



Reciclamiento sedimentario: Análisis composicional asociado a discordancias del noroeste de México, un ejemplo del Triásico Superior al Cretácico Inferior

Yam Zul Ernesto Ocampo-Díaz^{1,*}, Igor Ishi Rubio-Cisneros²

¹Áreas de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Dr. Manuel Nava No. 8, Zona Universitaria, San Luis Potosí, México, C.P., 78290.

²Petroleum GeoServices (PGS), Av. Paseo Tabasco 1406, 3° Piso, Torre Plaza Atenas, Tabasco 2000, Villahermosa, Tabasco, México, C.P. 86030.

* magonegro_2000@hotmail.com

Resumen

La columna estratigráfica de la Fosa de Monterrey en el Noreste de México está representada por cinco secuencias clásticas del Triásico Tardío al Cretácico Temprano, las cuales muestran relaciones temporales definidas por discordancias angulares y erosivas. El presente trabajo, por medio de un análisis petrográfico y el uso de índices composicionales y de reciclamiento, analiza la composición de estas secuencias con la finalidad de comprender los procesos de reciclado-cannibalismo, variaciones en la composición de las áreas fuente y su relación con las discordancias. El análisis petrográfico, así como la composición modal y el uso de los índices composicionales (e.g., F, Lm, Qm) en los sedimentos clásticos, permiten establecer tres periodos de reciclado o adición importante de las áreas fuentes usando el diagrama QmFLt: 1) Triásico Superior ($Qm_{70}F_{10}L_{20}$), erosión de rocas metamórficas de grado medio-alto, con un elevado contenido de Qm que sugiere un mayor grado de transporte; 2) Jurásico Inferior ($Qm_{40}F_{22}L_{38}$), un periodo de máximo rejuvenecimiento de fuentes volcánicas y metamórficas; y 3) Cretácico Inferior ($Qm_{56}F_{31}Lt_{13}$), un intervalo corto de rejuvenecimiento de las áreas fuente caracterizado principalmente por granitos o granodioritas, rocas volcánicas y en menor cantidad metamórficas de bajo grado.

El conjunto de las interpretaciones en las variaciones (QFL) e índices composicionales sugieren la evolución de un proceso de reciclado, y permiten proponer un índice de reciclamiento sedimentario empírico (InReSe). El InReSe se describe aplicándolo a tres casos, muestra la sensibilidad estadística de los cambios relacionados con facies sedimentarias (e.g., depósitos de alto oleaje), tamaño de grano (e.g., canales mareales), y su implicación genética en las discordancias en la columna estratigráfica de la Fosa de Monterrey en el noreste de México (cannibalismo intraformacional *versus* controles aloclícos).

Palabras clave: rejuvenecimiento, índices composicionales, reciclado, Noreste de México, cannibalismo sedimentario, petrografía sedimentaria.

Abstract

The stratigraphic column of the Monterrey Trough in northeastern Mexico is represented by five Late Triassic to Early Cretaceous clastic sequences that show temporal relations defined by angular-erosive unconformities. This work analyses the composition of these sequences by means of sedimentary petrography, and compositional and recycling indices in order to comprehend the recycling-cannibalism process, the compositional variation between source-lands, and its relation to unconformities. The petrographic analysis, as well as the modal composition and the use of compositional indices (e.g., F, Lm, Qm) for the clastic sediments allows the establishment of three recycling periods or important source-rock addition using the QmFL diagram: 1) Upper Triassic ($Qm_{70}F_{10}L_{20}$), medium-high grade metamorphic source rock erosion with an elevated Qm content suggesting a high rate of sediment transport; 2) Lower Jurassic

($Qm_{40}F_{22}L_{38}$), a period with maximum rejuvenation of volcanic and metamorphic sources; and 3) Lower Cretaceous ($Qm_{56}F_{31}Lt_{13}$), a period of short-lived exhumation for the source areas mainly characterized by granites or granodiorites, volcanic rocks and, to a lesser degree, low-grade metamorphic rocks.

The set of interpretations for compositional variations (QFL) and indices suggests the evolution of a recycling process, and allows proposing an empirical sedimentary recycling index (SeReIn). The SeReIn was applied and is described for three cases, demonstrating statistical sensitivity in changes related to sedimentary facies (e.g., high tide or storm deposits), grain size (e.g., tidal channels), and genetic implications in the unconformities within the stratigraphic column of the Monterrey Trough (intraformational cannibalism versus allocyclic controls).

Keywords: rejuvenation, compositional indices, recycling, Northeastern Mexico, sedimentary cannibalism, sedimentary petrography.

1. Introducción

Las discordancias dentro del registro geológico representan un hiato en el catálogo sedimentario y están relacionadas con cambios generados por diversos procesos tectono-sedimentarios (e.g., cambios eustáticos del nivel del mar, erosión por corrientes marinas de fondo, o bien fenómenos esporádicos y de gran erosión como tormentas, oleaje intenso sobre líneas de costa, acreción y subsidencia; Pitman, 1978; Schlager, 1993; Weltje *et al.*, 1998). Las discordancias angulares y erosivas se caracterizan por presentar un cambio en el ángulo de buzamiento de los depósitos superiores con respecto a los inferiores. Han sido relacionadas con una actividad tectónica y pueden ser interpretadas como superficies que evidencian su exposición a niveles sub-aéreos (e.g., paleosuelos).

El presente trabajo no pretende describir las características y orígenes de las discordancias, las cuales ya han sido descritas en distintas publicaciones (e.g., Shanmugam, 1988; Zuffa *et al.*, 1995; Widdowson, 1997), por el contrario se documentan por primera vez los cambios composicionales y el posible proceso relacionado a las discordancias angulares-erosivas en secuencias clásticas de la columna estratigráfica para la Fosa de Monterrey en el Noreste de México.

La columna estratigráfica de la Fosa de Monterrey en el Noreste de México se caracteriza por secuencias clásticas que varían en edades desde el Triásico Tardío hasta Cretácico Temprano (Michalzik, 1988; Figura 1). Estas secuencias clásticas se caracterizan por presentar discordancias angulares-erosivas entre formaciones (e.g., Formación Huizachal *versus* Formación La Boca), que solo han sido interpretadas desde el punto de vista estratigráfico (e.g., Michalzik, 1988; Ocampo-Díaz, 2007; Rubio-Cisneros, 2008a). Estos autores omiten la interpretación genética relacionada con las áreas fuente, reactivación y exhumación de los altos del basamento, e inclusive el grado de reciclamiento intraformacional (autociclicidad/canibalismo). Este trabajo evalúa los datos composicionales de las secuencias clásticas del Triásico Superior hasta el Cretácico Inferior propuestos por García-Obregón (2008), Ocampo-Díaz (2007), Ramos-Ledezma (2007) y Rubio-

Cisneros (2008a), y su relación con la génesis de las discordancias desde el punto de vista petrográfico. Por lo tanto este trabajo indaga y demuestra: 1) la existencia de reciclamiento sedimentario *versus* rejuvenecimiento o nuevo aporte de áreas fuentes; y 2) el reciclamiento sedimentario *versus* canibalismo o reciclamiento intraformacional; como también 3) evalúa estadísticamente los procesos y propone un índice de reciclamiento sedimentario.

2. Estratigrafía de la Fosa Monterrey

La región central del estado de Nuevo León es uno de los mejores lugares donde se pueden apreciar las secuencias clásticas de la columna estratigráfica de la Sierra Madre Oriental, en específico dentro de la Fosa de Monterrey. Las secuencias rocosas afloran principalmente en las inmediaciones de los poblados de San Pablo Tranquitas, Galeana y Rayones (Figura 2).

Las secuencias clásticas dentro de la Fosa de Monterrey se caracterizan por depósitos fluviales-aluviales de edad Triásica Superior, depósitos aluviales-lacustres-fluviales del Jurásico Temprano-Medio, depósitos de una línea de costa deltáica para el Jurásico Superior y depósitos deltáicos influenciados por mareas y marino marginales del Cretácico Inferior (Michalzik, 1991; Michalzik y Shumann, 1994; Ocampo-Díaz, 2007; Ocampo-Díaz *et al.*, 2008; Ocampo-Díaz, 2011, 2012; Rubio-Cisneros, 2012).

A continuación se describen brevemente, de la base a la cima, las secuencias clásticas de la columna estratigráfica en la Fosa de Monterrey, dentro del intervalo de edad del Triásico Superior al Cretácico Inferior. La descripción hace énfasis en los aspectos sedimentológicos, estratigráficos y petrológicos descritos por los trabajos de Michalzik, (1988; 1991), Michalzik y Shumann (1994), Ocampo-Díaz (2007), Ocampo-Díaz *et al.* (2008, 2012) y Rubio-Cisneros (2008b).

