente, que el clima reinante en la región durante la depositación de estas unidades era árido a semiárido, con temperaturas altas y humedad variable. Se indica que habría sido un pasaje de clima árido durante la depositación de la Formación Castellanos, a un clima semiárido, cálido, durante la depositación de la Formación Migués; posiblemente llegando a húmedo al final de la depositación de éste último (Veroslavsky *op. cit.*).

Por un lado, en el estudio mineralógico se determinó la presencia de arcillas tales como esmectita e illita como mayoritarias. Cabe destacar que se observa una variación mineralógica en la vertical siendo illita la arcilla predominante hacia la base (en Formación Castellanos) y esmectita hacia el tope (en Formación Migués) como fuera sugerido por Peel *et al.* (1998). Este hecho es también constatado en los tenores de  $K_2O$  que registran los valores más altos en la base de la Formación Castellanos. También, se observa que la hematita es un mineral accesorio casi exclusivo de la Formación Migués, señalando un aumento en el Eh del ambiente que generó condiciones oxidantes favorables para su aparición.

Por otro lado, la observación de la ausencia de hematita y esmectita en los dos pozos de la subcuenca norte (pozos San Bautista y Castellanos) podrían estar indicando a esa profundidad de los testigos una diferencia de corte litológico en las áreas de aporte o de corte climático que hubiera afectado la meteorización. Quizás pudiera estar implicando una influencia del Alto de Santa Rosa, aunque Veroslavsky (1999) establece que al momento de la depositación de Castellanos los rasgos estructurales principales no estarían presentes; y que probablemente el propio sitio actual del Alto fuera la parte profunda del lago

en donde se produjo la sedimentación. De todos modos sería necesario el estudio de otros pozos de la subcuenca norte para determinar efectivamente la presencia/ausencia de estos dos minerales en la subcuenca norte al momento de la depositación de la Formación Castellanos.

En los diagramas de discriminación de roca madre de Roser & Korsch (1988) las muestras caen en el campo de proveniencia sedimentaria cuarzosa, con la ocurrencia de dos muestras en el campo de proveniencia ígnea félsica. Esto es consistente con las composiciones presentes en las áreas de aporte, tanto en el Terreno Piedra Alta como en la porción sur del Terreno Nico Pérez. Más aún, estas pelitas presentan abundancia de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  y álcalis por lo que se infiere que la meteorización química no fue un proceso muy intenso en el área madre.

A su vez, los resultados obtenidos al aplicar los distintos índices de alteración a las pelitas de las formaciones Castellanos y Migues (ver tabla II), muestran un bajo grado de meteorización en el área fuente (CIW y CIA) e inmadurez composicional (ICV). De igual forma, los diagramas ternarios ACNK y ACNK-FM muestran una meteorización no muy intensa en el área fuente.

Desde un punto de vista estrictamente ambiental, generalmente las esmectitas se forman bajo condiciones climáticas donde hay bajas precipitaciones y bajo relieve -baja tasa de flujo- (Brownlow, 1996), prevaleciendo condiciones de alcalinidad en el medio (Borchardt, 1977). Para la formación de illita es necesario tener abundancia de  $\text{K}^+$  además de condiciones de alcalinidad en el ambiente (Poppe *et al.*, 2001). Las precipitaciones y la lixiviación deben ser moderadas e intermitentes.

Con respecto a la caolinita, las condiciones de formación son algo opuestas a las de las mencionadas anteriormente. Es necesario mayor tasa de precipitaciones y buen drenaje (Brownlow, 1996), pH del medio ácido o neutro pero con lixiviación intensa (Murray, 1953) de forma tal de eliminar a los elementos alcalinos y alcalinotérreos pudiéndose generar conjuntamente óxidos de hierro.

Con respecto a los elementos traza V y Cr sus contenidos están indicando que no son compatibles con las típicas rocas de corteza continental superior y pueden estar reflejando mezcla de fuentes.

La aplicación de los diagramas de discriminación de ambiente tectónico de Roser & Korsch (1996) indican Margen Continental Activa y Arco de Isla, siendo esta clasificación inconsistente con los modelos planteados y aceptados para la cuenca.

Pero, la combinación de composición de corteza superior con una componente de bajo reciclado, y la inmadurez mineralógica sugieren también, áreas deposicionales como *rifts* intracontinentales. Cabe destacar que estos diagramas, si bien son aplicables a pelitas, fueron realizados para suites areniscapelitas pertenecientes a una cuenca geotectónicamente diferente.

### CONCLUSIONES

Las pelitas de las formaciones Castellanos y Migues se componen de illita, esmectita y caolinita en distintos porcentajes, junto con otros minerales accesorios como feldespatos, hematita, cuarzo o calcita. En general se observa que las arcillas más abundantes son la illita y la esmectita, subordinadamente está la caolinita.

