



Revista Mexicana de Ciencias Geológicas
ISSN: 1026-8774
ISSN: 2007-2902
rmcg@geociencias.unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México
México

Geoquímica de rocas siliciclásticas de la Formación Corral de Enmedio y Arenisca Camas, cuenca Cabullona, Sonora: paleometeorización y procedencia

Galindo-Ruiz, Jocelyn; Madhavaraju, Jayagopal; Grijalva-Noriega, Francisco J.; Monreal, Rogelio; Espinoza-Maldonado, Inocente G.

Geoquímica de rocas siliciclásticas de la Formación Corral de Enmedio y Arenisca Camas, cuenca Cabullona, Sonora: paleometeorización y procedencia

Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 35, núm. 2, 2018

Universidad Nacional Autónoma de México, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57265236007>

DOI: <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.2.550>

Geoquímica de rocas siliciclásticas de la Formación Corral de Enmedio y Arenisca Camas, cuenca Cabullona, Sonora: paleometeorización y procedencia

Jocelyn Galindo-Ruiz
Universidad de Sonora, México

DOI: <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.2.550>
Redalyc: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57265236007>

Jayagopal Madhavaraju
Universidad Nacional Autónoma de México, México
mj@geologia.unam.mx

Francisco J. Grijalva-Noriega
Universidad de Sonora, México

Rogelio Monreal
Universidad de Sonora, México

Inocente G. Espinoza-Maldonado
Universidad de Sonora, México

Recepción: 02 Octubre 2017

Corregido: 24 Mayo 2018

Aprobación: 06 Junio 2018

RESUMEN:

La sucesión sedimentaria del Grupo Cabullona que aflora en la región de Naco en el noroeste de Sonora, fue acumulada en la parte norte de la cuenca del mismo nombre durante el Cretácico Tardío. Esta sucesión que alcanzan un espesor de 2.5 km y su edad se construye entre 73 y 72 Ma, se divide en varias formaciones que incluyen la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas. En este trabajo se reporta un estudio geoquímico de las areniscas de la Formación Corral de Enmedio y de la Arenisca Camas con el fin de interpretar su paleometeorización, procedencia y marco tectónico. El rango en los contenidos de Σ REE va de 96 a 144 ppm para las areniscas de la Formación Corral de Enmedio y de 74 a 169 ppm para las de la Arenisca Camas. Los diagramas de REE normalizados con condrita para las areniscas de ambas formaciones tienen patrones de enriquecimiento en LREE, un patrón relativamente plano para las HREE y anomalía negativa de Eu. Los valores de CIA y PIA y el diagrama A–CN–K indican que las areniscas de la Formación Corral de Enmedio se derivaron de un área fuente que estaba sujeta a un bajo grado de meteorización química, mientras que las de la Arenisca Camas revelan meteorización química de intensidad baja a moderada en el área fuente. Las relaciones $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, así como diagramas bivariados y ternarios, comparaciones de patrones REE con patrones de rocas fuentes y cálculos de mezcla indican que las areniscas de la Formación Corral de Enmedio fueron derivadas predominantemente de rocas fuente de composición félsicas con una menor contribución de rocas de composición química intermedia, pero los sedimentos de la Arenisca Camas fueron derivados de las rocas fuente de composición félsicas.

PALABRAS CLAVE: geoquímica, procedencia, paleometeorización, cuenca Cabullona, Sonora, México.

ABSTRACT:

The sedimentary sequence of the Cabullona Group deposited in the Cabullona basin during Late Cretaceous is well exposed in the Naco region of northeastern Sonora. It has been divided into various formations and the total thickness of this group is about 2.5 km with possible age of 72 Ma. Geochemical study was undertaken on the sandstones of the Corral de Enmedio Formation and the Camas Sandstone to determine the paleoweathering, provenance and tectonic setting. The Σ REE contents range from 96 to 144 ppm for the sandstones from Corral de Enmedio Formation and 74 to 169 ppm for the Camas Sandstone. The chondrite normalized REE diagrams for sandstones from both formations have LREE enriched, relatively flat HREE patterns with negative to positive Eu anomalies. The CIA and PIA values and A–CN–K diagram indicate that the sandstones of the Corral de Enmedio Formation were derived from the source area that was subjected to a low degree of chemical weathering, whereas the Camas Sandstone reveals low to moderate intensity of chemical weathering of the source area. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ratios, and various bivariate and ternary diagrams, comparison of REE patterns with source rocks, and mixing calculation of source rocks indicate that the sandstones of the Corral de Enmedio Formation were predominantly derived from felsic source rocks, with minor contribution from intermediate rocks, whereas the Camas Sandstone received sediments mainly from felsic source rocks.

KEYWORDS: geochemistry, provenance, paleoweathering, Cabullona basin, Sonora, Mexico.

INTRODUCCIÓN

Durante el Cretácico Tardío y hasta inicios del Cenozoico en el noroeste de México ocurrió una gran actividad magmática que fue producida por la subducción hacia el este de la placa oceánica Farallón debajo de la margen occidental de Norteamérica. Dicha actividad magmática que duro entre 90 y 40 Ma construyó en Sonora el arco magmático Laramide (Damon et al., 1983a, b), el cual está caracterizado por la secuencia volcanosedimentaria de la Formación Tarahumara (Wilson and Rocha, 1949; McDowell et al., 2001; González-León et al., 2011) y las rocas plutónicas contemporáneas conocidas como el Batolito de Sonora (Damon et al., 1983). Las condiciones geodinámicas de esta subducción, generó también un episodio compresivo conocido como la Orogenia Laramide (Coney, 1972; Coney and Reynolds, 1977; Dickinson and Snyder, 1978).

En este contexto tectónico, en el noreste de Sonora se desarrolló la cuenca Cabullona que representa un depocentro continental que se formó durante la Orogenia Laramide. Algunos trabajos sobre esta cuenca se han enfocado a estudiar su relleno sedimentario (Taliaferro, 1933; González-León and Lawton, 1995; McKee et al., 2005; González-León et al., 2017a), considerando principalmente en determinar su origen, estratigrafía y entorno tectónico regional. Sin embargo, un aspecto de interés en el análisis de antiguas cuencas sedimentarias que no ha sido atendido sobre el Grupo Cabullona, es un estudio geoquímico de sus rocas detríticas que determine la litología del área fuente y las condiciones de meteorización que prevalecieron al momento del depósito de esta sucesión sedimentaria.

Los estudios geoquímicos de esas rocas en cuencas antiguas se pueden utilizar para la reconstrucción del aporte de sus sedimentos, y determinar las condiciones de paleometeorización, tectonismo y paleoclimas que prevalecieron durante su depósito (Nesbitt y Young, 1982; Taylor y McLennan, 1985; Shao et al., 2012; Armstrong-Altrin et al., 2013; Madhavaraju, 2015; Madhavaraju et al., 2016a, 2017; Velmurugan et al., 2019). Las relaciones clave de elementos traza, elementos de tierras raras (REE), patrones de REE y magnitudes de anomalías de Eu, brindan información útil respecto a la procedencia de las rocas silicicásticas (Bhatia, 1985; Wronkiewicz y Condie, 1989; Feng y Kerrich, 1990; Cullers, 1995; Nath et al., 2000; Madhavaraju y Ramasamy, 2002; Spalletti et al., 2008; Madhavaraju y Lee, 2010; Armstrong-Altrin et al., 2013; Madhavaraju et al., 2016b, 2017).

Con el objetivo de evaluar las condiciones de paleometeorización y caracterizar la procedencia de dos de las unidades detríticas del Grupo Cabullona, en este estudio se utilizan los resultados de elementos mayores, elementos traza y REE obtenidos a partir del estudio de muestras de la Formación Corral de Enmedio y de la Arenisca Camas que afloran en la parte norte de la cuenca de Cabullona (Figura 1).

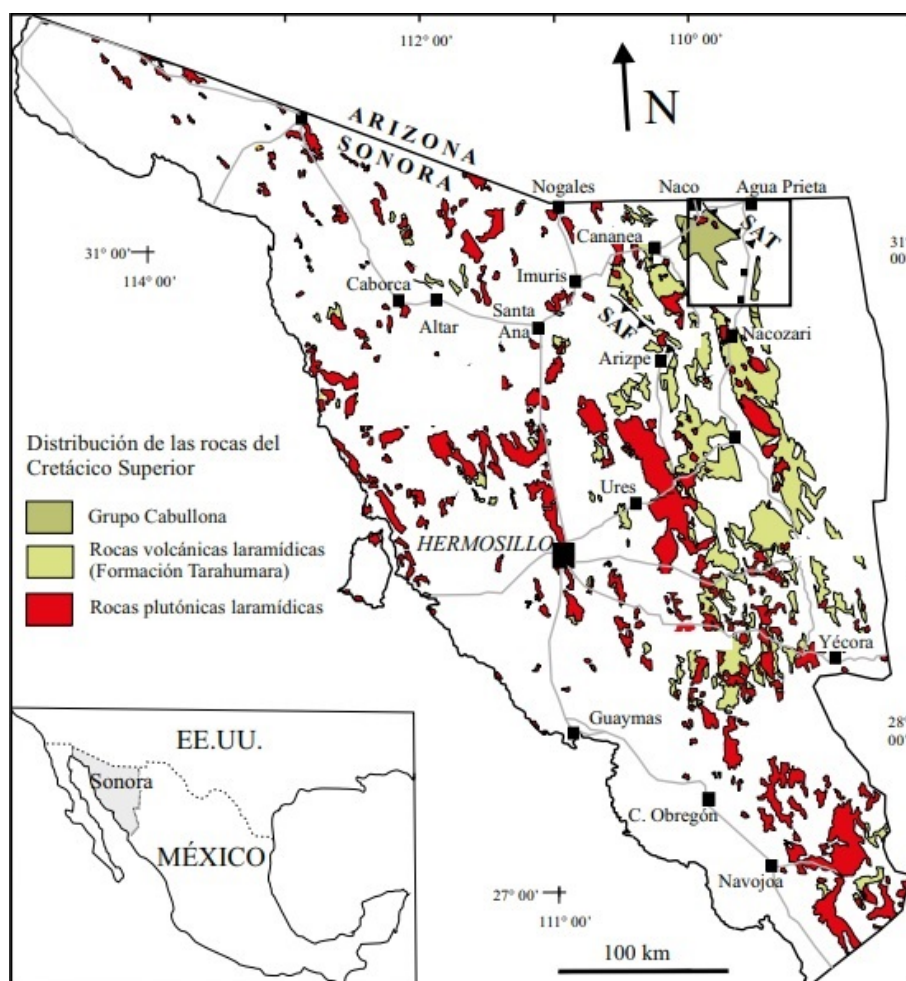


FIGURA 1

Mapa geología regional del área de estudio (modificado de González-León et al., 2017a).

GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA

Geología regional

El basamento paleoproterozoico del noreste de Sonora es parte de la Provincia Mazatzal del suroeste de Norteamérica, y está representado por el Esquito Pinal (Ransome, 1904; Eisele e Isachsen, 2001), una unidad metamórfica que en la sierra Los Ajos, al sur del área estudiada, presenta edades de entre 1.64 y 1.69 Ga (Anderson and Silver, 2005; Page et al., 2010; Solari et al., 2018). Discordantemente sobre este basamento se tienen rocas sedimentarias paleozoicas (Taliaferro, 1933; González-León, 1986), así como secuencias volcánicas y rocas intrusivas del Jurásico Medio y Superior. Las rocas del Grupo Bisbee (Jurásico Superior-Cretácico Inferior) se depositaron discordantemente sobre las rocas jurásicas y paleozoicas, y también mediante una discordancia, la base del Grupo Cabullona sobreyace al Grupo Bisbee (Taliaferro, 1933; Rangin, 1977; González-León et al., 2017a).

En el sureste de Arizona, la relación discordante entre el Grupo Bisbee y la Formación Fort Crittenden (Cretácico Superior) identificada por Hayes (1970) se generó debido a un pulso temprano hacia el este de la Orogenia Cordillerana (Drewes, 1991) entre el Campaniano y el Paleoceno (Clinkscales y Lawton, 2015; Amato et al., 2017), el acortamiento Laramide propicio el desarrollo de las cuencas de antepaís en Sonora,

Arizona y Nuevo México denominadas Cabullona, Fort Crittenden y Ringbone (Dickinson et al., 1989; Basabiltvazo, 2000), respectivamente. En un estudio regional reciente sobre la cuenca Cabullona, González-León et al. (2017a) midieron 6 secciones litoestratigráficas del Grupo Cabullona en el noreste de Sonora, las cuales, aunque no muestran una clara continuidad lateral y vertical entre las columnas obtenidas y no fueron divididas en formaciones, establecen claramente que la sedimentación fluvio-lacustre de este grupo se llevó a cabo entre los ca. 82 y 70 Ma.