2.1. Formación Huizachal (Triásico Tardío)

La Formación Huizachal representa la unidad más antigua y basal de la columna estratigráfica de la Fosa de Monterrey (Mixon 1963; Michalzik 1988; Figura 1), está

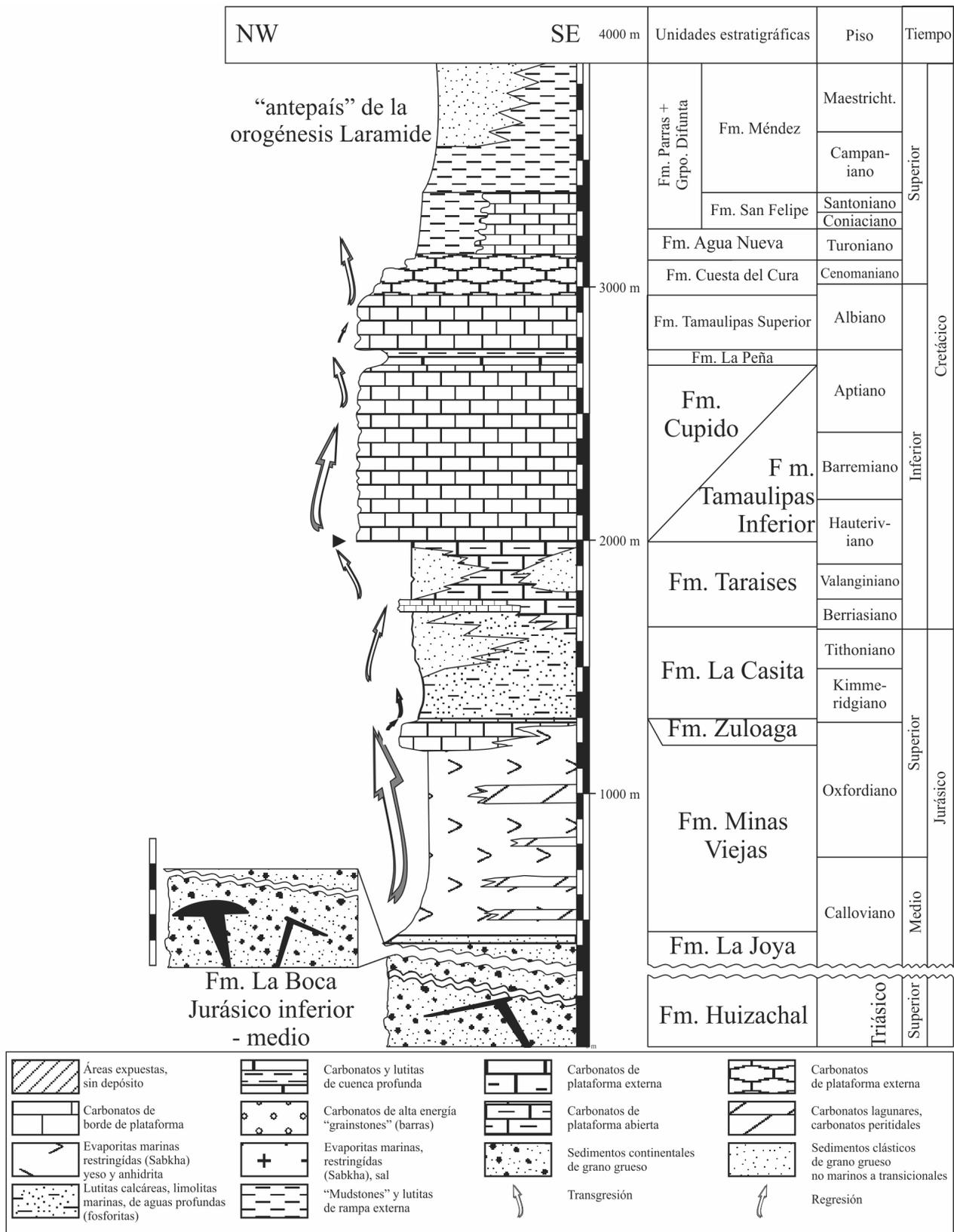


Figura 1. Columna estratigráfica de la Fosa de Monterrey (Modificada de Michalzik, 1988).

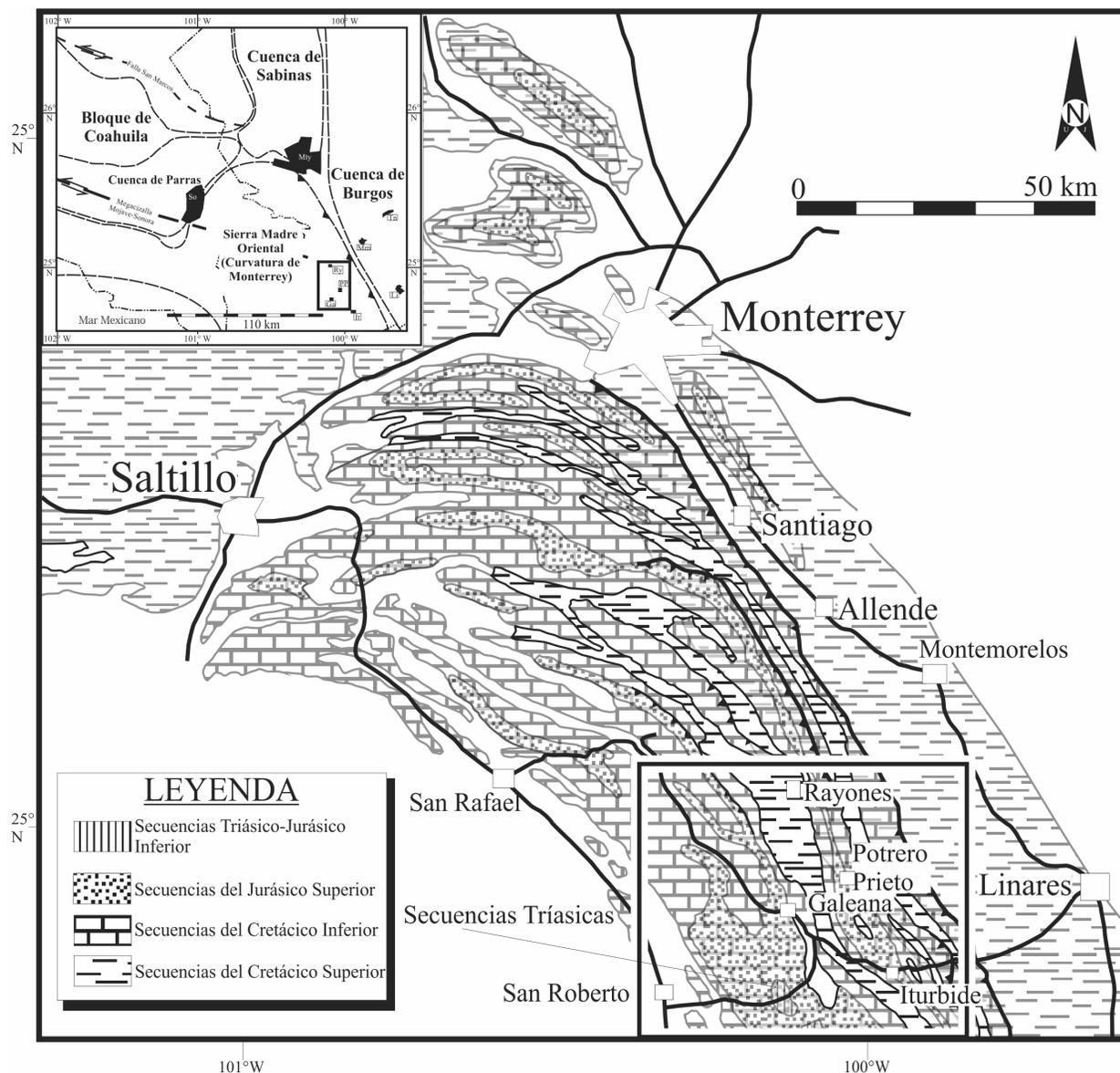


Figura 2. Localización y geología regional del área de estudio (Tomada de Michalzik, 1988). Tn- Terán ; Mm- Montemorelos; Ry- Rayones; PP- Potrero Prieto; Ga- Galeana; It- Iturbide; Li- Linares.

constituida por limolita, lutita, arenisca y conglomerado dentro de estratos que van de delgados a muy gruesos y en secuencias del tipo granodecreciente (~10 m; Michalzik, 1988; Davis, 2005; Rubio-Cisneros, 2008b, 2012). En el área de estudio esta formación ha sido subdividida en dos miembros: 1) el Miembro Inferior, caracterizado por secuencias de lutitas-limolitas-areniscas y conglomerados cortados caóticamente por cuerpos ígneos; y 2) el Miembro Superior, que está conformado por areniscas y conglomerados que sobreyacen de manera erosiva a la Unidad inferior (Rubio-Cisneros, 2008b). Esta formación ha sido interpretada como depósitos de ambientes continentales que pertenecen a sistemas fluviales dentro de ríos con morfologías trenzadas a anastomadas, conformados por las facies de gravas masivas, gravas con estratificación

cruzada de tipo tangencial, areniscas con estratificación cruzada, areniscas con estratificación cruzada de tipo planar, areniscas con estratificación laminar, areniscas con estratificación horizontal y carbonatos pedogénicos (Michalzik, 1991; Rubio-Cisneros, 2012).

Las areniscas de la Formación Huizachal composicionalmente son arenitas líticas con tendencias a sublitarenitas (Figura 3a), y presentan un bajo contenido de matriz. Los componentes no carbonatados extracuenca (NCE, según Zuffa, 1980), están representados por cuarzo monocristalino (Qm), con abundancias menores de cuarzo policristalino (Qp) y *chert*. Los feldespatos se presentan de manera constante en todas las muestras, siendo principalmente plagioclasa (P) con maclado polisintético, y raras veces alterados a sericita. Los feldespatos (F) pueden

o no presentar maclado Carlsbad, y alteran frecuentemente a caolinita. Los fragmentos líticos más abundantes son metamórficos de grado bajo a medio, líticos volcánicos con texturas felisíticas y *lathwork*, y ocasionalmente contienen líticos volcánicos con texturas microlíticas. Los fragmentos líticos volcánicos predominan dentro del Miembro Superior. De la base a la cima de la secuencia se observa un incremento en la madurez textural. La homogeneidad que presenta esta formación dentro del diagrama QFFR (cuarzo, feldespatos y fragmentos de roca) (Figura 3a), sugiere una relativa uniformidad composicional de toda la secuencia.