Por otro lado, de acuerdo a lo observado en relación a la ubicación de las muestras, la illita es la arcilla más abundante hacia la base de la sucesión albiana (Formación Castellanos) y la esmectita es la arcilla más abundante hacia el tope (Formación Migues). A su vez, la hematita también se presenta más frecuentemente hacia el tope de la sucesión. Estas dos características estarían pues implicando un ambiente deposicional con pH alto (alcalino-formación de esmectita e illita) y de Eh en aumento (oxidante-aparición de hematita) hacia el tope de la sedimentación. Esto, conjuntamente con la mineralogía determinada aquí y la observada en trabajos anteriores (niveles centimétricos a métricos de anhidrita y yeso), implican un clima caracterizado por baja a moderada precipitación con intermitencias.

El empleo de los índices geoquímicos, de los gráficos ternarios de grado de meteorización, y los diagramas de discriminación de roca madre, sugieren áreas de aporte de composición similar a corteza continental. Además indican bajo grado de meteorización para las áreas de aporte sedimentario e inmadurez mineralógica. La composición química semejante a la de las litologías pertenecientes al cratón del Río de la Plata, establecida como área de aporte de la cuenca, estaría indicando que no estaban cubiertas por sedimentación paleozoica al momento de la depositación de las formaciones Castellanos y Migues.

Asimismo, se reafirma la idea planteada de las condiciones climáticas de aridez a semiaridez con humedad variable al momento de la depositación de las formaciones Castellanos y posteriormente Migues.

**BIBLIOGRAFÍA**

- ALMEIDA, FFM DE; AMARAL, G.; CORDANI, U. & KAWASHITA, K. The Precambrian evolution of the South American Cratonic Margin, South of the Amazon River, pp. 411-446 de Nairn, A.E. & Stehli, FG eds, *The Ocean Basins and Margins. Vol I*, 1973. Plenum Pub. Co.
- BASU, A., YOUNG, S.W., SUTTNER, L.J., JAMES, W.C. & MACK, G.H. 1975. Re-evaluation of the use of undulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz for provenance interpretation. *Journal of Sedimentary Petrology* 45, 873-882.
- BHATIA, M.R. & TAYLOR, S.R. 1981. Trace element geochemistry and sedimentary provinces : study from the Tasman geosyncline, Australia. *Chemical Geology* 33, 115-125.
- BORCHARDT, G.A., 1977. Montmorillonite and other smectite minerals, in Dixon, J.B., Weed, S.B., Kittrick, J.A., Milford, M.H., and White, J.L. eds., *Minerals in soil environments*, Soil Science Society of America, Madison, Wis., p. 293-330
- BOSSI, J.; PRECIOZZI, F. & CAMPAL, N. *Predevoniano en el Uruguay. Parte 1: Terreno Piedra Alta*; Ed. DINAMIGE. 1993. 1-50; Montevideo - Uruguay.
- BROWNLOW, A.H. Sedimentary Rocks. En *Geochemistry*, 2nd. Edition, Prentice Hall, New York,. 1996. cap. 7. pp347-413.
- CAMPOS, C. Biocronoestratigrafía e inferências paleoambientais das Formações Castellanos e Migueis - Bacia de Santa Lucía - Cretáceo do Uruguai, com base em palinologia. 1997. Dissertação de Mestrado, Universidade de Guarulhos, 175pp.
- CONDIE, K.C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology* 104, 1-37.
- COX, R.; LOWE, D.R. & CULLERS, R.L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 2919-2940.
- CULLERS, R.L.; BARRET, T.; CARLSON, A. & ROBINSON, B. 1987. REE and mineralogic changes in Holocene soil and stream sediment: a case study in the West Mountains, Colorado, USA. *Chemical Geology* 63, 275-297.
- DALLA SALDA, L., BOSSI, J. y CINGOLANI, C. 1988 The Río de la Plata Cratonic Region of South-Western Gondwanaland. *Episodes*, 114: 263-269. Ottawa. Canadá.
- DICKINSON, W.R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. En *Provenance of Arenites* ed. G.G. Zuffa. 1985. 333-361 pp. Dordrecht: D. Reidel.
- FOLK, R.L. *Petrology of sedimentary rocks*. Austin, Texas: Hemphill Publication Company, 1980.182 pp.
- GROMET, L.P.; DYMEK, R.F.; HASKIN, L.A. & KOROTEV, R.L. 1984. The North American Shale Composite: its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48, 2469-2482.
- HARNOIS, L. 1988. The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology* 55, 319-322.
- MASQUELIN, H. El Escudo uruguayo. En *Cuencas sedimentarias del Uruguay: Geología, Paleontología y Recursos Naturales. Paleozoico*. eds. Veroslavsky, G.; Ubilla, M. & Martínez, S. Montevideo, 2006. DIRAC.
- MCLENNAN, S.M.; FRYER, B.J. & YOUNG, G.M. 1979. The geochemistry of the carbonate-rich Espanola Formation Huronian with emphasis on the rare earth elements. *Canadian Journal of Earth Sciences* 16, 230-239.
- MURRAY, H.H. 1953. "Genesis of clay minerals in some Pennsylvanian shales of Indiana and Illinois". *Clays and clay minerals*, V.2, nº1, pp. 47-67. The Clay Minerals Society.
- NESBITT, H.W. & YOUNG, G.M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, 715-717.
- NESBITT, H.W. & YOUNG, G.M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Journal of Geology* 48, 1523-1534.
- NESBITT, H.W. & YOUNG, G.M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *Journal of Geology* 97, 129-147.
- NESBITT, H.W. & YOUNG, G.M. 1996. Petrogenesis of sediments in the absence of chemical weathering: effects of abrasion and sorting on bulk composition and mineralogy. *Sedimentology* 43, 341-358.
- NESBITT, H.W.; YOUNG, G.M.; MCLENNAN, S.M. & KEAYS, R.R. 1996. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies. *Journal of Geology* 104, 525-542.
- PEEL, E.; VEROSLAVSKY, G. & FÚLFARO, V.J. Geoquímica de las pelitas de las formaciones Castellanos y Migueis Cretácico, Cuenca del Santa Lucía – Uruguay: consideraciones paleoambientales. Actas del III CONGRESO URUGUAYO DE GEOLOGÍA, Punta del Este, Uruguay. 1998.
- PETTIJOHN, F.J.; POTTER, P.E. & SIEVER, R. *Sand and sandstone*. Springer-Verlag, New York. 1987. 618pp.
- POPPE, L.J.; PASKEVICH, V.F.; HATHAWAY, J.C. & BLACKWOOD, D.S. 2001. *A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction*. U. S.