Estratigrafía de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas en la sección Naco

La cuenca Cabullona se formó en el noreste de Sonora contemporáneamente a la migración hacia el este del arco magmático Laramide, localizado al oeste de la cuenca durante el Cretácico Tardío (González-León et al., 2017a). Inicialmente Taliaferro (1933) describió al Grupo Cabullona en la parte norte de la cuenca (sección Naco de González-León et al., 2017a) incluyendo a cinco formaciones, de la base a la cima: Snake Ridge, Arenisca Camas, Lutita Packard, Capas Rojas Superiores y Toba Riolítica. Posteriormente González-León y Lawton (1995) redefinieron a estas unidades como Corral de Enmedio, Arenisca Camas, Lutita Packard, Formación Lomas Coloradas y Conglomerado El Cemento. Almeida y Martínez (1982) realizaron un estudio palinológico en la secuencia de la cuenca Cabullona, en el cual determinaron una serie de palinomorfos que arrojaron una edad del Campaniano-Maastrichtiano, además definen un ambiente fluvio-lacustre dominante para estas rocas.

La Formación Corral de Enmedio (Figura 2) corresponde a la base del Grupo Cabullona en la sección Naco, sin embargo, su porción basal no se encuentra expuesta, por lo que el espesor mínimo medido de esta formación fue de 115 m (González-León, 1994; González-León et al., 2017a). Litológicamente está representada por una alternancia de lodolitas y limolitas heterogéneas cuya coloración varía de gris oscuro a rojizo; también se encuentran intercaladas con calizas con algunas estructuras estromatolíticas u oncolitos. Algunos espesores de la lodolita y limolita alcanzan los 7 metros y son de color gris rojizo, rojo negruzco y púrpura. Además, también está conformada por arenisca con estratificación cruzada y están fuertemente bioturbadas.

Una característica muy importante de la Formación Corral de En medio es el gran contenido de gasterópodos, pelecípodos, vértebras de peces, huesos de tortuga, ostrácodos y grandes huesos de dinosaurios, entre otros, que se encuentran muy bien preservados en los estratos de lodolita y limolita, y en estratos lenticulares de caliza. Se ha interpretado que el ambiente de depósito es lacustre, sin embargo, por el contenido de nódulos calcáreos que se presentan en las areniscas y limolitas, se ha sugerido también un ambiente de depósito fluvial (González-León y Lawton, 1995). La Formación Corral de Enmedio está sobreyacida por la Arenisca Camas de origen fluvial, por medio de una discordancia erosional. El espesor de la Arenisca Camas es de 620 m, y está constituida principalmente por arenisca con intercalaciones de limolita y lodolita, con una coloración gris oscuro a claro (Figura 2).

MÉTODOS Y MATERIALES

Se analizaron 27 muestras de arenisca (11 de la Formación Corral de Enmedio y 16 de la Arenisca Camas) para determinar concentraciones de óxidos mayores y elementos traza incluyendo tierras raras. Primeramente, las muestras se pulverizaron en un mortero de ágata y posteriormente fundidas a vidrio para su análisis de óxidos mayores en rocas total. Los análisis se llevaron a cabo en un espectrómetro de fluorescencia de rayos-X en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), siguiendo los procedimientos analíticos descritos en Lozano-Santacruz y Bernal (2005). En la rutina de análisis, se utilizó el estándar geoquímico JGB1 (GSJ) para monitorear la calidad de los datos. La

precisión de los análisis fue menor a $\pm 2\%$ para SiO_2 , Fe_2O_3 y CaO (1.24%, 0.73%, 1.52%, respectivamente) y menor que $\pm 5\%$ para Al_2O_3 , MgO y Na_2O (3.61%, 3.44%, 3.33% respectivamente). Los errores de precisión de MnO y P_2O_5 fueron más de $\pm 5\%$ (5.27%, 7.14%, respectivamente). También se calentó un gramo de muestra a 1000 °C en crisoles de porcelana durante 1 hora para medir la pérdida por ignición (loss on ignition, LOI por sus siglas en inglés).

La determinación de concentraciones de elementos traza se realizó en un equipo ICP-MS marca Thermo ICap QcICPMS en el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias (CGEO) de la UNAM, siguiendo los procedimientos analíticos descritos en Mori et al. (2007). Los resultados analíticos para el AGV-2, BCR-2 y BHVO-2 obtenidos en el presente estudio se comparan con los valores publicados por Govindaraju (1994). Los errores de precisión analítica para Ba, Zn, V, Sr, Zr, Nb, Ni y Rb fueron superiores a $\pm 4\%$, mientras para Sc, Cr, Cu, Y y Pb superaron el $\pm 10\%$. Para elementos de tierras raras como La, Ce, Pr, Sm, Gd, Dy, Ho, Er y Lu fueron mejores que $\pm 4\%$, y en el caso de Nd, Eu, Tb e Yb resultaron por debajo del $\pm 6\%$. Los elementos de tierras raras se normalizaron con valores de condrito reportados en McDonough y Sun (1995), la anomalía de Eu (Eu/Eu^*) se calculó utilizando la fórmula $\text{Eu}/\text{Eu}^* = \text{Eu}_c/(\text{Sm}_c * \text{Gd}_c)^{1/2}$, donde c es el valor normalizado a condrito.

RESULTADOS

Óxidos mayores

Las concentraciones de óxidos mayores de las areniscas de las unidades estudiadas se presentan en la Tabla 1. La concentración de SiO_2 varía de 64.7 a 72.6% en las muestras de la Formación Corral de Enmedio, y de 62.2 a 81.5% en las muestras de la Arenisca Camas, las primeras tienen contenidos mayores de Al_2O_3 (11.24–13.17) que las segundas (7.73–11.5%). Se observa un empobrecimiento de las concentraciones de K_2O respecto al Na_2O en ambas formaciones, lo que se atribuye a la reducción de feldespato K con respecto a la plagioclasa, así como grandes variaciones en los contenidos de CaO (2.50–6.98%; 0.49–12.30%; respectivamente). El enriquecimiento de CaO así como su significativa correlación CaO y LOI en las areniscas de estas formaciones ($r = 0.90$, $n = 11$; $r = 0.97$, $n = 16$; respectivamente), sugiere que los valores de CaO están incorporados en la calcita más que en la plagioclasa. El MgO , MnO , TiO_2 y P_2O_5 son constituyentes menores en las areniscas estudiadas.

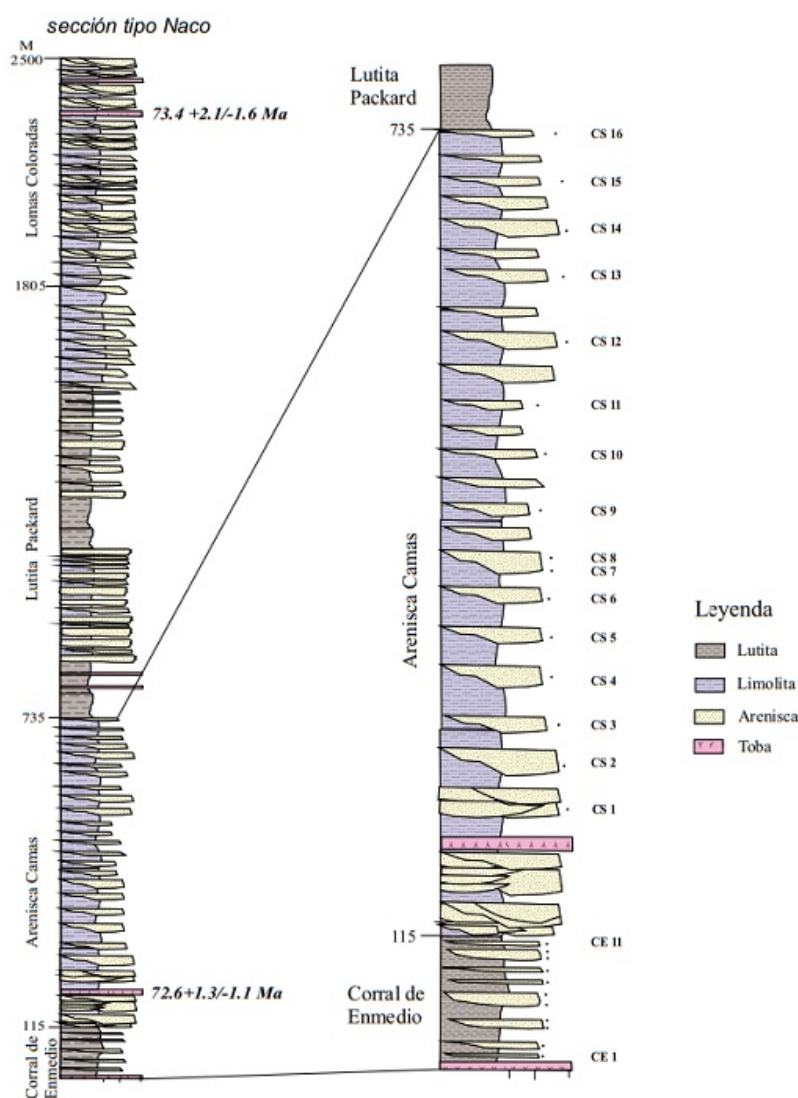


FIGURA 2

Columna estratigráfica de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas (modificada de González-León et al., 2017a).

Elementos traza y tierras raras

Las concentraciones de elementos trazas incluyendo tierras raras de las areniscas de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas se muestran en las Tablas 2 y 3. Los patrones de elementos traza normalizados con valores de corteza continental superior (Upper Continental Crust, UCC, por sus siglas inglés) se muestran en la gráfica de la Figura 3. En comparación con UCC: a) en el diagrama se observa empobrecimiento de Sc, V, Cr, Co, Ni, Rb, Sr, Nb, Pb y Th en la mayoría de las muestras; b) dos muestras de areniscas de la Formación Corral de Enmedio presentan un ligero enriquecimiento de Sr; c) los contenidos de Y y U están empobrecidos; y d) los contenidos de Zr, Ba y Hf están ligeramente empobrecidos a enriquecidos en las areniscas estudiadas. Destaca la baja correlación de Al_2O_3 contra V, Sc y Cr para las areniscas de la Formación Corral de Enmedio ($r = 0.06, 0.26, -0.01, n = 11$) y la Arenisca Camas ($r = -0.40, 0.29, 0.19, n = 16$) esto sugiere que estos elementos están principalmente hospedados en los filosilicatos (Ramachandran et al., 2016). Un gran número de muestras están enriquecidas en contenidos de Zr con respecto a UCC (190 ppm),

con variaciones en rangos muy amplios en la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas (121-737 ppm; 37-630 ppm; respectivamente).

TABLA 1
Concentración de óxidos mayores (%) en las muestras de areniscas de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas.

	Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PPC	Total	ICV	CIA	PIA	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	K ₂ O/Al ₂ O ₃	K ₂ O/Na ₂ O
Formación Corral de Enmedio	CE1	70.48	0.33	12.03	2.63	0.06	0.46	4.07	4.27	0.92	0.07	4.81	100.13	1.06	44	43	5.86	0.08	0.22
	CE2	67.17	0.54	13.06	3.83	0.06	1.57	3.91	3.18	1.42	0.11	5.13	99.98	1.11	48	48	5.14	0.11	0.45
	CE3	70.33	0.43	11.57	3.14	0.05	1.24	3.48	3.01	1.29	0.09	5.14	99.78	1.09	48	47	6.08	0.11	0.43
	CE4	71.58	0.53	11.24	3.5	0.07	1.33	3.62	3.61	0.76	0.1	3.56	99.9	1.19	46	45	6.37	0.07	0.21
	CE5	64.68	0.88	11.65	4.8	0.13	1.84	5.61	2.28	0.99	0.13	6.84	99.82	1.42	57	57	5.55	0.08	0.43
	CE6	70.57	0.43	11.5	3.16	0.07	1.01	4.22	3.61	0.76	0.08	4.77	100.17	1.15	44	44	6.14	0.07	0.21
	CE7	71.31	0.44	12.29	3.02	0.05	1.17	3.27	2.92	1.12	0.09	4.65	100.33	0.97	51	51	5.8	0.09	0.38
	CE8	65.27	0.42	11.62	3.11	0.12	1.17	6.98	2.64	1.01	0.09	7.67	100.1	1.33	53	53	5.62	0.09	0.38
	CE9	66.96	0.51	11.49	3.67	0.08	1.17	5.37	2.33	1.1	0.09	7.24	100.02	1.24	44	43	5.83	0.1	0.47
	CE10	66.04	0.54	13.17	4.35	0.08	1.27	4.43	2.04	1.56	0.1	6.6	100.17	1.08	50	50	5.01	0.12	0.76
	CE11	72.6	0.463	11.8	3.21	0.065	1.11	2.5	4.29	0.84	0.088	3	100	1.06	49	48	6.15	0.07	0.2
	Media	68.8 ±2.8	0.50 ±0.14	12 ±0.6	3.5 ±0.6	0.08 ±0.02	1.21 ±0.34	4.31 ±1.25	3.11 ±0.77	1.07 ±0.26	0.10 ±0.01	5.40 ±1.50	100.04 ±0.16	1.16 ±0.13	48 ±4	48 ±4	5.78 ±0.42	0.09 ±0.02	0.38 ±0.17
Arenisca Camas	CS1	69.6	0.43	11.1	3.7	0.09	0.58	4.25	3.16	0.97	0.08	5.43	99.4	1.19	44	43.75	6.27	0.09	0.31
	CS2	70.2	0.36	12	2.8	0.05	0.64	3.84	3.32	1.33	0.08	4.74	99.4	1.03	46	45.91	5.85	0.11	0.4
	CS3	74.87	0.23	9.23	1.85	0.05	0.31	4.74	2.03	1.75	0.05	5.07	100.18	1.19	40	38	8.11	0.19	0.86
	CS4	73	0.31	11.5	2.25	0.05	0.6	2.68	4.49	1.16	0.07	3.12	99.2	1	46	46	6.35	0.1	0.26
	CS5	77.9	0.3	9.72	2.03	0.05	0.35	2.16	2.51	1.27	0.06	3.39	99.7	0.89	51	51	8.01	0.13	0.51
	CS6	81.81	0.29	9.51	1.96	0.04	0.23	0.49	2.18	1.6	0.06	2	100.16	0.71	61	64	8.6	0.17	0.73
	CS7	62.2	0.21	8.03	1.36	0.12	0.54	12.3	2.3	1.29	0.06	10.8	99.3	2.26	46	45	7.75	0.16	0.56
	CS8	79.91	0.28	9.01	2.07	0.03	0.18	2	1.89	1.5	0.06	3.19	100.12	0.88	52	52	8.87	0.17	0.79
	CS9	70.26	0.6	10.28	4.47	0.12	1.15	4.37	2.5	1.01	0.09	5.22	100.07	1.38	44	43	6.83	0.1	0.41
	CS10	81.47	0.33	8.95	2.23	0.03	0.31	0.32	2.08	1.34	0.04	3	100.1	0.74	62	65	9.1	0.15	0.64
	CS11	80.52	0.4	9	2.63	0.06	0.51	0.76	2.18	1.55	0.06	1.85	99.52	0.9	58	60	8.94	0.17	0.71
	CS12	76.02	0.5	9.89	3.58	0.05	0.08	2.45	1.63	1.8	0.08	4.05	100.13	1.02	52	53	7.69	0.18	1.1
	CS13	79.4	0.43	7.95	2.66	0.05	0.84	2.79	2.26	0.65	0.06	3.19	100	1.22	46	45	9.99	0.08	0.29
	CS14	79.5	0.38	7.92	2.48	0.04	0.83	2.72	2.32	0.65	0.06	3.05	99.9	1.19	46	45	10.04	0.08	0.28
	CS15	77.7	0.32	9.72	2.05	0.04	1.06	2.1	2.56	0.97	0.05	3.09	99.7	0.94	52	52	7.99	0.1	0.38
	CS16	78.5	0.18	7.73	1.03	0.04	0.57	4.21	2.56	0.63	0.04	4.27	99.8	1.19	38	37	10.16	0.08	0.25
	Media	75.8 ±5.4	0.35 ±0.11	9.5 ±1.3	2.5 ±0.9	0.06 ±0.03	0.55 ±0.31	3.26 ±2.78	2.50 ±0.68	1.22 ±0.38	0.06 ±0.01	4.09 ±2.09	99.79 ±0.34	1.11 ±0.36	49 ±7	49 ±8	8.16 ±1.35	0.13 ±0.04	0.53 ±0.26

Los contenidos Σ REE tienen un rango de 95.75 a 144.47 ppm (promedio 116 ± 17 , $n=11$) para las areniscas de la Formación Corral de Enmedio, y 74.47 a 169.41 ppm (promedio 121 ± 27 , $n=16$) para la Arenisca Camas. Los contenidos de Σ REE en ambas unidades no tienen correlación con Al_2O_3 ($r = -0.17$, $n=11$; $r = 0.08$, $n=16$; respectivamente), ni con Zr ($r = 0.33$, $n=11$; $r = 0.12$, $n=16$; respectivamente), esto implica que las REE no están hospedadas en los minerales de arcilla ni en minerales accesorios como circón (Yu et al., 2016). Sin embargo, los contenidos de Σ REE muestran correlación positiva con TiO_2 ($r = 0.59$, $n=11$; $r = 0.65$, $n=16$; respectivamente), Fe_2O_3 ($r = 0.51$, $n=11$; $r = 0.61$, $n=16$; respectivamente) e Y ($r = 0.35$, $n=11$; $r = 0.70$, $n=16$; respectivamente), sugiriendo como portadores o anfitriones a minerales pesados como ilmenita, magnetita y xenotima (Armstrong-Altrin et al., 2015).

En los diagramas de patrones REE normalizados con condrita (McDonough y Sun, 1995) para las areniscas estudiadas (Figura 4), se observan patrones de enriquecimiento en LREE (La_n/Sm_n : 3.52–4.32; 3.13–4.78; respectivamente), un plano en HREE (Gd_n/Yb_n : 1.24–1.79; 1.17–1.91; respectivamente) con anomalías negativas apositivas de Eu (Eu/Eu^* : 0.75–1.11; 0.68–1.19; respectivamente). Las anomalías positivas de Eu se presentan en una muestra de la Formación Corral de Enmedio (CE1, Eu/Eu^* : 1.11) y en tres muestras de la Arenisca Camas (CS1, CS2 y CS4, Eu/Eu^* : 1.27, 1.15, 1.19; respectivamente). El promedio

de la anomalía de Eu de las areniscas de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas (0.83 ± 0.1 , $n=11$; 0.84 ± 0.2 , $n=16$; respectivamente) son mayores que el valor de UCC (UCC: 0.63).

DISCUSIÓN

Paleometeorización

La intensidad de meteorización en rocas sedimentarias ya ha sido evaluada investigando la relación entre elementos alcalinos y alcali- notérreos (Nesbitt y Young 1982). Durante la meteorización, óxidos mayores como el Na, Ca y K son fácilmente lixiviados de los perfiles de meteorización, mientras los elementos insolubles como el Al son generalmente fijados en estos (Nesbitt et al., 1980; Nesbitt y Young, 1984; Taylor y McLennan, 1985; Roddaz et al., 2006).

Los índices de meteorización más utilizados y más ampliamente aceptados son: el Índice Químico de Alteración (CIA = $[\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$; proporción molecular; de Nesbitt y Young, 1982) y el Índice de Alteración de Plagioclasas (PIA = $[(\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O})] \times 100$; Fedo et al., 1995), por tal motivo son los que se utilizan en este estudio para inferir las condiciones de paleometeorización. El CaO^* representa la concentración de Ca solamente en los minerales silicatados. El contenido de CaO^* fue calculado usando el método propuesto por McLennan et al. (1993), en el cual los valores de CaO fueron aceptados solamente si el $\text{CaO} < \text{Na}_2\text{O}$, en los casos en que el $\text{CaO} > \text{Na}_2\text{O}$, se asume que la concentración de estos óxidos es igual.

TABLA 2
Concentraciones de elementos traza (ppm) areniscas de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas.

	Muestra	Sc	V	Cr	Co	Ni	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Pb	Th	U	Cr/V	Y/Ni	Th/U	Rb/Sr
Formación Corral de Enmedio	CE1	2.57	44.85	14.39	5.36	7	26.5	395.29	16.99	142.23	8.21	3250.22	3.26	11.11	7.08	2.11	0.32	2.43	3.36	0.07
	CE2	6.47	63.34	31.42	7.21	12.86	43.1	313.65	17.18	182.63	12.99	2145	4.36	16.9	8.87	2.65	0.5	1.34	3.35	0.14
	CE3	5.09	47.82	23.48	5.27	9.63	39.56	245.81	16.66	220.48	10.11	851.33	5.19	12.91	6.96	2.2	0.49	1.73	3.17	0.16
	CE4	4.93	50.85	28.87	6.77	10.46	20.25	252.37	19.72	126.64	12.68	435.24	3.16	18.44	9.06	2.89	0.57	1.89	3.14	0.08
	CE5	8.6	99.85	67.38	11.35	14.15	38.29	254.26	24.69	737.18	17.55	806.35	14.92	16.4	11.1	11.7	0.67	1.74	0.95	0.15
	CE6	2.88	58.27	19.88	7.25	8.92	30.31	360.68	14.87	137.21	10.72	305.62	3.32	13.15	9.29	2.19	0.34	1.67	4.24	0.08
	CE7	4.29	52.69	22.18	7.23	11.66	31.08	228.59	15.95	136.8	10.6	1458.45	3.37	6.75	8.34	1.94	0.42	1.37	4.29	0.14
	CE8	5.42	46.33	22.36	7.64	10.9	37.97	225.6	17.07	120.6	10.08	1050.33	3.04	10.85	7.57	1.7	0.48	1.57	3.49	0.17
	CE9	4.81	65.45	34.06	7.99	11.05	39.31	195.15	16.57	337.97	11.39	1202.15	7.57	11.91	9.31	2.44	0.52	1.5	3.82	0.2
	CE10	6.38	61.2	30.35	8.3	12.94	49.52	161.77	21.34	162.31	12.46	740.51	3.96	10.77	8.8	2.38	0.5	1.65	3.69	0.31
	CE11	3.24	37.06	5.98	6.72	10.02	31.21	279.94	13.86	185.3	6.67	264.8	4.17	8.98	7.72	2.33	0.16	1.38	3.31	0.11
	Media	4.97	57	27	7.37	10.87	35	265	17.72	1226	11.22	1137	5.12	12.56	8.55	3.18	0.45	1.66	3.34	0.15
		± 1.77	± 17	± 16	± 1.63	± 2.02	± 8	± 69	± 3.09	± 180	± 2.83	± 888	± 3.50	± 3.52	± 1.20	± 2.84	± 0.14	± 0.31	± 0.89	± 0.07
Arenisca Camas	CS1	3.08	44.25	5.86	8.51	10.33	33.61	229.65	14.45	136.46	7.59	2371.96	4.35	13.18	8.43	2.36	0.13	1.4	3.56	0.15
	CS2	2.85	32.69	4.45	6.97	11.94	40.09	196.74	12.28	207.38	7.82	1509.18	5.23	11.46	6.46	2.87	0.14	1.03	2.25	0.2
	CS3	3.21	26.65	9.8	4.39	5.21	63.37	129.92	11.74	144.94	7.11	603.12	3.42	9.44	5.9	1.75	0.37	2.26	3.37	0.49
	CS4	2.66	31.95	2.9	4.63	7.46	38.1	152.87	12.83	202.05	7.35	1606.42	4.86	8.01	8.32	2.52	0.09	1.72	3.3	0.25
	CS5	1.52	25	1.67	6.39	5.44	44.52	59.91	9.69	191.49	7.05	166.68	4.81	9.18	5.33	1.99	0.07	1.78	2.69	0.74
	CS6	4	33.26	10.25	3.24	3.86	56.78	91.79	13.28	98.95	8.69	466.12	2.44	9.98	6.55	2.28	0.31	3.44	2.88	0.62
	CS7	2.12	17.19	1.88	3.74	6.76	46.05	143.74	11.24	89.11	3.31	365.04	1.76	35.28	3.82	2.09	0.11	1.66	1.83	0.32
	CS8	3.7	30.33	10.86	3.42	4.01	53.27	98.72	12.13	150.48	8.49	1216.22	3.5	11.7	6.65	1.66	0.36	3.02	4	0.54
	CS9	3.57	67.76	25.64	8.72	10.12	37.77	126.03	17.47	198.96	12.79	286.33	5.35	18.36	8.84	2.71	0.38	1.73	3.26	0.3
	CS10	2.38	23.1	8.26	3.48	3	55.99	71.56	9.35	86.33	6.61	335.93	2.14	9.87	5.48	1.56	0.36	3.11	3.52	0.78
	CS11	4.25	45.26	11.36	3.78	4.91	51.15	89.16	22.34	215.38	10.45	401.74	5	11.59	7.85	2.08	0.25	4.55	3.77	0.57
	CS12	4.83	56.97	22.34	4.1	5.09	65.86	74.48	22.53	629.82	12.43	340.17	13.39	14.99	9.69	3.12	0.39	4.42	3.11	0.88
	CS13	2.37	34.64	3.39	4.29	4.67	26.16	143.8	15.27	37.06	1.91	264.47	1.57	9.03	8.11	2.14	0.1	3.27	3.79	0.18
	CS14	2.31	30.57	2.16	4.08	4.3	23.98	140.58	14	280.56	3.99	133.5	4.62	7.98	6.89	1.93	0.07	3.26	3.58	0.17
	CS15	1.81	25.58	3.22	4.65	5.23	22.42	119	9.54	355.73	5.1	161.56	7.86	6.68	2.42	1.22	0.13	1.83	1.98	0.19
	CS16	1.05	11.17	1.89	1.93	2.95	23.45	127.15	9.94	84.17	2.62	130.44	2.08	6	5.9	1.28	0.17	3.37	4.59	0.18
	Media	2.86	34	8	4.77	5.96	43	125	13.63	194	7.08	647	4.52	12.04	6.66	2.10	0.21	2.62	3.22	0.41
		± 1.03	± 14	± 7	± 1.90	± 2.69	± 14	± 45	± 4.10	± 141	± 3.19	± 663	± 2.90	± 6.94	± 1.89	± 0.54	± 0.13	± 1.08	± 0.74	± 0.25

Los valores CIA y PIA entre ~50–60 indican una meteorización baja, entre ~60–80 una meteorización moderada, y >80 representa una meteorización intensa (Nesbitt and Young, 1982). Los valores CIA y PIA de las muestras de la Arenisca Camas (40–62; 38–65; respectivamente) son ligeramente altos que los de la Formación Corral de Enmedio (44–57; 43–57; respectivamente), revelando que estas últimas fueron derivadas de un área fuente expuesta a bajo grado de meteorización química, mientras que las de la Arenisca Camas revelan una intensidad baja a moderada en el área fuente.