2.2. Formación La Boca (Jurásico Temprano–Medio)

La Formación La Boca está constituida por limolita, lutita, arenisca volcanoclástica, conglomerado y derrames de lavas, todas dentro de secuencias caóticas del tipo grano-y-estrato-decrecientes (Mixon, 1963; Fastovsky *et al.*, 2005; García-Obregón, 2008). Esta formación ha sido interpretada como un depósito de barras, canales y flujos de masa por gravedad, dentro de un sistema aluvio-fluvial y que deriva principalmente de rocas ígneas emplazadas a lo largo de la base y parte media de la secuencia (Fastovsky *et al.*, 2005; García-Obregón, 2008; Rubio-Cisneros, 2008b).

La Formación La Boca ha sido dividida en dos unidades: 1) Unidad Inferior, de edad Jurásico Temprano, orientada NW/SE con buzamientos semi-verticales ($\sim 75^\circ$), que consiste de intercalaciones de material volcánico (flujos de lava), volcanoclástico (flujo piroclástico, toba, toba cristalina, lahar e ignimbrita), y estratos sedimentarios conformados por limolita, lutita, arenisca y conglomerado (unidad *VES* según Fastovsky *et al.*, 2005); y 2) Unidad Superior, conformada por domos y flujos riolíticos que se encuentran intercalados con secuencias clásticas (Rubio-Cisneros y Lawton, 2011). Debido a que las condiciones de porosidad fueron propicias y se encuentran relacionadas directamente a las etapas finales de las extrusiones riolíticas, se pueden apreciar estratos de conglomerado y arenisca parcialmente silicificados por alteración hidrotermal.

El análisis petrográfico soporta la división de los dos miembros, indicando que la Unidad Inferior está constituida por arcosas líticas o feldespáticas, y litarenitas ($Q_{35}F_{30}L_{35}$), mientras que la Unidad Superior se presenta como arcosas feldespáticas y arcosas líticas ($Q_{m_{59}}F_9L_{32}$; Figura 3a). Ambas unidades contienen cuarzo policristalino conformados por agregados de más de tres cristales. Los cuarzos monocristalinos presentan extinción recta mayor que ondulosa. Los feldespatos están constituidos por feldespato potásico que muestra alteración a caolinita, mientras que las plagioclasas sódicas son menos abundantes y alteran a sericita. Los fragmentos líticos son principalmente de rocas metamórficas de grado bajo a medio (*e.g.*, esquistos de muscovita, serpentinita y gneises), y de rocas volcánicas con texturas *lathwork*, felsíticas y microlíticas. En menor grado se encuentran líticos sedimentarios de lutita y arenisca, siendo más comunes los líticos volcánicos y sedimentarios

dentro de la Unidad Superior. La pseudomatriz es del tipo felsítica constituida por microcristales de feldespato y cuarzo (Dickinson, 1970).

2.3. Formación La Joya (Calloviano)

La Formación La Joya está constituida por capas rojas de limolita, lutita, arenisca y conglomerado, así como intercalaciones de caliza hacia la cima de la secuencia. La Formación La Joya exhibe secuencias caóticas del tipo estrato-decrecientes y grano-decrecientes (Michalzik, 1988). Esta formación ha sido interpretada como depósitos de abanicos aluviales (fanglomerados), planicie aluvial, sabkha continental, sabkha marino-marginal y laguna. El espesor aproximado es de ~ 50 m (Michalzik, 1988). La Formación La Joya sobreyace por medio de una discordancia angular-erosiva a la Formación La Boca (Michalzik, 1991; García-Obregón, 2007; Rubio-Cisneros y Lawton, 2011).

Los constituyentes de grano grueso en los horizontes conglomeráticos incluyen fragmentos sedimentarios pertenecientes a unidades preexistentes como son: clastos derivados de material volcánico extrusivo y material foliado a esquistoso. El análisis petrográfico de areniscas con tamaño de grano medio a grueso permitió evaluar su composición y procedencia, mostrando que están constituidas por sublitarenitas (Figura 3a). El contenido de cuarzo es alto, distinguiéndose el tipo monocristalino con extinción recta, seguido del monocristalino con extinción ondulada y finalmente policristalino. El contenido de matriz es variable con un promedio general $< 20\%$. Existe una predominancia de feldespatos potásicos ($> 7\%$) sobre las plagioclasas ($< 1\%$). La media composicional de los componentes principales en las areniscas es de $Q_{71}F_5FR_{24}$. Esta composición está condicionada a la ubicación de la localidad y ligada con el tipo de roca adyacente. Por ejemplo, las rocas volcánicas generan más líticos volcánicos microlíticos, al igual que de rocas de los altos estructurales del basamento expuestos (Líticos metamórficos, $L_m \geq$ Líticos volcánicos, $L_v <$ Líticos sedimentarios, L_s).

2.4. Formación La Casita (Kinmmerigdiano–Berriasiano Temprano)

La Formación La Casita está caracterizada por secuencias grano-crecientes con intercalaciones de limolita, lutita y arenisca de grano fino-medio. Las estructuras sedimentarias presentes son mayormente laminaciones paralelas, gradación normal y laminaciones onduladas. El espesor de los estratos de arenisca varía de delgado a grueso, mientras que el de la lutita varía de muy delgado a muy grueso. El espesor máximo de esta formación en el área de estudio es de ~ 320 metros. La Formación La Casita ha sido interpretada como depósitos de prodelta y frente deltaico (Michalzik, 1988; Michalzik y Shumman, 1994). Los depósitos se caracterizan en composición por dos niveles arenosos

constituidos principalmente por arcosas y subarcosas, los cuales han sido interpretados sedimentológicamente como depósitos de un frente deltaico (Figura 3a; Ocampo-Díaz, 2007; Ocampo-Díaz *et al.*, 2008).

Ambos niveles se caracterizan por mostrar un contenido moderado de matriz constituida en general por material de limo muy fino (< 10 %), aunque también se presenta como pseudomatriz (*cf.*, Dickinson, 1970), con altos niveles de oxidación. La composición modal de los constituyentes principales que presenta esta formación son de $Q_{66}F_{27}FR_{7}$, con una desviación estándar < 5 %, evidenciando la homogeneidad en los depósitos de la Formación La Casita (Figura 3a). Los componentes NCE están representados principalmente por cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp) y en menor porcentaje *chert* (< 2 %). Los cuarzos monocristalinos desarrollan ocasionalmente bordes de crecimiento sintaxiales. Los feldespatos se presentan de manera constante en proporciones < 25 %, y están conformados por albita y ortoclasa con alteraciones a sericita y caolinita. Los fragmentos líticos son poco abundantes (< 10%), siendo los líticos volcánicos con texturas tobáceas y felsíticas los más frecuentes. Sin embargo, también se identificaron líticos sedimentarios de arenisca de grano muy fino, lutita y caliza micrítica. Los minerales accesorios son biotita, clorita, moscovita, circón y epidota.

2.5. Miembro Arenoso Galeana (Formación Taraises, Hauteriviense-Valanginiense)

El Miembro Arenoso Galeana está constituido por intercalaciones de lutita y arenisca. Las areniscas son de grano fino a grueso. El espesor total reportado es variable y alcanza los 450 m (Galeana), 150 m (Potrero Prieto) y 130 m (Rayones). El espesor de la secuencia desaparece hacia el norte del área de estudio (Ocampo-Díaz, 2007; Ocampo-Díaz *et al.*, 2008).

Las relaciones estratigráficas presentes en el Miembro Arenoso Galeana son: 1) sobryace de manera concordante al Miembro Inferior de la Formación Taraises en las áreas de Potrero Prieto y Rayones, y mediante una discordancia angular en el área de Galeana; 2) subyace de manera transicional al Miembro Superior de la Formación Taraises. De acuerdo con Ocampo-Díaz (2007) y Ocampo-Díaz *et al.* (2008), la arenisca del Miembro Arenoso Galeana presenta siete asociaciones de facies que han sido interpretadas como depósitos de planicie mareal, canales mareales, planicie de lodos, prodelta, frente deltaico dominado por mareas y dunas subacuosas.

Ocampo-Díaz (2007) describe las características sedimentológicas de estas asociaciones de facies con base en: 1) secuencias del tipo grano- y estratodecreciente; 2) gradación normal abundante, estratificación lenticular, estratificación cruzada de tipo *herringbone*, estratificación de tipo *flaser* y estratificación cruzada de tipo tangencial, generada por la migración de dunas; 3) fósiles traza clasificados como *Tallasinoides*, *Skolithos*, *Diplocaterium*

y *Rhizocorallium*; y 4) canales mareales con secuencias que se adelgazan hacia la cima con gradación normal, laminaciones cruzadas de tipo planar, o rara vez tangencial y lodos dobles acoplados.

Las características sedimentológicas descritas previamente sugieren que las areniscas del Miembro Arenoso Galeana fueron depositadas en una planicie mareal (área de Potrero Prieto), dentro de un sistema de línea de costa deltaico influenciado por mareas y depósitos sublitorales (área de Galeana), y dunas subacuosa (área de Rayones; Ocampo-Díaz, 2007). Los depósitos de planicie mareal progradan a depósitos del sistema deltaico (Este-Oeste) y cambian lateralmente a depósitos de dunas subacuosas (Norte-Sur; Ocampo-Díaz *et al.*, 2008).