## Estudio de proveniencia de las pelitas de las formaciones Castellanos y Migués ...

- Geological Survey Open-File Report 01-041 CD-ROM ISBN 0607970065.
- POTTER, P.E.; MAYNARD, J.B. & PRYOR, W.A. *Sedimentology of shale*. Springer-Verlag. 1980.
- ROSER, B.P. & KORSCH, R.J. 1986. 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. *Journal of Geology* 94, 635-650.
- ROSER, B.P. & KORSCH, R.J. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data. *Chemical Geology* 67, 119-139.
- ROSER, B.P.; COOPER, R.A. & TULLOCH, A.J. 1996. Reconnaissance sandstone geochemistry, provenance, and tectonic setting of the lower Paleozoic terranes of the West Coast and Nelson, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 39, 1-16.
- ROSSELLO, E.A.; DE SANTA ANA, H. & VEROSLAVSKY, G. 2000. El Lineamiento Santa Lucía – Aiguá – Merín Uruguay: un corredor tectónico extensivo y trascurrente dextral precursor de la apertura Atlántica. *Revista Brasileira de Geociencias* 30 4: 749-756.
- ROSSELLO, E.A.; VEROSLAVSKY, G. & DE SANTA ANA, H. 2001. La Cuenca Santa Lucía Uruguay: un pull-apart jurcretácico transtensivo dextral. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56 1: 38-50.
- SCHIEBER, J. 1992. A combined petrographical-geochemical provenance study of the Newland Formation, Mid-Proterozoic of Montana. *Geological Magazine*. 129: 223-237.
- SOUZA SANTOS, P. *Ciência e tecnologia de argilas*. 2ª Edición, Blucher. 1989. vol 1: 408 pp.
- SPRECHMANN, P.; BOSSI, J. & DA SILVA, M. Cuencas del Jurásico y Cretácico del Uruguay. In: Volkheimer, W. & E.A. Mussachio eds.: *Cuencas Sedimentarias del Jurásico y Cretácico de América del Sur*, 1981. 1: 239 - 270, Buenos Aires.
- TAYLOR, S.R. & MCLENNAN, S.M. *The continental Crust: its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, 1985. 312pp.
- VAN DE KAMP, P.C. & LEAKE B.E. 1985. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of northeastern Pacific margin. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Science*. 76, 411-449.
- VEROSLAVSKY, G. Geología da Bacia de Santa Lucia – Uruguai. Instituto de geociencias e Ciencias Exatas, Universidade Estadual Paulista, Sao Paulo. 1999. Tese de Doutorado, 152 pp.
- WRONKIEWICZ, D.J. & CONDIE, K.C. 1987. Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source area weathering and provenance. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51, 2401-2416.
- ZAMBRANO, J. 1974. Cuencas sedimentarias en el subsuelo de la Provincia de Buenos Aires y zonas adyacentes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* XXIX 4: 443-453.

**Recibido:** 4 de Julio de 2006

**Aceptado:** 3 de Marzo de 2007