Los valores de CIA se muestran en el diagrama ternario $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{K}_2\text{O}$ (A–CN–K) de Nesbitt y Young (1982), el cual es muy útil para mostrar tendencia de meteorización en rocas siliciclásticas (Figura 5). Para objeto de comparación, se muestra la composición promedio de posibles fuentes como riolita, andesita, granitos y granodioritas (González-León et al., 2017b), UCC y PAAS (Taylor y McLennan 1985), y basalto (Condie, 1993). En el diagrama A–CN–K, la totalidad de las muestras estudiadas se grafican paralelas a la línea A–CN (Figura 6). La mayoría de las areniscas de la Formación Corral de Enmedio se grafican cercanas a la línea de feldespatos K y plagioclasas, sugiriendo un bajo grado de meteorización química en el área fuente. Sin embargo, las muestras de la Arenisca Camas presentan una mayor dispersión respecto a la línea mencionada, lo cual sugiere que los sedimentos de la Arenisca Cama se derivan de rocas fuente afectadas por meteorización de baja a moderada.

La intensidad de meteorización y la composición de rocas siliciclásticas están controladas de manera destacada por el clima y el ambiente tectónico. Una región fuente tectónicamente activa tiene regularmente baja intensidad de meteorización química y una tasa alta de erosión física (Nesbitt et al., 1997). Las arenas producidas bajo condiciones de meteorización en estado sostenido (steady-state weatering) con las mismas zonas mineralógicas expuestas en la región fuente, siempre se graficará como un grupo compacto de datos sobre el diagrama A–CN–K; mientras que las arenas derivadas bajo condiciones de meteorización no permanente o in-sostenida (non-steady-state weatering) y con diferentes zonas mineralógicas fuente, se graficarán como un conjunto de datos más dispersos en el mismo diagrama (Nesbitt et al. 1997). En el presente estudio, los datos para las areniscas de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas muestran una dispersión considerable en el diagrama A–CN–K, sugiriendo que las regiones fuente experimentaron condiciones de meteorización no permanente o no-sostenida y que los sedimentos fueron aportados por zonas con diferente mineralogía (p.e. varios tipos de rocas).

TABLA 3
Concentración de elementos tierras raras (ppm) en las muestras de areniscas de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas.

	Muestra	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	ΣREE	Eu/Eu*	La/Sc	La/Co	Th/Sc	Th/Co	Cr/Th	(La/Yb) _n	(La/Sm) _n	(Gd/Yb) _n
Formación Corral de Enmedio	CE1	20.67	38.02	4.65	17.3	3.46	1.19	3.11	0.48	2.81	0.57	1.59	1.65	0.25	95.75	1.11	8.05	3.85	2.76	1.32	2.03	8.5	3.73	1.52
	CE2	23.14	44.18	5.62	19.89	4.02	1.09	3.39	0.52	3.13	0.61	1.76	1.75	0.28	109.38	0.9	3.58	3.21	1.37	1.23	3.54	8.97	3.59	1.57
	CE3	21.25	37.18	4.87	17.85	3.45	0.86	3.04	0.46	2.73	0.56	1.6	1.69	0.26	95.8	0.81	4.18	4.03	1.37	1.32	3.37	8.52	3.85	1.45
	CE4	32.61	53.67	7.06	25.35	4.8	1.09	4.13	0.6	3.42	0.67	1.86	1.86	0.28	137.42	0.75	6.61	4.82	1.84	1.34	3.19	11.89	4.24	1.79
	CE5	27.74	57.85	6.76	23.63	4.78	1.15	4.23	0.68	4.37	0.87	2.65	2.77	0.46	137.94	0.78	3.23	2.44	1.29	0.98	6.07	6.8	3.62	1.24
	CE6	24.94	50.78	5.8	20.17	3.9	0.89	3.25	0.49	2.89	0.56	1.62	1.63	0.26	117.19	0.76	8.66	3.44	3.23	1.28	2.14	10.37	4	1.61
	CE7	22.07	40	5.13	18.68	3.54	0.89	3.05	0.46	2.72	0.55	1.58	1.66	0.25	100.6	0.83	5.14	3.05	1.94	1.15	2.66	9.02	3.89	1.49
	CE8	24.72	46.37	5.45	20.09	3.83	0.99	3.33	0.5	2.89	0.58	1.63	1.64	0.25	112.27	0.85	4.56	3.24	1.39	0.99	2.95	10.21	4.03	1.64
	CE9	21.14	46.17	5.31	18.77	3.75	0.93	3.24	0.51	3.14	0.61	1.82	1.9	0.31	107.59	0.82	4.39	2.64	1.94	1.17	3.66	7.56	3.52	1.38
	CE10	27.14	48.77	6.19	22.62	4.37	1.05	3.92	0.59	3.53	0.71	2	2.01	0.3	123.22	0.78	4.25	3.27	1.38	1.06	3.45	9.17	3.88	1.58
	CE11	31.73	59.38	6.65	25.2	4.59	1.21	5.25	0.68	3.81	0.77	2.41	2.43	0.37	144.47	0.75	9.8	4.72	2.38	1.15	0.77	8.88	4.32	1.75
	Media	25.2	47.5	5.8	20.9	4.04	1.03	3.63	0.54	3.22	0.64	1.87	1.91	0.30	117	0.83	5.68	3.52	1.90	1.18	3.08	9.08	3.88	1.55
		±4.2	±7.5	±0.8	±2.9	±0.51	±0.13	±0.69	±0.08	±0.52	±0.10	±0.36	±0.37	±0.06	±17	±0.10	±2.24	±0.77	±0.65	±0.13	±1.31	±1.38	±0.26	±0.16
Arenisca Camas	CS1	33.69	64.24	7.05	26.85	4.71	2.1	5.43	0.72	4.04	0.8	2.54	2.62	0.4	155.19	1.27	10.95	3.96	2.74	0.99	0.7	8.75	4.46	1.68
	CS2	25.17	51.27	5.51	21.16	3.88	1.57	4.47	0.6	3.44	0.7	2.21	2.27	0.34	122.58	1.15	8.82	3.61	2.26	0.93	0.69	7.52	4.05	1.59
	CS3	17.21	36.8	4.2	14.72	2.81	0.71	2.4	0.37	2.22	0.44	1.3	1.34	0.22	84.75	0.84	5.36	3.92	1.84	1.34	1.66	8.72	3.83	1.44
	CS4	27.21	51.53	5.48	20.23	3.55	1.49	4.11	0.55	3.29	0.67	2.14	2.28	0.35	122.88	1.19	10.22	5.88	3.13	1.8	0.35	8.09	4.78	1.46
	CS5	23.57	46.68	5.06	18.97	3.31	0.87	3.71	0.47	2.7	0.55	1.78	1.89	0.29	109.85	0.75	15.51	3.69	3.51	0.83	0.31	8.46	4.45	1.59
	CS6	24.95	48.6	5.8	20.01	3.74	0.82	2.99	0.44	2.54	0.48	1.4	1.39	0.22	113.37	0.75	6.23	7.7	1.64	2.02	1.57	12.24	4.17	1.75
	CS7	27.55	51.39	5.78	22.49	4.01	1.13	4.63	0.57	3.15	0.62	1.9	1.96	0.3	125.48	0.8	12.97	7.36	1.8	1.02	0.49	9.54	4.29	1.91
	CS8	22.06	47.56	5.33	18.22	3.41	0.83	2.73	0.41	2.43	0.47	1.4	1.43	0.23	106.52	0.83	5.96	6.45	1.79	1.94	1.63	10.47	4.04	1.54
	CS9	33.52	60.65	6.96	24.59	4.49	0.95	3.82	0.56	3.1	0.61	1.7	1.81	0.28	143.05	0.7	9.39	3.85	2.48	1.01	2.9	12.56	4.66	1.71
	CS10	15.57	32.65	3.7	12.93	2.38	0.58	1.94	0.29	1.73	0.36	1.04	1.1	0.18	74.47	0.82	6.55	4.47	2.31	1.57	1.51	9.58	4.08	1.42
	CS11	35.01	60.23	7.72	27.07	4.79	1	4.14	0.61	3.52	0.7	1.97	1.98	0.3	149.04	0.69	8.25	9.26	1.85	2.08	1.45	12.04	4.56	1.69
	CS12	31.16	59.15	6.92	24.35	4.41	0.92	3.81	0.59	3.61	0.77	2.31	2.63	0.42	141.04	0.68	6.45	7.6	2	2.36	2.31	8.05	4.42	1.17
	CS13	36.67	71.09	7.85	29.8	5.22	1.28	5.94	0.76	4.23	0.85	2.6	2.7	0.42	169.41	0.7	15.47	8.54	3.42	1.89	0.42	9.23	4.38	1.78
	CS14	29.69	59.03	6.47	24.54	4.38	1.05	5.07	0.65	3.77	0.76	2.39	2.5	0.4	140.69	0.68	12.85	7.28	2.98	1.69	0.31	8.05	4.24	1.64
	CS15	15.09	38.43	3.76	15.13	3.01	0.8	3.6	0.48	2.8	0.58	1.86	2.08	0.32	87.95	0.74	8.36	3.74	1.34	0.52	1.33	4.93	3.13	1.4
	CS16	19.91	37.94	4.32	16.78	2.95	0.81	3.42	0.44	2.51	0.52	1.68	1.83	0.28	93.38	0.77	19.02	10.3	5.63	3.05	0.32	7.4	4.22	1.52
	Media	26.1	51.1	5.7	21.1	3.82	1.06	3.89	0.53	3.07	0.62	1.89	1.99	0.31	121	0.84	10.15	6.07	2.54	1.57	1.12	9.10	4.24	1.58
		±6.9	±10.9	±1.3	±4.9	±0.81	±0.39	±1.08	±0.13	±0.69	±0.14	±0.46	±0.50	±0.08	±27	±0.19	±4.03	±2.29	±1.05	±0.67	±0.79	±1.99	±0.39	±0.18

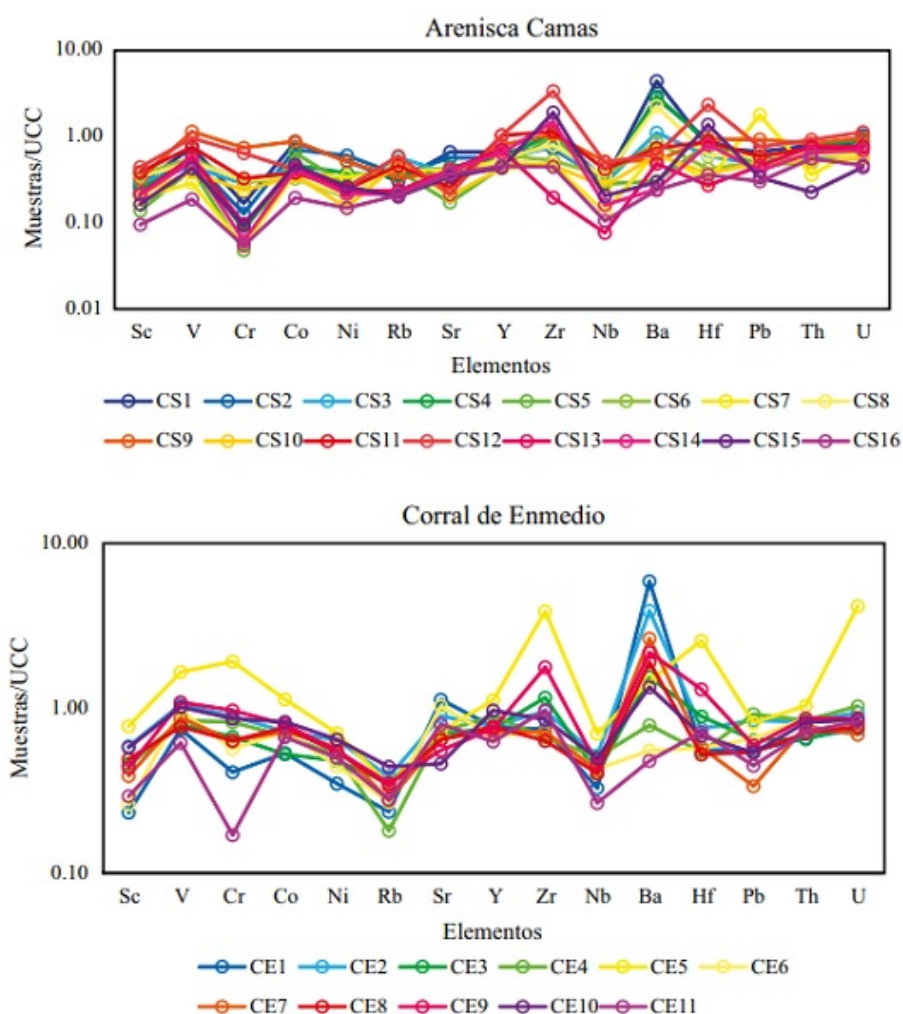


FIGURA 3

Diagrama de elementos traza normalizados con Upper Continental Crust (UCC) para areniscas de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas.