Las areniscas colectadas en el Miembro Arenoso Galeana están representadas composicionalmente por arcosas líticas con tendencia a subarcosas, variando de moderadamente a bien clasificadas ($Q_{61}F_{29}FR_{10}$; Figura 3a).

Los principales constituyentes no carbonatados extracuencales de las areniscas del Miembro Arenoso son: 1) cuarzos monocristalinos con extinción recta mayor que ondulada, con estrías que texturalmente son subangulosos a redondeados, presentan contactos rectos, de punto y cóncavo-convexos; 2) cuarzo policristalino ($Qp < 3c$ y $Qp > 3c$), subredondeados a redondeados, los contactos de los cuarzos policristalinos son suturados con fabrica tectónica y ocasionalmente con contactos rectos en forma de Y, en ángulos de 120° y presentan extinción ondulada; 3) los feldespatos son de dos tipos: (i) feldespatos potásicos, subangulosos a subredondeados, con maclado tipo Carlsbad, y algunos alteran a caolinita y, (ii) las plagioclasas sódicas, principalmente albitas, subangulosas a subredondeadas, presentan un maclado tipo polisintético y algunas veces combinado (Plagioclasa/Feldespato Potásico $K = 1.30$); 4) los fragmentos de roca son subredondeados a redondeados con una redondez que varía de moderada a alta, en orden de abundancia son de arenisca de grano fino, lutita y fragmentos de roca volcánica con texturas felsíticas, volcánicos con texturas *lathwork*, volcánicos microlíticos y líticos metamórficos de bajo grado; 5) los minerales accesorios son moscovita y biotita, presentes en forma alargada o tipo hoja. La moscovita también se presenta dentro de los cuarzos policristalinos, donde son visibles minerales pesados, posiblemente hematita y circón.

3. Metodología

Para determinar y comprender los procesos de reciclamiento y canibalismo se analizaron 300 láminas delgadas de arenisca media a gruesas de las distintas áreas estudiadas utilizadas en los trabajos hechos por García-Obregón (2007), Ocampo-Díaz (2007), Ramos-Ledezma (2007) y Rubio-Cisneros (2008a). Del total de láminas se seleccionaron 106 para realizar un riguroso conteo de puntos (~ 1000), exclusivamente de los componentes

como son los feldespatos alcalinos (F), plagioclasas (P), líticos metamórficos (Lm), líticos volcánicos (Lv) y líticos sedimentarios (Ls).

Para concretar el cálculo del Índice de reciclamiento sedimentario (InReSe) fue necesario realizar una transformación de las variables hacia aditivas-logarítmicas (alr), centradas-logarítmicas (clr) e isométrica-logarítmica (ilr). Esto con la finalidad que la información composicional tengan una escala real dentro del *simplex*. Para un mayor detalle de cómo realizar estas transformaciones estadísticas se recomienda revisar las metodologías propuestas en las siguientes fuentes bibliográficas Aitchison (1986,1992), Barceló *et al.* (1996), Weltje (2002) y Ohta y Arai (2007).

4. Resultados

4.1. Análisis Composicional y Evidencias de Reciclado

Como se ha descrito previamente, en diversos niveles de la columna estratigráfica de la Fosa de Monterrey se presentan discordancias angulares-erosivas de moderada importancia tectono-sedimentaria (Ocampo-Díaz, 2011 y 2012; Rubio-Cisneros, 2012). Tomando en consideración que las discontinuidades implican cambios en las áreas fuentes, su desarrollo también se ve reflejado en la composición modal de los sedimentos en relación con procesos geodinámicos, incluyendo los de tipo sedimentarios erosivos que marcan un *hiato* dentro del registro estratigráfico.

4.2. Composición General

El análisis modal muestra que las areniscas analizadas tienen variaciones composicionales significativas, principalmente en el contenido de los diferentes tipos de líticos y feldespatos (Figuras 3a y 3b). El cambio en el contenido de líticos se manifiesta en la concentración de líticos metamórficos de grado bajo a medio y volcánicos. Por lo cual, dentro del diagrama QFLt, se muestran distintas posiciones que marcan la evolución petrológica de la cuenca. Dentro de dicho diagrama, las muestras de la Formación Huizachal presentan alta madurez textural y se grafican en la parte superior del campo de orógenos reciclados (Figura 3b). Las muestras más inmaduras corresponden a las areniscas de la Formación La Boca, debido a su alto contenido de fragmentos líticos y su representación gráfica en el diagrama QFLt es con una tendencia hacia los arcos volcánicos (Figura 4). Las formaciones del Jurásico Temprano hasta el Jurásico Tardío por el contenido de (Qt) tienen un comportamiento con una tendencia casi lineal hacia las muestras de la Formación La Casita (La Boca–La Joya–La Casita; arco disectado–transición continental; Figura 3b). Sin embargo, las areniscas del Cretácico Temprano grafican en orógeno reciclado (Figura 3b). El aporte de feldespatos marca su *plexus* durante el depósito de la Formación la Joya y se enriquece en las formaciones del Jurásico Tardío

al Cretácico Temprano (formaciones La Casita y Taraises). En general el proceso composicional representa cambios significativos en la composición del área fuente (Figura 3b).

El diagrama QmFLt soporta las diferencias de composición entre las areniscas analizadas pudiendo observar que las muestras del: 1) Triásico Tardío (Formación Huizachal), son texturalmente las más maduras y mejor clasificadas, tienen una alta influencia de rocas metamórficas de grado bajo a alto, volcánicas y en menor proporción de rocas sedimentarias y plutónicas; 2) Jurásico Temprano (Formación La Boca), exhiben el mayor incremento de líticos volcánicos y feldespatos en toda la secuencia sedimentaria; 3) Jurásico Medio–Tardío (formaciones La Joya y La Casita), presentan un incremento en el contenido de cuarzo monocristalino (Qm) y cuarzo monocristalino con bordes de crecimiento sintaxiales; 4) Jurásico Tardío (Formación La Casita) presentan incrementos en el contenido de feldespatos, líticos volcánicos, líticos sedimentarios y cuarzo monocristalino con bordes de crecimiento sintaxiales; y 5) Cretácico Temprano (Miembro Arenoso Galeana de la Formación Taraises), revela un incremento en el contenido de feldespatos, líticos volcánicos y metamórficos (Figura 4).

4.3. Índices composicionales y reciclamiento

Con la finalidad de documentar y cuantificar los componentes que son sensibles al grado de transporte, a cambios en la composición de las áreas fuentes y aquellos que evidencien procesos sedimentarios asociados con discordancias, se han confrontado diversos parámetros petrográficos como son F/Qt, Qp/Qt, P/K, Lm/Qm, Ls/Qm y Lm/Lv.

Los parámetros que enfrenta las relaciones F/Qt *versus* Qp/Qt están relacionadas con el grado de transporte e indican que la Formación La Boca es texturalmente más inmadura en relación con las otras formaciones analizadas (Figura 5); entre tanto que la Formación La Casita es texturalmente la más madura y enriquecida en cuarzo (Figura 5). Aunado a ello, la relación F/Qt, muestra una disminución paulatina hacia la Formación La Casita, pero con un ligero incremento hacia el Miembro Arenoso Galeana de la Formación Taraises.

La relación Lm/Lv fue empleada para discriminar la influencia de las áreas fuentes del tipo metamórficas *versus* volcánica. Esta relación indica para las muestras de (1) la Formación Huizachal la presencia de un elevado aporte de rocas metamórficas de grado bajo a alto, (2) la Formación La Boca que están más influenciadas por rocas volcánicas, mientras que esta relación aumenta hacia la Formación La Joya, (3) la Formación La Casita, disminución en su relación Lm/Lv, y (4) el Miembro Arenoso Galeana de la Formación Taraises incremento en su relación del área fuente metamórfica contra volcánica.

La relación Ls/Qm se utilizó para determinar el grado de reciclamiento intraformacional o canibalismo y de