Procedencia

La relación $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ de rocas sedimentarias se puede utilizar para inferir procedencia, ya que esta relación no cambia significativamente durante la meteorización, transporte, depósito y diagénesis de sedimentos clásticos (Hayashi et al., 1997), comportándose generalmente de manera muy similar con relación a la roca madre. Para las rocas máficas esta relación varía de 3 a 8 para rocas máficas, entre 8 y 21 para intermedias, y de 21 a 70 para las félsicas (Hayashi et al., 1997). Las areniscas de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas muestran una mayor relación de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (13–36; 17–44; respectivamente), lo que indica que estos sedimentos predominantemente se derivaron de rocas félsicas, con una menor contribución de rocas de composición intermedia.

Los patrones de REE y la magnitud de la anomalía de Eu en las rocas sedimentarias pueden ser considerados un importante indicio para descifrar las firmas de las rocas de origen (Taylor y McLennan, 1985; Madhavaraju y Lee, 2010; Armstrong-Altrin et al., 2013). Los patrones de REE normalizados a condrito de las muestras estudiadas son fraccionados, con patrones de LREE enriquecidas y de HREE suaves con anomalías negativas a positivas de Eu (Figura 4), sugiriendo que el área de aporte originalmente era de

composición félsica. Una muestra de la Formación Corral de Enmedio y tres de la Arenisca Camas muestran anomalías positivas de Eu. Esto puede ser debido al enriquecimiento de granos de plagioclasa de fuentes volcánicas en la proximidad al área fuente (Bhatia, 1985; McLennan, 1989). Aun cuando los patrones de REE de ambas formaciones son similares, las diferencias aparecen en la abundancia de los elementos trazas sensibles a la procedencia. Los elementos Ti, Sc, V y Na principalmente se asocian a líticos de granos volcánicos máficos y sus abundancias en las rocas siliciclásticas sugieren aporte de materiales de arco de isla y continental (Bhatia y Crook, 1986; McLennan et al., 1990). Las concentraciones de Sc, V, Cr, Co y Ni son más altas en la Formación Corral de Enmedio en comparación con la Areniscas Camas; mientras que las relaciones La/Sc, Th/Sc, La/Co, Th/Co y Cr/Th (Tabla 4), se presentan a la inversa, más altas en la Arenisca Camas que en la Formación Corral de Enmedio, esto sugiere que el aporte de sedimentos de rocas félsicas es mayor en las areniscas de la primera unidad.

La composición de la roca fuente para las areniscas de estas formaciones se puede evaluar utilizando diagramas ternarios V–Ni–Th*10, ya que son útiles para inferir el aporte relativo de materiales félsicos y máficos en la cuenca sedimentaria. En el diagrama de la Figura 6, las areniscas estudiadas se sitúan más cerca del vértice Th*10, lo que sugiere una naturaleza félsica de las rocas fuente. Además, en la gráfica bivariada La/Th vs. Hf (Figura 7), también utilizada para discriminar entre diversas composiciones de roca fuente (Floyd y Leveridge, 1987), puede verse que la mayoría de las areniscas son graficadas en la fuente félsica, con pocas muestras ubicadas en el arco andesítico y campos de sedimentos antiguos.

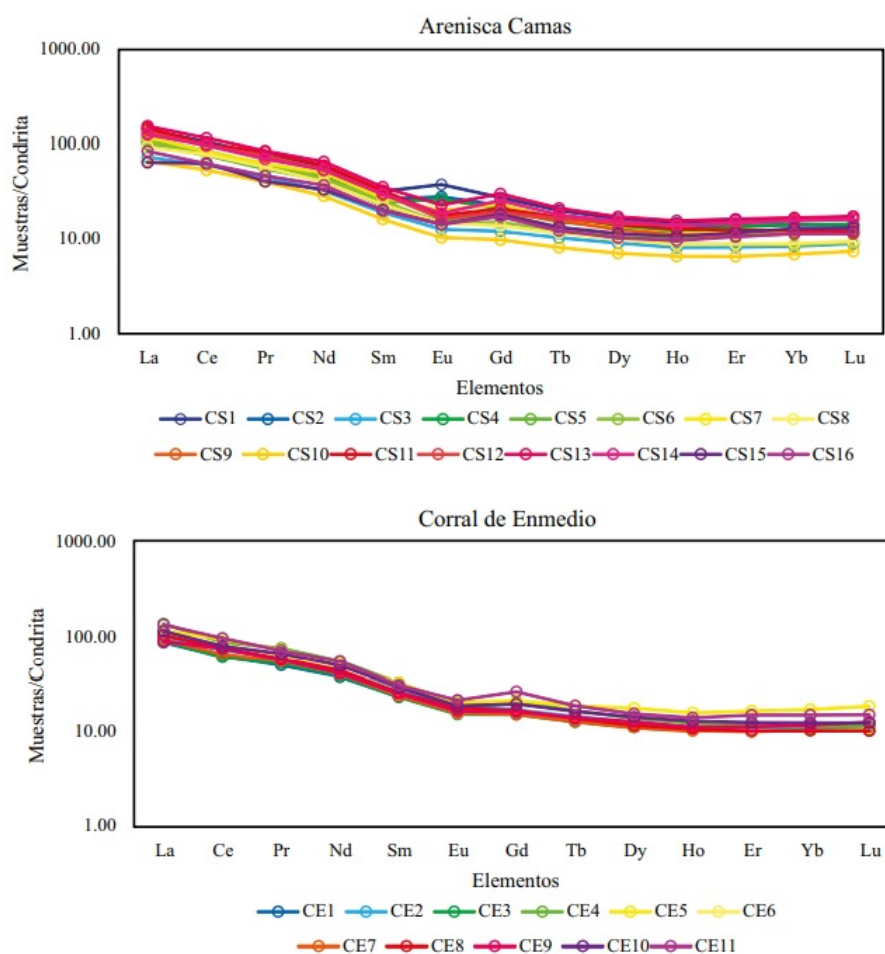


FIGURA 4

Patrones de elementos de tierras raras (REE) normalizados a condrita para areniscas de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas.

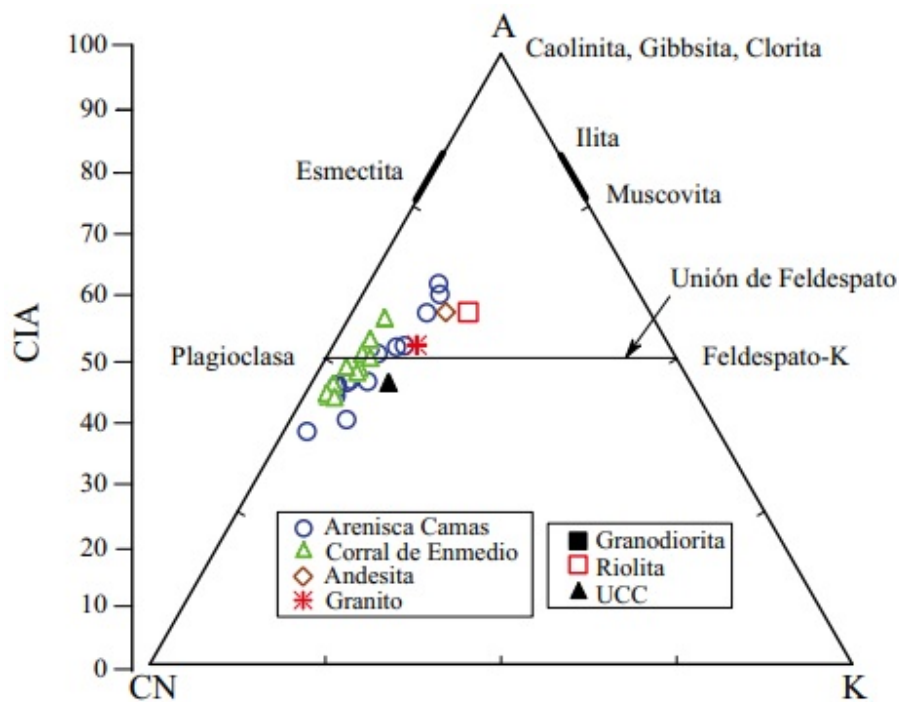


FIGURA 5

Diagrama ternario A-CN-K (de Nesbit y Young, 1982).
A: Al_2O_3 ; CN: $CaO^* + Na_2O$; K: K_2O (proporción molar).

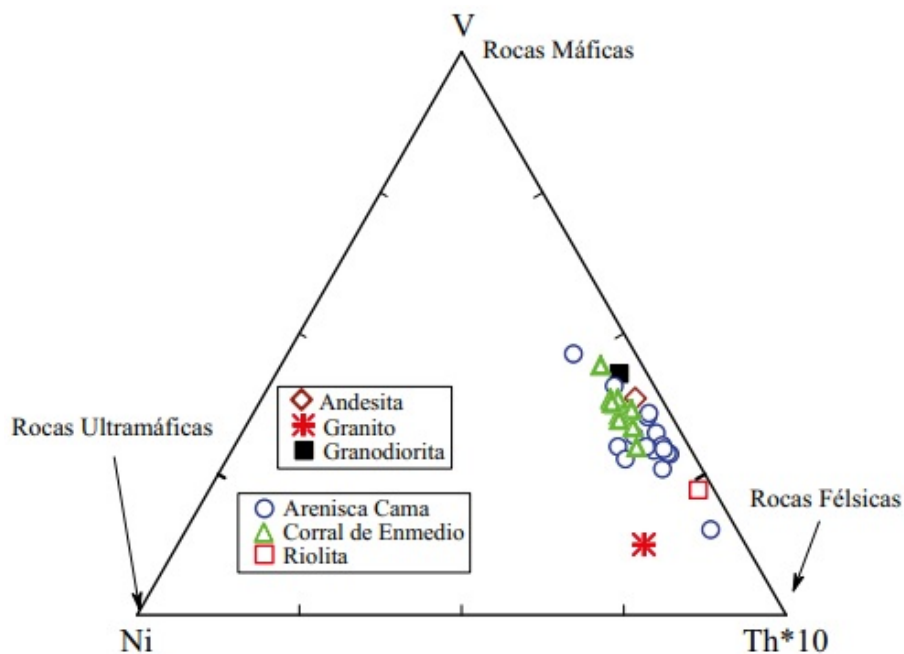


FIGURA 6

Diagrama V-Ni-Th*10 para las areniscas del estudio (de Bracciali et al., 2007).

TABLA 4

Rangos de relaciones elementales de las areniscas de este estudio comparadas a rocas félsicas, rocas máficas, Corteza Continental Superior (UCC) y Lutita del Australiana post-Arqueana (PAAS).

Relación	Grupo Cabullona		Valor literatura			
	Corral de Enmedio	Arenisca Camas	Roca Félsica	Roca Máfica	UCC	PAAS
Eu/Eu*	0.75 – 1.11	0.68 – 1.19	0.40 – 0.94	0.71 – 0.95	0.63	0.63
La/Sc	3.23 – 9.80	5.36 – 19.02	2.5 – 16.3	0.43 – 0.86	2.21	2.4
La/Co	2.44 – 4.82	3.24 – 10.30	1.80 – 13.8	0.14 – 0.38	1.76	1.66
Th/Sc	1.29 – 3.23	1.34 – 5.63	0.84 – 20.5	0.05 – 0.22	0.79	0.9
Th/Co	0.98 – 1.34	0.52 – 3.05	0.67 – 19.4	0.04 – 1.4	0.63	0.63
Cr/Th	0.77 – 6.07	0.31 – 2.90	4.0 – 15	25 – 500	7.76	7.53
(La/Lu)n	6.30 – 12.00	4.88 – 12.41	3.0 – 27	1.10 – 7.0	9.73	–

Otro de los índices utilizados para identificar las características de la roca fuente en la relación Ba/Ti y La/(Cr+Ni) (Boger et al., 2017). La relaciones de Ba/Ti y La/(Cr + Ni) aumentan con los materiales félsicos, sin embargo, los sedimentos derivados de fuentes máficas generalmente muestran valores más bajos. En el diagrama La/(Cr+Ni) contra Ba/Ti (Figura 8), la mayoría de las areniscas de la Formación Corral de Enmedio representan un solo grupo, sin embargo, muchas muestras de la Arenisca Camas indican una mayor dispersión con mayores relaciones La/(Cr+Ni), lo que sugiere que la Arenisca Camas tiene una firma más félsica que la Formación Corral de Enmedio.