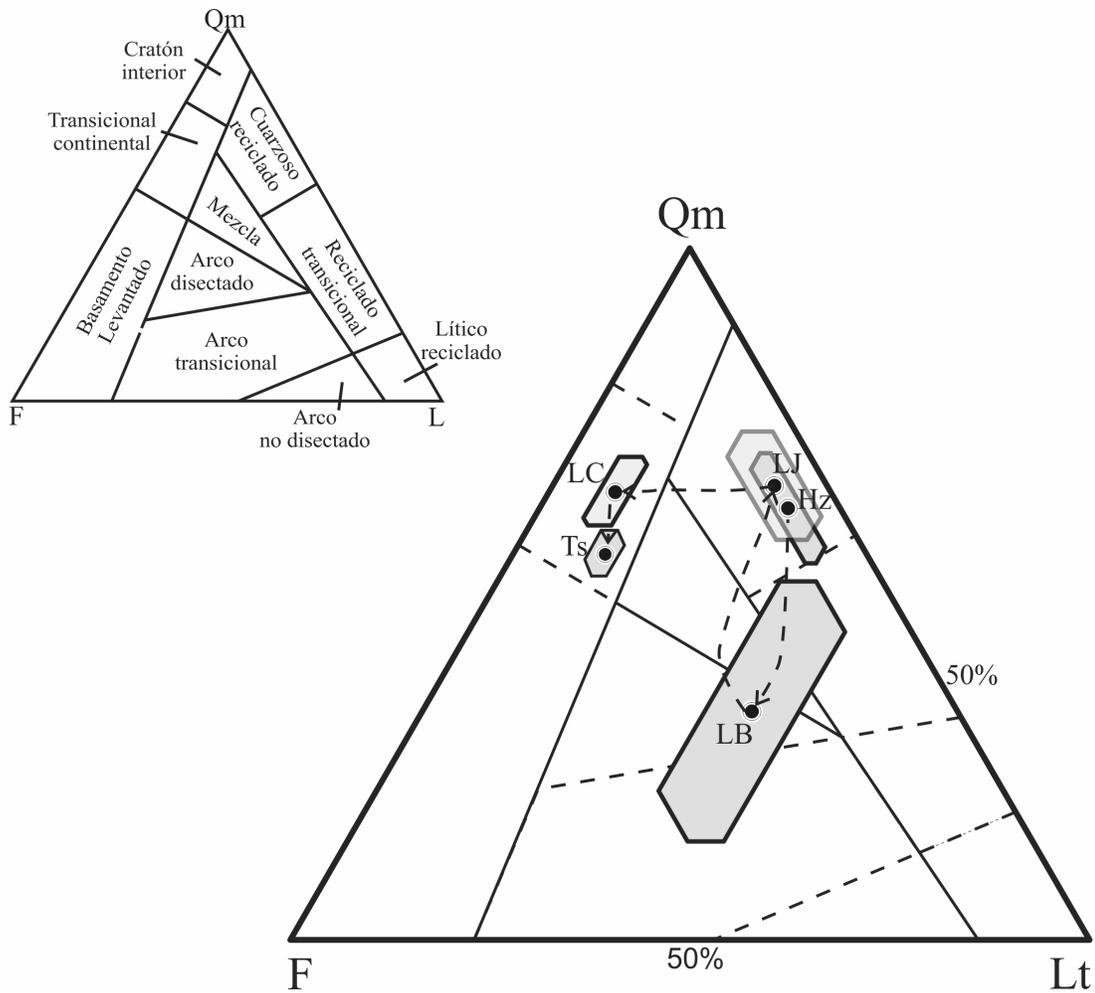


Figura 4. Diagrama ternario QmFLt de Dickinson *et al.* (1983), para determinar ambiente tectónico.

reciclamiento sedimentario. Los valores obtenidos de esta relación indican que las muestras de la Formación La Boca tiene aporte de material sedimentario del tipo arenisca y lutita. La Formación La Joya marca el aporte de rocas metamórficas y volcánicas. La Formación La Casita presenta valores bajos en Ls/Qm, y, finalmente, el Miembro Arenoso Galena muestra una amplia influencia de líticos sedimentarios (*e.g.*, areniscas, lutitas y calizas).

4.4. Índice de Reciclamiento Sedimentario (InReSe)

El análisis de los diversos índices de reciclamiento, composicionales y de grado de madurez textural, aunado con los resultados del análisis de *Q-cluster* y de correlación, permiten proponer un forma empírica de calcular un índice de reciclamiento sedimentario (InReSe). La ecuación propuesta para realizar el cálculo del InReSe es la siguiente:

$$InReSe = \frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^n Xi)^2 + \sum_{i=1}^n (Xi * Yi)}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n Yi)^2 + \sum_{i=1}^n (Yi * Xi)}} \quad (1)$$

donde:

$$Xi = X1 (Qp) + X2 (Qt) + X3 (Qm)$$

$$Yi = Y1 (Lm) + Y2 (Ls) + Y3 (Lv) + Y4 (F) + Y5 (P)$$

En la ecuación InReSe el numerador representa la relación que existe entre los componentes estables e indicadores de grado de transporte, madurez textural y reciclamiento de areniscas. Los componentes del numerador están representados por la sumatoria elevada al cuadrado del cuarzo policristalino, cuarzo monocristalino y el cuarzo total, más la relación que existe entre los componentes estables multiplicada por los inestables. El denominador maximiza la relación de los elementos inestables elevados al cuadrado, lo que permiten interpretar los cambios en la composición del área fuente, aportes nuevos de rocas madres y sus posibles relaciones con la dinámica litosférica. Los componentes en el denominador son feldespatos, plagioclasas, líticos volcánicos, líticos metamórficos y líticos sedimentarios.

Los resultados del análisis del índice de reciclamiento sedimentario indican que cuando los valores del denominador disminuyen (*e.g.*, feldespatos y/o líticos volcánicos), se

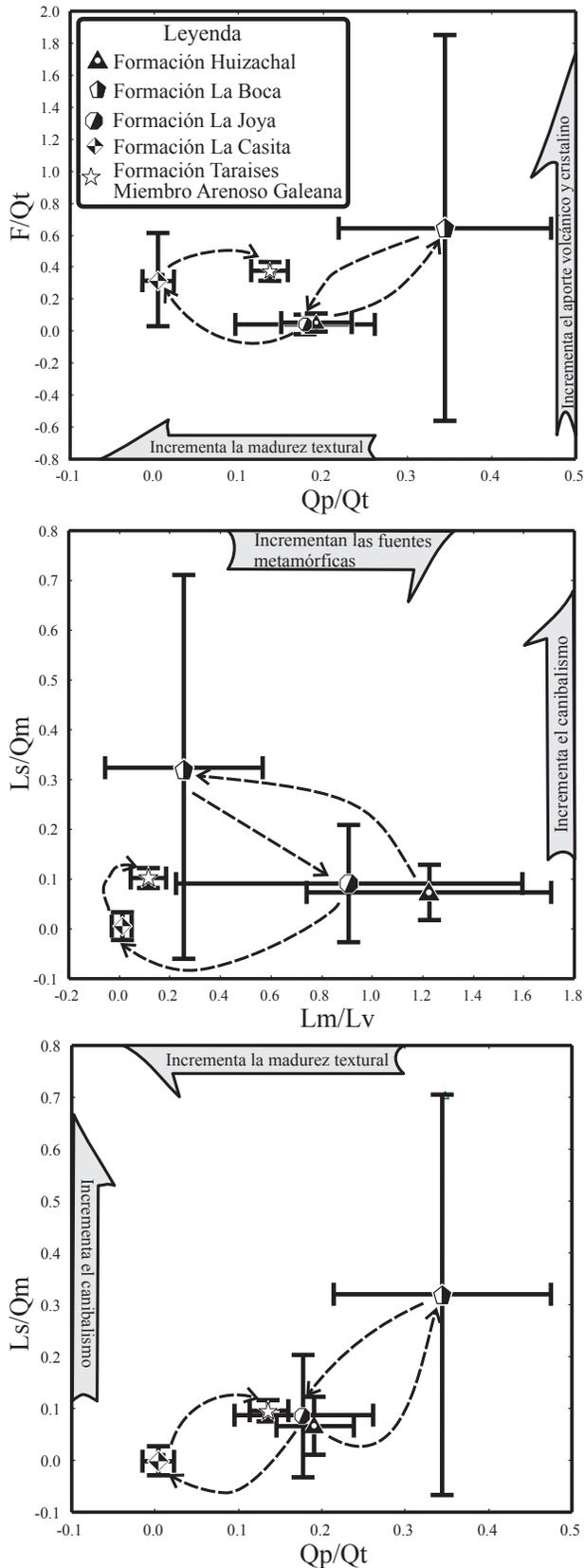


Figura 5. Diagramas binarios que enfrentan los parámetros a) F/Qt versus Qp/Qt ; b) Ls/Qm contra Lm/Lv ; y c) Ls/Qm versus Qp/Qt .

incrementan los elementos indicadores de transporte y madurez textural (e.g., cuarzo monocristalino); en este caso los valores obtenidos son mayores a 0.6 hasta 5. Por el contrario, cuando los valores del numerador disminuyen se incrementan los valores del denominador relacionados con el aumento de constituyentes inestables como son feldespatos, plagioclasas. Por lo tanto, mientras los valores del InReSe sean más cercanos a cero existirá un mayor aporte de elementos inestables en los sedimentos. Las observaciones a los resultados del InReSe lo clasifican como un cálculo sensible que permite interpretar los cambios en la composición del área fuente, el canibalismo/reciclamiento, las modificaciones relacionadas con la diversidad de las facies, así como también los cambios ligados a las discordancias tectono-sedimentarias.

4.1.1. Validación de InReSe

Con la finalidad de comprobar y validar el InReSe se ilustran cuatro casos específicos. El primero se realiza para mostrar que los valores que arroja el InReSe son sensibles a los cambios de facies y al tamaño de grano relacionados con depósitos mareales del Miembro Arenoso Galeana de la Formación Taraises (Ocampo-Díaz, 2007). El segundo caso documenta los procesos de reciclamiento o canibalismo relacionado la migración de los depósitos de dunas subacuosas en el Miembro Arenoso Galeana de la Formación Taraises (ver Ocampo-Díaz, 2007 y Ocampo-Díaz *et al.*, 2008). El tercer caso explica el comportamiento de los cambios en los valores del InReSe y su posible relación con los procesos de generación de discordancias angulares y erosivas presentes dentro de la columna sedimentaria de la Fosa de Monterrey. Por último el cuarto caso se relaciona con los valores calculados para los cuatro ambientes tectónicos propuestos por Dickinson y Suczek (1979).

4.4.1.1. Caso 1: Depósitos mareales del Miembro Arenoso Galeana, área de Potrero Prieto.

El comportamiento del InReSe muestra para los depósitos mareales del Miembro Arenoso Galeana en el área de Potrero Prieto que: 1) los depósitos de arenas mareales basales presentan un comportamiento cíclico con valores de InReSe entre 0.55 y 0.63 (Figura 6); 2) las muestras relacionadas con facies de canales mareales exhiben valores de InReSe que se incrementan de 0.56 a 0.69; 3) los valores del InReSe decrecen para las areniscas depositadas en las facies de desbordes de canal (~ 0.56), y se incrementan en los sedimentos relacionados con los depósitos de margen de canal (~ 0.62); y 4) el valor más elevado del índice de reciclamiento sedimentario fue documentado en las muestras para los depósitos de tormenta o alto oleaje (~ 0.70; muestra PP-8).

4.4.1.2. Caso 2: Depósitos de dunas subacuosas, área de Rayones.

Los depósitos de dunas subacuosas del Miembro

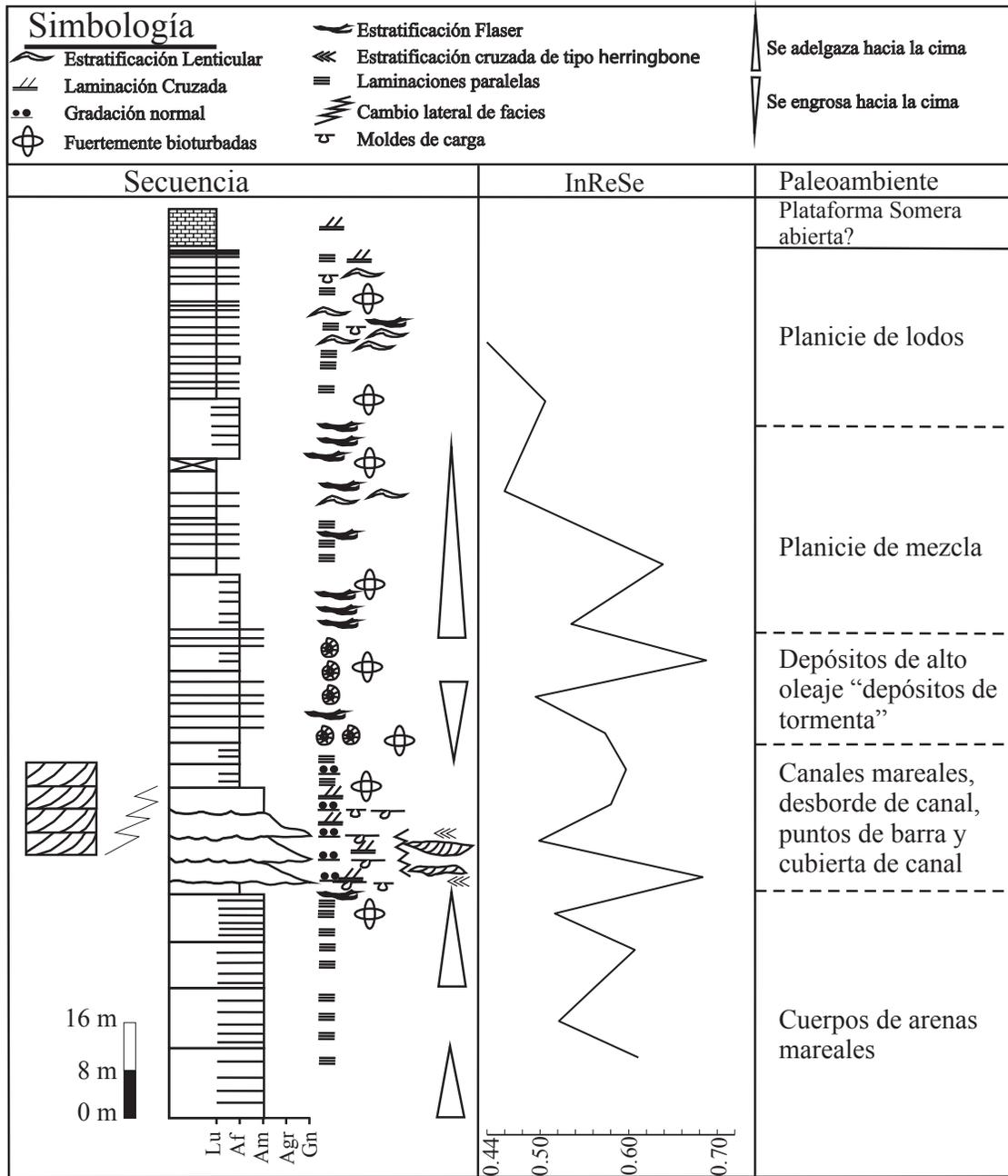


Figura 6. Evolución del InReSe, dentro de los depósitos de planicie mareal del Miembro Arenoso Galeana, Formación Taraises (Modificada de Ocampo-Díaz *et al.*, 2008). Nótese la sensibilidad del índice a los cambios del tamaño de grano, cambios de facies *e.g.*, desborde de canal contra puntos de barra) y eventos de tormenta.

Arenoso Galeana en la Formación Taraises se caracterizan por mostrar al menos dos superficies de reactivación relacionadas con la migración de dunas subacuosas hacia la parte central de la cuenca (Ocampo-Díaz, 2007). Los valores del índice de reciclamiento sedimentario son bajos en los estratos alejados de la superficies de reactivación (~0.55; Figura 7), y se incrementan a medida que el registro de muestras se acerca a estratos aledaños o posteriores a la superficie de reactivación (~0.84, muestra R-21; ~0.78, muestra R-6).

4.4.1.3 Caso 3: Aplicación del InReSe a las discordancias angulares-erosivas de la Fosa de Monterrey.

Las discordancias angulares-erosivas documentadas dentro de las secuencias clásticas de la columna estratigráfica de la Fosa de Monterrey han sido interpretadas como superficies asociadas a procesos tectónicos (Ocampo-Díaz, 2011, 2012; Rubio-Cisneros, 2012). El análisis de los valores de InReSe de las areniscas que sobreyacen a estas superficies, e incluso de las diferentes unidades

internas, hace posible discriminarlas en discordancias angulares-erosivas relacionadas a dos procesos: 1) tectono-sedimentarios; y 2) intraformacionales (Figura 8; Rubio-Cisneros y Ocampo-Díaz, 2010; Ocampo-Díaz, 2011, 2012; Rubio-Cisneros, 2012).

Discordancias extraformacionales de carácter tectono-sedimentario:

1. La base reportada para la Formación Huizachal en el área de San Paulo Tranquitas descansa de forma erosiva y angular respecto a las rocas del Paleozoico o bien rocas cristalinas más antiguas que conforman el basamento y muestra valores de InReSe altos (~ 0.81 ; Tabla 1).
2. La discordancia angular-erosiva documentada por Rubio-Cisneros (2008a) entre las unidades Inferior y Superior de la Formación Huizachal en el área de San Pablo Tranquitas, se caracteriza por exhibir valores del índice de reciclamiento sedimentario de ~ 0.81 en la Unidad Inferior y disminuye a ~ 0.67 en la Unidad Superior (Figura 8).
3. La superficie entre las Formaciones Huizachal y La Boca, del Triásico Tardío y Jurásico Temprano respectivamente, muestra una clara disminución de los valores del índice de reciclamiento sedimentario

de ~ 0.81 a ~ 0.37 (Figura 8 y Tabla 1).

4. Otra discordancia angular-erosiva de escala mayor está presente entre las Formaciones La Casita y Taraises en el área de Galeana, Nuevo León (Miembro Arenoso Galeana). Los valores obtenidos del InReSe en las areniscas del Miembro Arenoso Galeana muestran valores promedio de ~ 0.62 (Figura 8 y Tabla 1), exhibiendo una pequeña disminución con respecto a las areniscas de la Formación la Casita (~ 0.69 ; Tabla 1). Discordancias menores de carácter intraformacional:

1. La discordancia angular-erosiva de carácter intraformacional reportada por Fastovsky *et al.* (2005) y Rubio-Cisneros y Ocampo-Díaz (2010) representa el límite entre el Miembro Inferior de la Formación La Boca (unidad VES de acuerdo con Fastovsky *et al.*, 2005) y su Miembro Superior documentado por Rubio-Cisneros y Lawton (2011). En este caso, los valores del InReSe son en promedio de ~ 0.37 en la Unidad Inferior y se incrementan a ~ 0.66 en la Unidad Superior (Figura 8 y Tabla 1).
2. Rubio-Cisneros y Ocampo-Díaz (2010) y Rubio-Cisneros (2012) documentan una discordancia angular-erosiva en la Formación La Joya. La superficie divide informalmente a la formación en Unidad Inferior y Unidad Superior. Las muestras colectadas en la Unidad Superior presentan valores muy elevados de InReSe (~ 0.90).

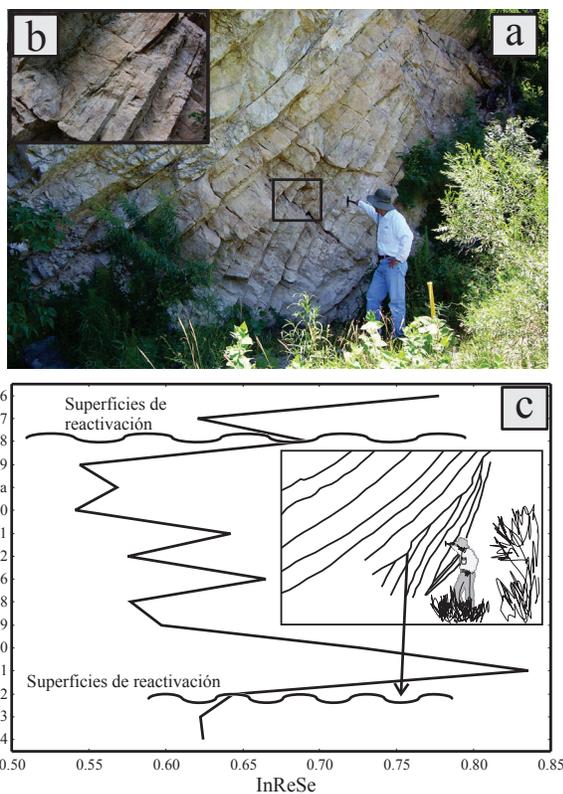


Figura 7. Comportamiento del InReSe, dentro de los depósitos de dunas subacuáticas del Miembro Arenoso Galeana, Formación Taraises. Obsérvese que los valores se incrementan en estratos subsiguientes a las superficies de reactivación.