González-León et al. (2017a) realizaron un estudio geocronológico U-Pb sobre circones detríticos separados de la arenisca de la Formación Corral de Enmedio, sus resultados indican abundantes circones jurásicos (~50%), seguidos por circones cretácicos (~35%) y en menor cantidad por circones proterozoicos (~15%). Este estudio proporciona información importante sobre la composición de rocas fuente de la Formación Corral de Enmedio. Se compararon los patrones de REE promedio de areniscas de ambas formaciones con los patrones de REE de las rocas fuentes expuestas más cercanas al área de estudio, específicamente las rocas volcánicas (riolita y andesita; Formación Tarahumara) y plutónicas (granito y granodiorita) del arco Laramídico del Cretácico (González-León et al., 2017b), rocas volcánicas (riolita) y plutónicas (granito) del arco Jurásico (González-León, datos no publicados), el granito del bloque Caborca (Iriondo et al., 2004) y el Esquisto Pinal de la Provincia Mazatzal (Madhavaraju et al., 2017) (Figuras 9a, 9b). El patrón promedio de REE de la Formación Corral de Enmedio es comparable con los patrones de las rocas volcánicas (riolita y andesita) y plutónicas (granito y granodiorita) del arco Laramídico del Cretácico, rocas volcánicas y plutónicas del arco Jurásico y granito del bloque Caborca. Así mismo, el patrón REE promedio de la Arenisca Camas muestra patrones REE similares a las riolitas y granitos del arco Laramídico y rocas volcánicas y plutónicas del arco Jurásico y granito del bloque Caborca.

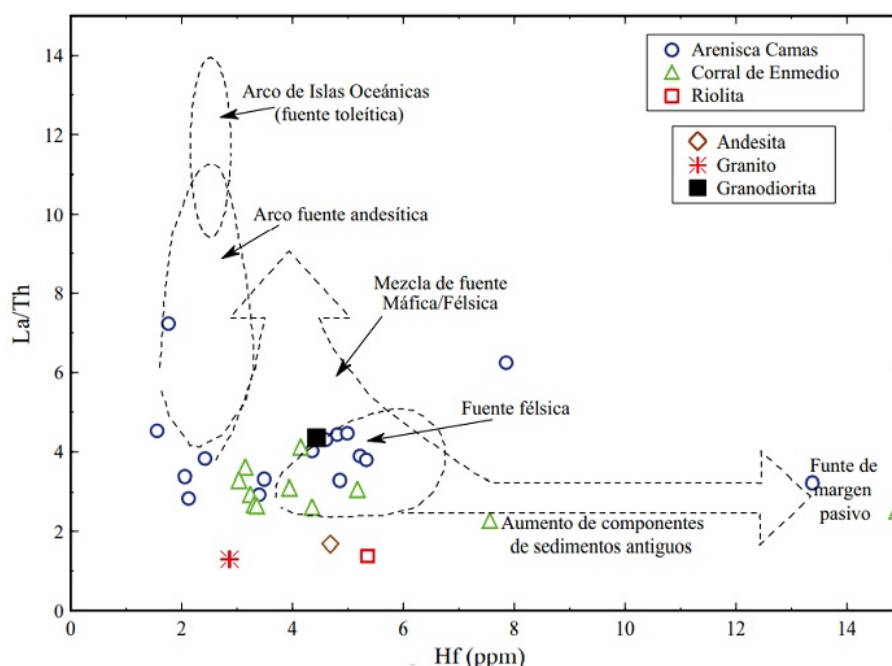


FIGURA 7

Diagrama La/Th vs. Hf para las areniscas de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas (de Floyd y Leveridge, 1987).

El cálculo de mezcla ha sido utilizado para identificar la composición de la roca fuente (Hegde y Chavadi, 2009; Raza et al. 2012, Madhavaraju, 2015; Armstrong-Altrin et al., 2015). Se tomaron los resultados de geocronología U-Pb de circones detríticos de la Formación Corral de Enmedio como información básica para los cálculos de mezcla. Además, los datos publicados de REE en la Formación Tarahumara (riolitas (R) y andesitas (A); González-León et al., 2017b), rocas plutónicas (granito, G) del arco Laramídico del Cretácico (LC), las rocas volcánicas y plutónicas del Jurásico (J) (González-León, datos no publicados) y el granito proterozoico del bloque Caborca (P) (Iriando et al., 2004) son tomados como los miembros finales para el modelamiento geoquímico. Los datos de REE de las rocas fuente de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas y su mezcla se muestran en las Tablas 5 y 6. El patrón de REE modelado de las rocas fuente para la Formación Corral de Enmedio se puede representar con una mezcla de 10% P (granito proterozoico del bloque Caborca), 50% J (arco jurásico) y 40% LC (arco laramídico) (Figura 10a), mientras que la concentración promedio de la Arenisca Camas se caracteriza por una mezcla de 20% P, 40% J, y 40% LC (Figura 10b). Se compararon las relaciones de elementos como $(La/Yb)_n$, $(Gd/Yb)_n$ y Eu/Eu^* para obtener mejores valores en la modelación. El resultado del cálculo de mezclas, patrones de REE y varios diagramas bivariados y ternarios sugieren que la Formación Corral de Enmedio recibió aporte de sedimentos de una fuente predominantemente félsica con un menor aporte de rocas intermedias, mientras que la Arenisca Camas recibió sedimentos de una fuente predominantemente félsica.

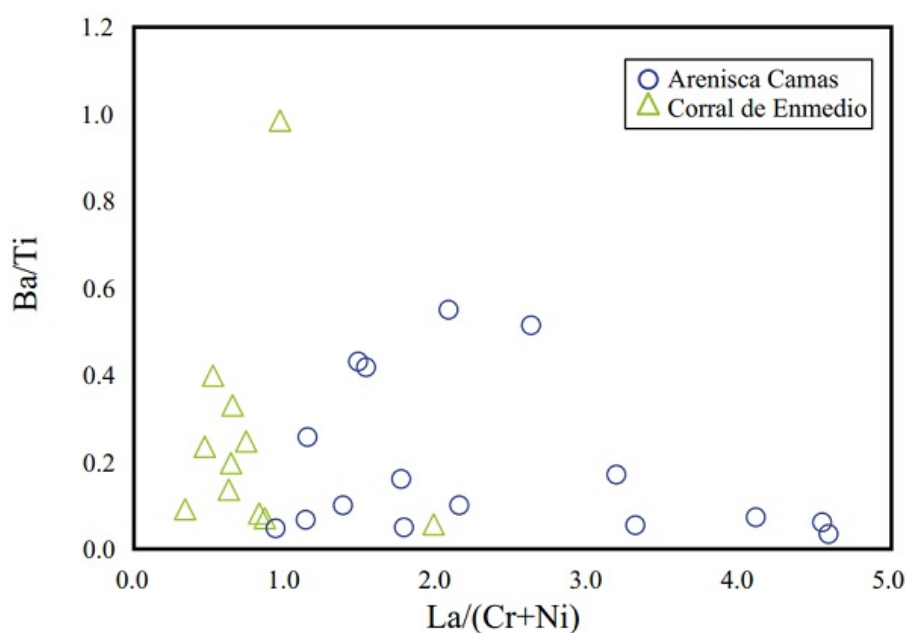


FIGURA 8

Diagrama $La/(Cr+Ni)$ vs. Ba/Ti para las areniscas de la Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas (de Boger et al., 2017).

CONCLUSIONES

Las Formación Corral de Enmedio y la Arenisca Camas fueron depositadas en una cuenca de antepaís laramídica, y conforman un espesor total de 750 m en la parte basal del Grupo Cabullona. Los diagramas de patrones REE normalizados con condrito para las areniscas de ambas formaciones presentan patrones de enriquecimiento en LREE, un plano en HREE con anomalías negativas a positivas de Eu. Los valores CIA y PIA y el diagrama A–CN–K indican que las areniscas de la Formación Corral de Enmedio fueron derivadas de un área fuente sujeta a un bajo grado de meteorización química, mientras que las de la Arenisca Camas revelan una intensidad baja a moderada en el área fuente.

Los patrones de REE, la relación de elementos, diagramas bivariados y diagramas ternarios sugieren que la Formación Corral de Enmedio recibió sedimentos de una fuente predominantemente félsica, con un aporte menor de rocas fuentes intermedias. Por otro lado, la Arenisca Camas recibió sedimentos de una fuente predominantemente félsica. El promedio de los datos REE de la Formación Corral de Enmedio es comparable con el patrón REE del granito Proterozoico del bloque Caborca (P), rocas volcánicas (riolita) y plutónicas (granito) del arco Jurásico (J) y las rocas plutónicas (granito y granodiorita) y volcánicas (riolita y andesita) del arco Laramídico del Cretácico (LC). Asimismo, los patrones REE promedio de la Arenisca Camas muestran patrones similares del granito proterozoico del bloque Caborca, la roca volcánica (riolita) y plutónica (granito) del arco Jurásico y la roca plutónica (granito) y volcánica (riolita) del arco laramídico del Cretácico. El patrón de REE resultado de la modelación de la roca fuente para la Formación Corral de Enmedio se puede representar con una mezcla de 10% P, 50% J y 40% LC, mientras que la concentración promedio de la Arenisca Camas se caracteriza por una mezcla de 20% P, 40% J y 40% LC.

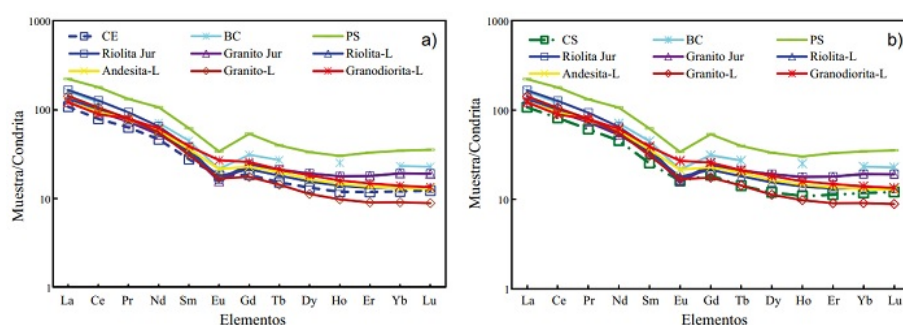


FIGURA 9

a) El patrón de REE de las areniscas de la Formación Corral de Enmedio es comparado con los valores promedios de REE para los datos de granitos del Bloque Caborca (Iriondo et al., 2004), Esquito Pinal de la Provincia Mazatzal (Madhavaraju et al., 2017), rocas Jurásicas volcánicas y plutónicas (González-León, datos no publicados), rocas volcánicas (riolita y andesita) y plutónicas (granito y granodiorita) de arco Laramídico del Cretácico (González-León, 2017b) para identificar las rocas fuente probable y b) El patrón de REE de las areniscas de la Arenisca Camas es comparado con los valores promedios de REE para los datos de granitos del Bloque Caborca (Iriondo et al., 2004), Esquito Pinal de la Provincia Mazatzal (Madhavaraju et al., 2017), rocas Jurásicas volcánicas y plutónicas (González-León, datos no publicados), rocas volcánicas (riolita y andesita) y plutónicas (granito y granodiorita) de arco Laramídico del Cretácico (González-León, 2017b) para inferir las rocas fuentes probables.

TABLA 5

Resultados de los cálculos de mezcla de los miembros finales en comparación con los valores promedios de la Formación Corral de Enmedio. n*= valor normalizado de Condrita.