4.4.1.4. Ambientes geotectónicos.

Se analizaron las 88 muestras documentadas por Dickinson y Suczek (1979) para documentar el comportamiento de los valores del índice de reciclamiento sedimentario en función del ambiente geotectónico. De acuerdo con estos

Tabla 1. Valores del Índice de Reciclamiento Sedimentario con sus respectivos límites al 99% de nivel de confianza.

Formación	Media	InReSe	
		99 lim. de conf.	-99 lim. de conf.
Form. Huizachal Inferior n=10	0.81	0.95	0.67
Form. Huizachal Superior n=10	0.67	0.73	0.6
Form. La Boca Inferior n=15	0.37	0.48	0.25
Form. La Boca Superior n=12	0.66	0.75	0.58
Form. La Joya Inferior n=15	0.7	0.75	0.64
Form. La Joya Superior n=14	0.9	1.01	0.8
Form. La Casita n=10	0.69	0.73	0.64
Form. Taraises n=20	0.62	0.64	0.59

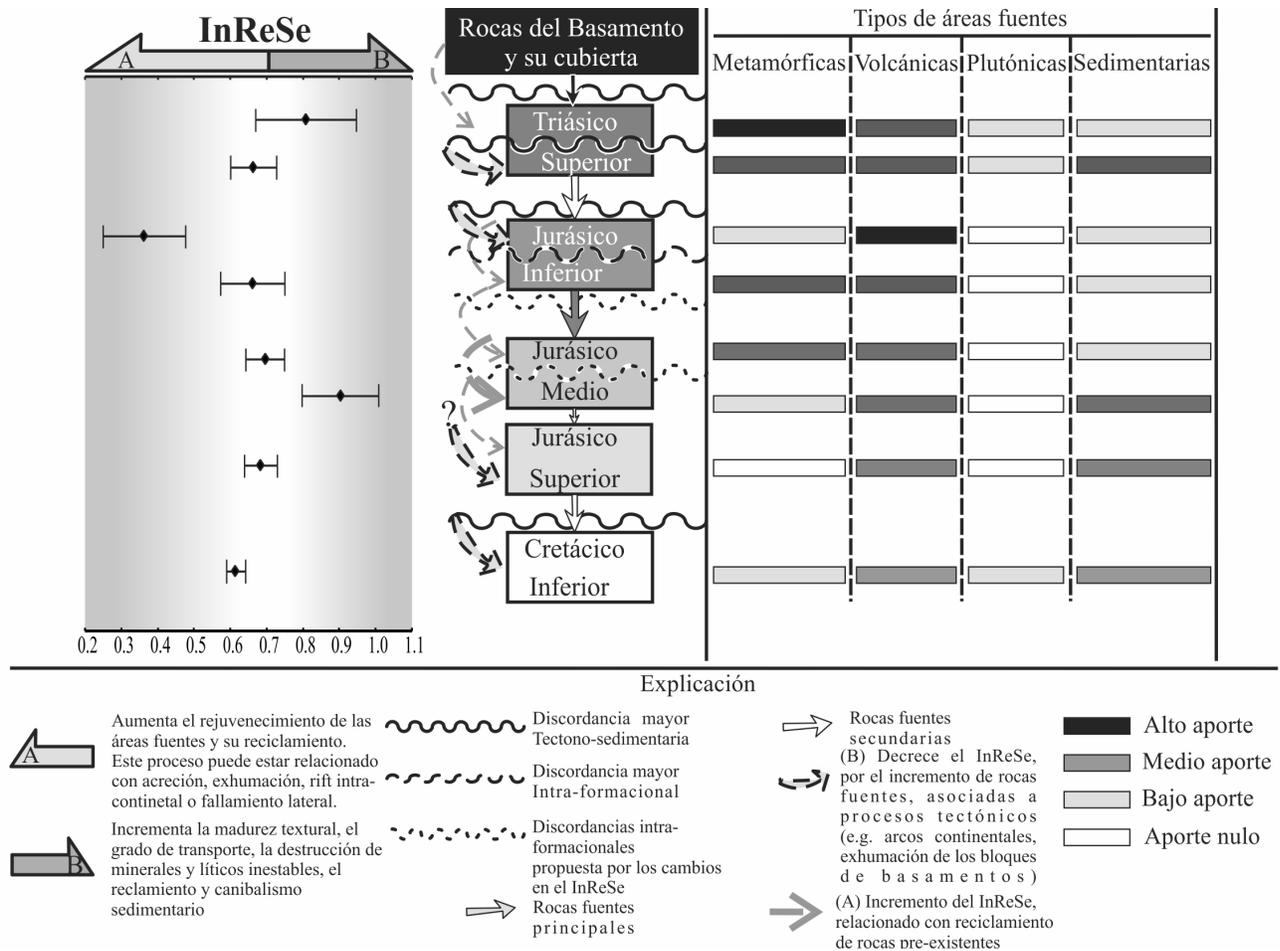


Figura 8. Esquema de las posibles áreas fuentes en las secuencias clásticas de la Fosa de Monterrey, y los cambios que presenta el InReSe en relación con las discordancias y los cambios de aporte de sedimentos. Nótese que por medio de los cambios de los valores del InReSe, se pueden documentar posibles discordancias.

autores, el total de las muestras representan cuatro ambientes tectónicos principales: 1) bloques continentales, 2) orógenos reciclados, 3) mezcla de procedencias y 4) arco magmático. Los valores promedio de InReSe para cada ambiente son de ~ 2.6 para los bloques continentales, ~ 0.8 en orógenos reciclados, ~ 0.7 para las procedencias mezcladas y ~ 0.4 para los arcos magmáticos (Figura 9).

5. Discusión

El análisis petrográfico elaborado para determinar la composición modal de las areniscas del Triásico Tardío al Cretácico Temprano en la Fosa de Monterrey, permite establecer cuatro etapas de aporte de material clástico para las formaciones Huizachal, La Boca, La Joya, La Casita y Taraises:

1. Durante el Triásico Tardío el aporte de sedimentos estuvo ligado a procesos de adición y reciclamiento de las rocas cristalinas que conforman el basamento (e.g., Gneiss Novillo); así como también del material

clástico que conforma la cubierta paleozoica que sobreyace a las rocas del basamento. Esta hipótesis es soportada por el alto contenido de fragmentos líticos metamórficos y cuarzos mono- y policristalinos, los cuales evidencian áreas fuentes de composición metamórfica de grado bajo a alto y su destrucción/reciclamiento durante los procesos de transporte de fondo (Rubio-Cisneros, 2012).

2. De acuerdo con Rubio-Cisneros y Ocampo-Díaz, (2010) y Rubio-Cisneros *et al.* (2011), las rocas del Jurásico Temprano a Medio en la Fosa de Monterrey representan un cambio en la composición del área por el aporte de otros tipos de roca en contraste con la secuencia clástica subyacente. Este cambio se ve reflejado por el incremento de líticos volcánicos, líticos metamórficos y feldespatos en las muestras de la Formación La Boca (Rubio-Cisneros, 2012). Los resultados permiten interpretar el tiempo de depósito de la Formación La Boca como el lapso de mayor rejuvenecimiento de áreas fuentes, similar a lo documentado por Rubio-Cisneros *et al.* (2011).