Elementos/ Roca	Valores promedio		Precámbrico (P)				Jurásico (J)				Laramídico (Cretácico) (LC)								Mezcla resultante	
	Corral de Enmedio		Bloque Caborca (10%)				Riolita (30%)				Riolita (10%)		Andesita (10%)		Granito (10%)		Granodiorita (10%)		P:J:LC(10:50:40)	
	ppm	N*	ppm	N*	ppm	N*	ppm	N*	ppm	N*	ppm	N*	ppm	N*	ppm	N*	ppm	N*	ppm	N*
La	25.65	108.22	38.05	160.55	39.53	166.78	28.87	121.82	31.44	132.65	28.8	121.51	33.86	142.86	28.86	121.77	33.73	142.33		
Ce	48.44	79.01	74.26	121.14	77.71	126.77	58.57	95.54	62.42	101.82	58.38	95.23	64.7	105.55	54.62	89.09	66.46	108.42		
Pr	5.88	63.27			8.68	93.33	6.81	73.23	7.17	77.11	7.21	77.49	7.41	79.73	7.38	79.36				
Nd	21.23	46.44	32.45	71.01	29.61	64.8	24.07	52.66	25.4	55.59	26.46	57.89	25.51	55.81	28.17	61.64	27.5	60.17		
Sm	4.1	27.72	6.62	44.73	5.57	37.67	4.96	33.48	4.95	33.47	5.37	36.27	4.58	30.97	5.79	39.09	5.39	36.45		
Eu	1.02	18.03	1.21	21.49	0.92	16.42	0.88	15.69	1.01	17.89	1.21	21.42	0.95	16.79	1.52	27	1.04	18.52		
Gd	3.68	18.51	6.19	31.11	0.76	24.25	0.74	23.12	4.26	21.39	4.55	22.87	3.48	17.49	5.13	25.78	2.74	23.76		
Tb	0.55	15.21	0.98	27.15	4.83	21.18	4.6	20.61	0.65	18.13	0.72	19.83	0.52	14.31	0.77	21.19	2.73	20.54		
Dy	3.26	13.26			4.71	19.14	4.68	19.03	3.81	15.48	4.06	16.5	2.77	11.26	4.48	18.21				
Ho	0.65	11.89	1.37	25.09	0.97	17.76	0.98	17.86	0.76	13.89	0.8	14.63	0.53	9.77	0.87	15.93	0.92	16.83		
Er	1.89	11.83			2.87	17.92	2.87	17.96	2.11	13.18	2.18	13.63	1.44	9.02	2.37	14.81				
Yb	1.93	12.01	3.74	23.23	3.07	19.08	3.1	19.27	2.15	13.34	2.1	13.02	1.46	9.05	2.25	13.98	2.71	16.84		
Lu	0.3	12.28	0.56	22.76	0.47	19.11	0.47	19	0.32	13.12	0.32	12.89	0.22	8.85	0.33	13.41	0.41	16.64		
(La/Sm) _n		3.9		3.59		4.43		3.64		3.96		3.35		4.61		3.12		3.9		
(La/Yb) _n		9.01		6.91		8.74		6.32		9.94		9.33		15.79		8.71		8.45		
(Gd/Yb) _n		1.54		1.34		1.27		1.2		1.6		1.76		1.93		1.84		1.41		
Eu/Eu*		0.8		0.58		0.54		0.56		0.67		0.74		0.72		0.85		0.63		

TABLA 6

Resultados de los cálculos de mezcla de los miembros finales en comparación con los valores promedios de la Arenisca Camas. n*= valor normalizado de Condrita.

Elementos/ Roca	Valores promedio		Precambrico (P)		Jurásico (J)				Laramidico (Cretacico) (LC)				Mezcla resultante	
	Arenisca Camas		Bloque Caborca (20%)		Riolita (20%)		Granito (20%)		Riolita (20%)		Granito (20%)		P:J:LC (20:40:40)	
	ppm	N*	ppm	N*	ppm	N*	ppm	N*	ppm	N*	ppm	N*	ppm	N*
La	25.54	107.74	38.05	160.55	39.53	166.78	28.87	121.82	31.44	132.65	33.86	142.86	34.35	144.93
Ce	50.02	81.59	74.26	121.14	77.71	126.77	58.57	95.54	62.42	101.82	64.7	105.55	67.53	110.16
Pr	5.68	61.1			8.68	93.33	6.81	73.23	7.17	77.11	7.41	79.73	6.01	
Nd	20.74	45.38	32.45	71.01	29.61	64.8	24.07	52.66	25.4	55.59	25.51	55.81	27.41	59.97
Sm	3.76	25.42	6.62	44.73	5.57	37.67	4.96	33.48	4.95	33.47	4.58	30.97	5.34	36.06
Eu	0.9	16.05	1.21	21.49	0.92	16.42	0.88	15.69	1.01	17.89	0.95	16.79	1	17.66
Gd	3.71	18.63	6.19	31.11	0.76	24.25	0.74	23.12	4.26	21.39	3.48	17.49	3.09	23.47
Tb	0.51	14.15	0.98	27.15	4.83	21.18	4.6	20.61	0.65	18.13	0.52	14.31	2.32	20.28
Dy	2.95	11.98			4.71	19.14	4.68	19.03	3.81	15.48	2.77	11.26	3.19	
Ho	0.59	10.86	1.37	25.09	0.97	17.76	0.98	17.86	0.76	13.89	0.53	9.77	0.92	16.88
Er	1.79	11.22			2.87	17.92	2.87	17.96	2.11	13.18	1.44	9.02	1.86	
Yb	1.9	11.77	3.74	23.23	3.07	19.08	3.1	19.27	2.15	13.34	1.46	9.05	2.7	16.79
Lu	0.3	12.07	0.56	22.76	0.47	19.11	0.47	19	0.32	13.12	0.22	8.85	0.41	16.57
(La/Sm) _n		4.24		3.59		4.43		3.64		3.96		4.61		4.02
(La/Yb) _n		9.15		6.91		8.74		6.32		9.94		15.79		8.63
(Gd/Yb) _n		1.58		1.34		1.27		1.2		1.6		1.93		1.4
Eu/Eu*		0.74		0.58		0.54		0.56		0.67		0.72		0.61

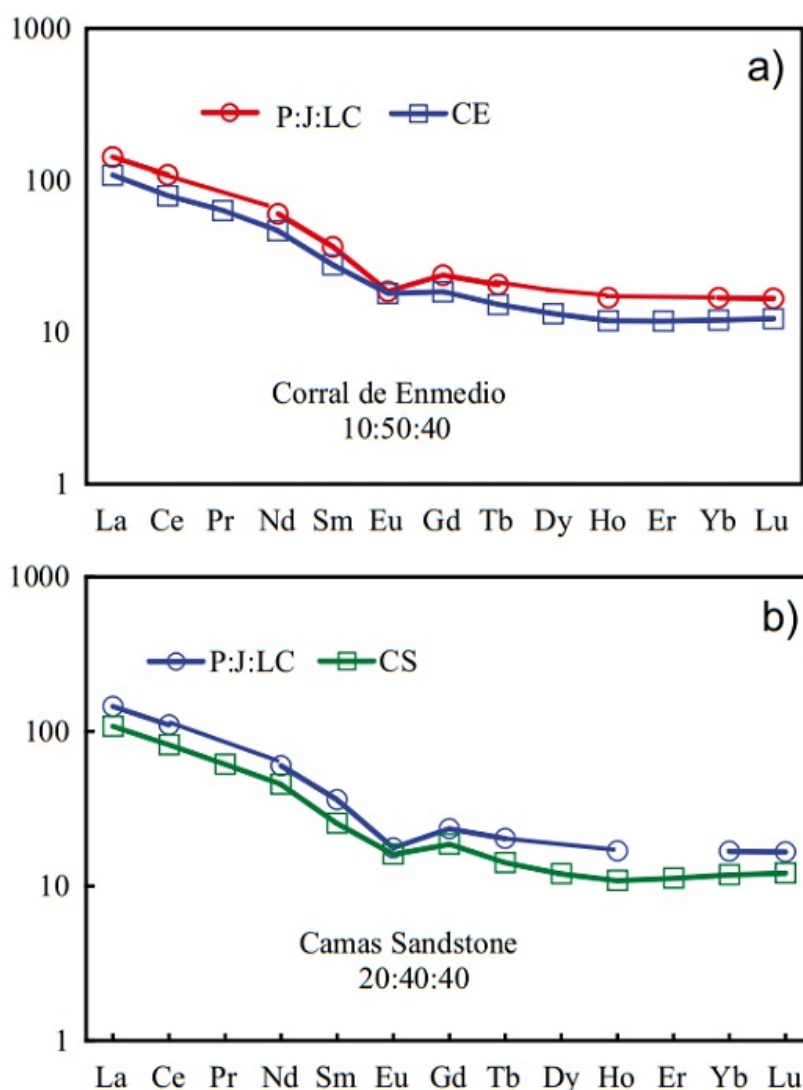


FIGURA 10

a) Diagrama de patrón de REE modelado de la roca fuente para las Formación Corral de Enmedio y b) Diagrama de patrón de REE modelado de la roca fuente para la Arenisca Camas. P: Rocas Proterozoico, J: Rocas del arco Jurásico, y LC: Rocas del arco Laramídico del Cretácico.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo otorgado por la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Proyecto PAPIIT No.IN112214-3. El trabajo de campo y parte de estudios geoquímicos son apoyados a través del proyecto PAPIIT No. IN101811. Nos gustaría agradecer al Dr. Carlos M. González-León por su ayuda en el trabajo de campo. Agradecemos al Dr. T.F. Lawton por sus sugerencias e ideas innovadoras para mejorar la calidad de nuestro manuscrito. Agradecemos a Rufino Lozano Santa-Cruz y Patricia Girón García por su ayuda en el análisis de óxidos mayores. Queremos agradecer a Ofelia Pérez Arvizu por su apoyo en el análisis de traza y tierra raras. Agradecemos además a Pablo Peñaflor por pulverizar las rocas siliciclásticas para los estudios geoquímicos. También agradecemos sinceramente a los revisores, que con sus atinados comentarios y acertadas sugerencias, ayudaron a mejorar notablemente el presente trabajo.

REFERENCIAS

- Almeida, L., Martínez, E., 1982, Estudio palinológico preliminar del Cretácico Superior de la cuenca de Cabullona, Sonora, México: Instituto Nacional de Antropología e Historia, Congreso de Paleobotánica y Palinología, 3, México, D.F., Memoria, 213-227.
- Amato, J.M., Mack, G.H., Jonell, T.N., Seager, W.R., Upchurch, G.R., 2017, Onset of the Laramide orogeny and associated magmatism in southern New Mexico based on U-Pb geochronology: Geological Society of America Bulletin, <https://doi.org/10.1130/B31629.1>.
- Anderson, T.H., Silver, L.T., 2005, The Mojave-Sonora megashear field and analytical studies leading to the conception and evolution of the hypothesis, en Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee J.W., Steiner, M.B. (eds.), The Mojave-Sonora Megashear Hypothesis: Development, Assessment, and Alternatives: Geological Society of America Special Paper, 393 1-50.
- Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Madhavaraju, J., Rosalez-Hoz, L., Lee, YI., Balaram, V., Cruz-Martínez, A., Avila-Ramírez, G., 2013, Geochemistry of the Jurassic and upper Cretaceous shales from the Molango Region, Hidalgo, Eastern Mexico: implications of source-area weathering, provenance and tectonic setting: *Comptes Rendus Geoscience*, 345, 185-202.
- Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Sanchez-Cabeza, J.A., Ruiz-Fernández, A.C., 2015, Provenance and depositional history of continental slope sediments in the Southwestern Gulf of Mexico unraveled by geochemical analysis: *Continental Shelf Research*, 95, 15-26.
- Basabivazo, G.T., 2000, The upper Cretaceous Ringbone formation, Little Hatchet Mountains, southwestern New Mexico, en Lawton, T.F., McMillan, N.J., McLemore, V.T. (eds.), Southwest Passage: a Trip through the Phanerozoic: New Mexico Geological Society 51st Annual Fall Field Conference Guidebook, 203-210.
- Bhatia, M.R., 1985, Rare-earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control: *Sedimentary Geology*, 45, 97-113.
- Bhatia, M.R., Crook, K., 1986, Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins: *Contribution to Mineral and Petrology*, 92, 181-193.
- Boger, S.D., Spelbrink, L.G., Lee, R.I., Sandiford, M., Maas, R., Woodhead, J.D., 2017, Isotopic (U-Pb, Nd) and geochemical constraints on the origins of the Aileu and Gondwana sequences of Timor: *Journal of Asian Earth Sciences*, 134, 330-351.
- Bracciali, L., Marroni, M., Pandolfi, L., Rocchi, S., 2007, Geochemistry and petrography of western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): From source areas to configuration of margins, en Arribas, J., Critelli, S., Johnsson, M.J. (eds.), Sedimentary provenance and petrogenesis: Perspectives from petrography and geochemistry: Geological Society of America Special Paper, 420, 73-93.
- Clinkscales, C.A., Lawton, T.F., 2015, Timing of Late Cretaceous Shortening and Basin Development, Little Hatchet Mountains, Southwestern New Mexico, USA -Implications for Regional Laramide Tectonics: *Basin Research*, 27, 453-472.
- 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.
- Coney, P.J., 1972, Cordilleran tectonics and North America plate motion: *American Journal of Sciences*, 272, 603-628.
- Coney, P.J., Reynolds, S.J., 1977, Cordilleran Benioff zones: *Nature*, 270, 403-406.
- Cullers, R.L., 1995, The controls on the major and trace element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountain region, Colorado, USA: *Chemical Geology*, 123, 107-131.
- Damon, P.E., Clark, K.C., Shafiqullah, M., 1983a, Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 1052-1071.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., Roldán-Quintana, J., Cochemé, J.J., 1983b, El batolito Laramide (90-40 Ma) de Sonora: *Memorias de la XV Convención Nacional de la AIMMG*, Guadalajara, Jalisco, 63-95

- Dickinson, W.R., Snyder, W.S., 1978, Plate tectonics of the Laramide orogeny, in Matthews, V., III, (ed.), Laramide folding associated with basement block faulting in the western United States: Geological Society of America Memoir, 151, 355-366.
- Dickinson, W.R., Fiorillo, A.R., Hall, D.L., Monreal, R., Potochnik, A.R., Swift, P.N., 1989, Cretaceous strata of southern Arizona, en Jenney, J.P., Reynolds, S.J., (eds.), Geologic evolution of Arizona: Tucson: Arizona Geological Society Digest, 17, 447-461.
- Drewes, H., 1991, Description and development of the Cordilleran orogenic belt in the southwestern United States and northern Mexico border: United State Geological Survey Professional Papers, 1512, 92 pp.
- Eisele, J., Isachsen, C.E., 2001, Crustal growth in southern Arizona: U-Pb geochronologic and Sm-Nd isotopic evidence for addition of the Paleoproterozoic Cochise block to the Mazatzal province: American Journal of Science, 301, 773-797.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995, Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance: Geology, 23, 921-924.
- Feng, R., Kerrich, R., 1990, Geochemistry of fine-grained clastic sediments in the Archean Abitibi greenstone belt, Canada: implications for provenance and tectonic setting: Geochimica et Cosmochimica Acta, 54, 1061-1081.
- Floyd, P.A., Leveridge, B.E., 1987, Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones: Journal of the Geological Society, 144, 531-542.
- González-León, C., 1986, Estratigrafía del Paleozoico de la sierra del Tule, noreste de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 6, 117-135.
- González-León, C.M., 1994, Stratigraphy, depositional environments, and origin of the Cabullona Basin, northeastern Sonora, Mexico: Tucson, Arizona, University of Arizona, Tesis Doctoral, 144 pp (inédita).
- González-León, C.M., Lawton, T.F., 1995. Stratigraphy, depositional environments, and origin of the Cabullona basin, northeastern Sonora, en Jacques-Ayala, C., González-León, C.M., Roldán-Quintana, J. (eds.), Studies on the Mesozoic of Sonora and Adjacent Areas: Geological Society of America Special Paper, 301, 121-142.
- González-León, C.M., Solari, L., Solé, J., Ducea, M.N., Lawton, T.F., Bernal, J.P., González Becuar, E., Gray, F., López-Martínez, M., Lozano Santacruz, R., 2011, Stratigraphy, geochronology and geochemistry of the Laramide magmatic arc in north-central Sonora, Mexico: Geosphere, 7, 1392-1418.
- González-León, C.M., Solari, L., Madhavaraju, J., 2017a, Stratigraphy, geochronology and regional tectonic setting of the Late Cretaceous (ca. 82-70 Ma) Cabullona basin, Sonora, Mexico: Journal of South American Earth Sciences, 80, 494-511.
- González-León, C.M., Solari, L., Valencia-Moreno, M., Rascon, Heimpel, M.A., Solé, J., González Becuar, E., Lozano, Santacruz, R., Pérez, Arvizu, O., 2017b, Late Cretaceous to early Eocene magmatic evolution of the Laramide arc in the Nacozari quadrangle, northeastern Sonora, Mexico and its regional implications: Ore Geology Reviews, 81, 1137-1157.
- Govindaraju, K., 1994, Compilation of working values and sample description for 383 standard reference materials: Geostandards Newsletter, 18, 331 pp.
- Hayashi, K.I., Fujisawa, H., Holland, H.D., Ohmoto, H., 1997, Geochemistry of #1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada: Geochimica et Cosmochimica Acta, 61, 4115-4137.
- Hayes, P.T., 1970, Cretaceous Paleogeography of Southeastern Arizona: Geological Survey Professional Paper, 658, 42 pp.
- Hegde, V.S., Chavadi, V.C., 2009, Geochemistry of late Archaean metagreywackes from the Western Dharwar Craton, South India: Implications for provenance and nature of the Late Archaean crust: Gondwana Research, 15, 178-187.
- Iriondo, A., Premo, W.R., Martinez-Torres, L.M., Budahn, J.R., Atkinson, W.W.J., Siems, D.F., Guaras-Gonzalez, B., 2004, Isotopic, geochemical, and temporal characterization of Proterozoic basement rocks in the Quitovac región, northwestern Sonora, Mexico: Implications for the reconstruction of the southwestern margin of Laurentia: Geological Society of America Bulletin, 116, 154-170.

- Lozano-Santacruz, R., Bernal, J.P., 2005, Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(3), 329-344.
- Madhavaraju, J., 2015, Geochemistry of Late Cretaceous sedimentary rocks of the Cauvery Basin, south India: constraints on paleoweathering, provenance and end Cretaceous environments. in Ramkumar M, (ed), *Chemostratigraphy: Concepts, Techniques and Applications*, Elsevier, Netherlands, 185-214.
- Madhavaraju, J., Lee, YI., 2010, Influence of Deccan volcanism in the sedimentary rocks of Late Maastrichtian–Danian age of Cauvery basin Southeastern India: constraints from geochemistry: *Current Sciences*, 98, 528-537.
- Madhavaraju, J., Ramasamy, S., 2002, Petrography and geochemistry of Late Maastrichtian – Early Paleocene sediments of Tiruchirapalli Cretaceous, Tamil Nadu - Paleoweathering and provenance implications: *Journal of the Geological Society of India*, 59, 133-142.
- Madhavaraju, J., Ramírez-Montoya, E., Monreal, R., González-León, C.M., Pi-Puig, T., Espinoza-Maldonado, I.G., Grijalva-Noriega, F.J., 2016a, Paleoclimate, paleoweathering and paleoredox conditions of Lower Cretaceous shales from the Mural Limestone, Tuape section, northern Sonora, Mexico: constraints from clay mineralogy and geochemistry: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(1), 34-48.
- Madhavaraju, J., Tom, M., Lee, YI., Balaram, V., Ramasamy, S., Carranza- Edwards, A., Ramachandran, A., 2016b, Provenance and tectonic settings of sands from Puerto Peñasco, Desemboque and Bahía Kino beaches, Gulf of California, Sonora, Mexico: *Journal of South American Earth Sciences*, 71, 262-275.
- Madhavaraju, J., Pacheco-Olivas, S.A., González-León, C.M., Espinoza- Maldonado, I.G., Sanchez-Medrano, P.A., Villanueva-Amadoz, U., Monreal, R., Pi-Puig, T., 2017, Mineralogy and geochemistry of the Lower Cretaceous siliciclastic rocks of the Morita Formation, Sierra San José section, Sonora, Mexico: *Journal of South American Earth Sciences*, 397-411.
- McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995, The composition of the Earth: *Chemical Geology*, 120, 223-253.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., Connelly, J.N., 2001, Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 113, 521-531.
- McKee, J.W., McKee, M.B., Anderson, T.H., 2005, Mesozoic basin formation, mass gravity sedimentation, and inversion in northeastern Sonora and southeastern Arizona. en Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee, J.W., Steiner, M.B. (eds.), *The Mojave-Sonora Megashield Hypothesis: Development, Assessment, and Alternatives: Geological Society of America Special Paper*, 393, 481-507.
- McLennan, S.M., 1989, Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes, en Lipin B.R., McKay G.A., (eds.): *Geochemistry and Mineralogy of Rare earth elements: Reviews in Mineralogy*, 21, 169-200.
- McLennan, S.M., Taylor, S.R., McCulloch, M.T., Maynard, J.B., 1990, Geochemical and Nd Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 2015-2050.
- McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K., Hanson, G.N., 1993, Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics: *Geological Society of America Special Papers*, 284, 21-40.
- Mori, L., Gómez-Tuena, A., Cai, Y., Goldstein, S.L., 2007, Effects of prolonged flat subduction on the Miocene magmatic record of the central Trans- Mexican Volcanic Belt: *Chemical Geology*, 244, 452-473.
- Nath, B.N., Kunzendorf, H., Pluger, W.L., 2000, Influence of provenance, weathering, and sedimentary process on the elemental ratios of the fine-grained fraction of the bedload sediments from the Vembanad Lake and the adjoining continental shelf, Southwest Coast of India: *Journal of Sedimentary Research*, 70, 1081-1094.
- 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: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 1523-1534.
- Nesbitt, H.W., Markovics, G., Price, R.C., 1980, Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, 1659-1666.

- Nesbitt, H.W., Fedo, C.M., Young, G.M., 1997, Quartz and feldspar stability, steady and non- steady-state weathering, and petrogenesis of siliciclastic sands and muds: *Journal of Geology*, 105, 173-191.
- Page, W.R., Gray, F., Iriondo, A., Miggins, D., Blodgett, R.B., Maldonado, F., Miller, R.J., 2010, Stratigraphy and Mesozoic-Cenozoic tectonic history of northern sierra Los Ajos and adjacent areas, Sonora, Mexico: *Journal of South American Earth Sciences*, 29, 557-571.
- Ramachandran, A., Madhavaraju, J., Ramasamy, S., Lee, Y.I., Rao, S., Chawngthu, D.L., Velmurugan, K., 2016, Geochemistry of the Proterozoic clastic rocks of Kerur Formation of Kaladgi-Badami Basin, Northern Karnataka, South India: Implications for paleoweathering and provenance: *Turkish Journal of Earth Sciences*, 25, 126-144.
- Rangin, C., 1977, Tectónicas sobrepuestas en Sonora septentrional. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología Revista, 1, 44-47.
- Ransome, F.L., 1904, The geology and ore deposits of the Bisbee quadrangle Arizona: U.S. Geological Survey, Professional Paper, 21, 167 pp.
- Raza, M., Ahmad, A.H.M., Khan, M.S., Khan, F., 2012, Geochemistry and detrital modes of Proterozoic sedimentary rocks, Bayana Basin, north Delhi fold belt: implications for provenance and source-area weathering: *International Geological Reviews*, 54, 111-129.
- Roddaz, M., Viers, J., Brusset, S., Baby, P., Boucayrand, C., Herail, G., 2006, Controls on weathering and provenance in the Amazonian foreland basin: insights from major and trace element geochemistry of Neogene Amazonian sediments: *Chemical Geology*, 226, 31-65.
- Shao, J., Yang, S., Li, C., 2012, Chemical indices (CIA and WIP) as proxies for integrated chemical weathering in China: inferences from analysis of fluvial sediments: *Sedimentary Geology*, 265-266.
- Solari, L.A., González-León, C.M., Ortega-Obregón, C., Valencia-Moreno, M., Rascon-Heimpel, M.A., 2018, The Proterozoic of NW Mexico revisited: U-Pb geochronology and Hf isotopes of Sonoran rocks and their tectonic implications: *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 845-861.
- Spalletti, L.A., Veiga, G.D., Schwarz, E., Franzese, J., 2008, Depósitos de flujos gravitacionales subácueos de sedimentos en el flanco activo de la Cuenca Neuquina durante el Cretácico Temprano: *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63, 442-453.
- Taliaferro, N.L., 1933, An occurrence of Upper Cretaceous sediments in northern Sonora, Mexico: *Journal of Geology*, 41, 12-37.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985, *The Continental Crust: its Composition and Evolution*: Blackwell, Oxford, 349 pp.
- Velmurugan, K., Madhavaraju, J., Balaram, V., Ramachandran, A., Ramasamy, S., Ramirez-Montoya, E., Saucedo-Samaniego, J.C., 2019, Provenance and Tectonic Setting of the Proterozoic Clastic Rocks of the Kerur Formation, Badami Group, Mohare Area, Karnataka, India, en Mondal M. (ed.) *Geological Evolution of the Precambrian Indian Shield: Society of Earth Scientists Series*. Springer, Cham, 239-269. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89698-4_11.
- Wilson, F.I., Rocha, S.V., 1949, Coal Deposits of the Santa Clara District Near Tonichi, 962A: U.S. Geological Survey Bulletin, 962A, 80 pp.
- Wronkiewicz, D.J., Condie, K.C., 1989, Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa: evidence for a 3.0 Ga old continental cratón: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 537-549.
- Yu, L., Zou, S., Cai, J., Xu, D., Zou, F., Wang, Z., Wu, C., Liu, M., 2016, Geochemical and Nd isotopic constraints on provenance and depositional setting of the Shihuiding Formation in the Shilu Fe-Co-Cu ore district, Hainan Province, south China: *Journal of Asian Earth Sciences*, 119, 100-117.