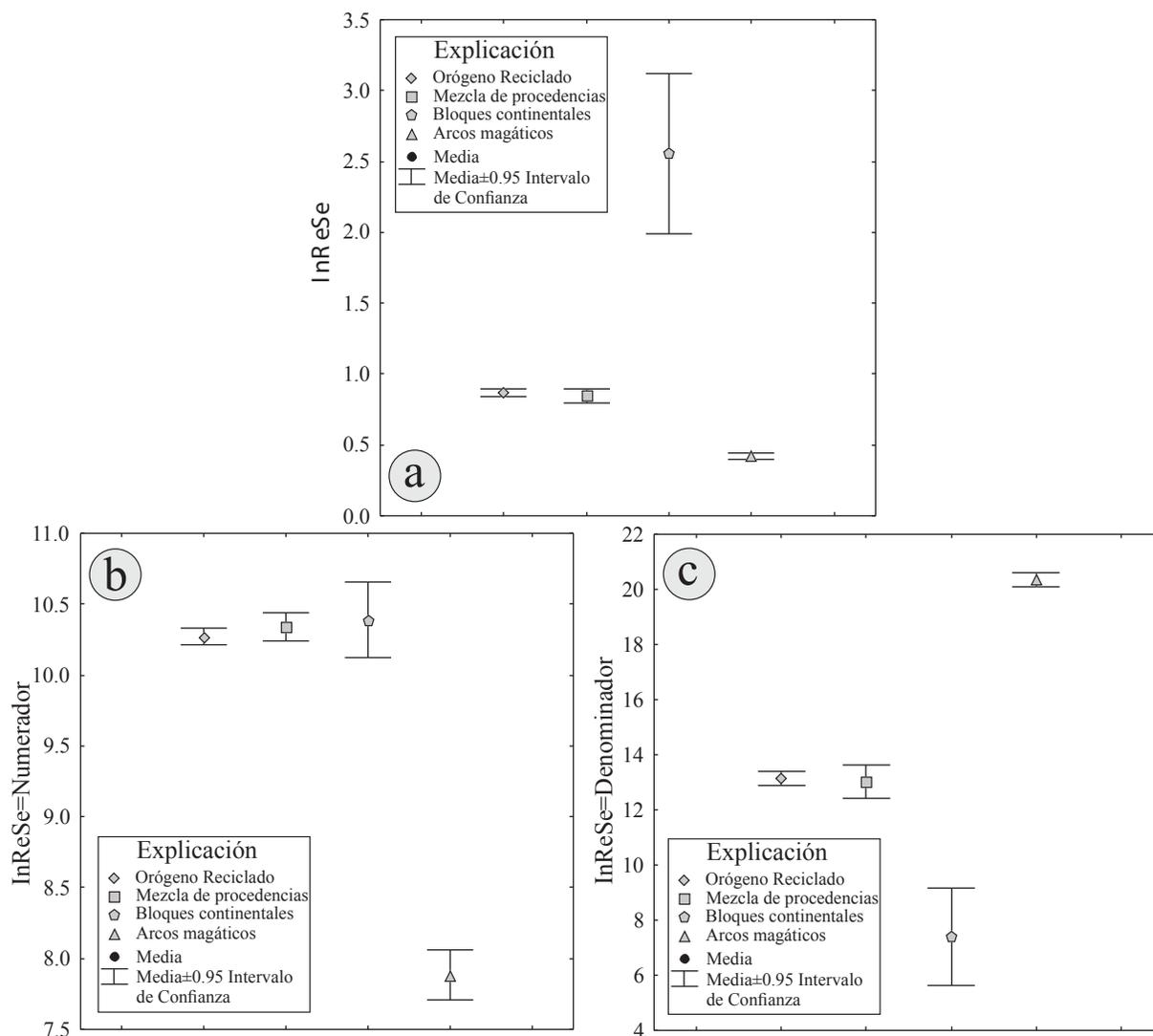


Figura 9. Comparación de los valores del InReSe en los diferentes ambientes tectónicos propuestos por Dickinson y Suczek (1979): a) relación completa del índice de reciclamiento sedimentario *versus* ambientes tectónicos; b) numerador de la ecuación del InReSe contra ambientes tectónicos; y c) valores arrojados por el denominador de la ecuación del InReSe versus ambientes tectónicos.

3. Del Jurásico Medio al Jurásico Tardío se presenta el periodo en el cual cesan los grandes aportes de material clástico, al igual que desaparecen progresivamente los componentes inestables tales como feldspatos y plagioclasas. Las Formaciones La Boca (Miembro Superior), La Joya y La Casita se ven influenciadas por el reciclamiento de las formaciones pre-existentes (*e.g.*, Formación Huizachal). La composición de las formaciones también sugiere poco aporte de las áreas fuentes metamórficas y volcánicas. Las muestras equivalentes a este lapso tienden a incrementar su grado de madurez textural, reflejado por el incremento de cuarzo monocristalino y cuarzo monocristalino con bordes de crecimiento sintaxial. Sin embargo, de manera particular se observa que las Formaciones La Joya y La Casita representan el reciclamiento de

formaciones subyacentes. La Formación La Casita exhibe un incremento en el contenido de feldspatos y líticos volcánicos y metamórficos, lo que indica un pequeño lapso de rejuvenecimiento de áreas fuente, y el reciclamiento de la cubierta sedimentaria preexistente, por la presencia de los líticos de origen sedimentario (*e.g.*, líticos carbonatados) y cuarzos con bordes de crecimiento sintaxiales. Basu *et al.* (2013), han documentado en secuencias estratigráficas de la India cuarzos de origen reciclado, sugiriendo que los cuarzos con bordes de crecimiento sintaxial pueden ser de origen por reciclamiento sedimentario o diagenético.

4. Durante el Cretácico Temprano existió otro proceso con aporte de rocas fuentes y reciclamiento de unidades existentes en la Fosa de Monterrey que está representado por el incremento de feldspatos, líticos

plutónicos, líticos volcánicos y líticos metamórficos (Figura 3b). Estos resultados son concordantes con la propuesta de Ocampo-Díaz (2011, 2012) y Ocampo-Díaz *et al.* (2012), que consiste en un evento de moderado rejuvenecimiento de las áreas fuentes para el Miembro Arenoso Galeana durante el Cretácico Temprano (Figura 4).

5.1. Índices composicionales

Las variaciones composicionales documentadas por el análisis petrográfico fueron corroboradas mediante el uso de índices composicionales y de grado de transporte o madurez textural. Las interpretaciones demuestran lo siguiente:

1. Las relaciones altas en el índice Qp/Qt , se pueden interpretar de dos maneras: 1) diferencias composicionales relacionadas con el tamaño de grano contra la distancia de transporte (areniscas de grano grueso *versus* areniscas de grano medio), o 2) un incremento en rocas fuentes de origen metamórfico. Las interpretaciones son concordantes con la propuesta de Young (1976) y Ocampo-Díaz (2007), quienes sugieren que a mayor distancia de transporte los cuarzos policristalinos con tamaño de gránulos o arenas muy gruesas tienden a fragmentarse en cuarzos monocristalinos del tamaño de arenas medias o finas. El incremento de áreas fuentes metamórficas en las muestras de la Formación La Boca está soportado con la propuesta de Rubio-Cisneros y Lawton (2011) y Rubio-Cisneros (2012), quienes por medio de un análisis geocronológico en circones detríticos por el método U-Pb documentan que hacia la parte superior de la Formación La Boca se incrementa el aporte de material de edad precámbrica correlacionable con rocas metamórficas de bajo a alto grado que conforman el Gneiss Novillo.
2. La relación F/Qt , permite evaluar el grado de transporte, como también cambios en el área fuente. Los valores elevados de F/Qt , sugieren un menor grado de transporte, cambios en la composición y rejuvenecimiento del área fuente. Las muestras de la Formación La Boca muestran valores elevados sugiriendo que existe un pulso de nuevo aporte de sedimentos, lo cual es correspondido por una alta erosión e influencia de rocas volcánicas y cristalinas. Esta interpretación es similar a la propuesta por Rubio-Cisneros y Lawton (2011), Rubio-Cisneros *et al.* (2011) y Rubio-Cisneros (2012), quienes sugieren que la Formación La Boca tiene mucho aporte de material volcánico y volcanoclásticos, derivados de la erosión del arco continental de Nazas. En cambio, el Miembro Arenoso Galeana de la Formación Taraises muestra un pequeño incremento en F/Qt , y ha sido interpretada por Ocampo-Díaz *et al.* (2012; Figura 5), por su relación a la adición de feldspatos de rocas cristalinas y volcánicas por la reactivación de fallas de basamento.
3. En el análisis cuantitativo, la relación Lm/Lv puntualiza para la Formación Huizachal un mayor aporte de rocas metamórficas, pero para las muestras del Miembro Arenoso Galeana solamente se presenta un pequeño incremento en el contenido de líticos metamórficos (Figura 5). Es necesario considerar las discordancias angular-erosivas sobre las cuales descansan la Formación Huizachal y el Miembro Arenoso Galeana por encima de formaciones preexistentes (Figura 5), siendo que ambas superficies tienen un origen relacionado con la reactivación de las fallas del basamento (*e.g.*, Ocampo-Díaz, 2007; Ocampo-Díaz, 2012; Rubio-Cisneros, 2012). Por lo tanto, el incremento de los líticos metamórficos se encuentra ligado a la exhumación del basamento y la génesis de ambas discordancias.
4. La relación Ls/Qm permite establecer la conexión entre reciclamiento o canibalismo sedimentario (Ls) y grado de transporte (Qm). Los resultados muestran a los líticos de lutitas y areniscas en La Formación La Boca como productos derivados posiblemente de la Formación Huizachal o de rocas paleozoicas (Figura 5). Por otra parte, los fragmentos sedimentarios de la Formación La Casita proceden de las formaciones subyacentes, algunas como son Formación Minas Viejas, Formación Zuloaga, Formación La Joya, etc. El incremento en el contenido de líticos sedimentarios se encuentra relacionado con el ambiente sedimentario, situación comprobada en los depósitos de tormenta del Miembro Arenoso Galeana con los valores más elevados de Ls entre todas las muestras (Figura 5). En cambio, la variable Qm está relacionada con procesos de transporte y selección, puesto que el cuarzo es considerado uno de los minerales más estables que constituyen a las areniscas. Las formaciones con mayor grado de transporte son Formación Huizachal, Formación La Joya y Formación La Casita, y la de menor grado de transporte es la Formación La Boca (Figura 5). Esta interpretación es concordante con la propuesta de Barboza-Gudiño (2012) y Rubio-Cisneros (2012), quienes sugieren que la Formación La Boca representa un sistema de arco continental tipo andino en erosión, aportando sedimentos clásticos y volcanoclásticos hacia una cuenca de tipo arco extensional. La Formación La Casita, por su baja relación Ls/Qm , permite ser interpretada como la formación con mayor grado de transporte, o bien estar ligada a un área fuente distinta a las unidades subyacentes. Por lo tanto la Formación La Casita no representa la erosión de la columna estratigráfica previa (Figura 5), un resultado concordante con la obra de Ocampo-Díaz (2011, 2012). Ocampo-Díaz (2011, 2012) propone que la Formación La Joya en la Fosa de Monterrey representa el fin de un ciclo de sedimentación relacionada con la apertura del Golfo de México y una subducción oblicua en la margen pacífica para el Jurásico Medio.

5.2. Validación y aplicación de los resultados obtenidos del InReSe

La aplicación del índice de reciclamiento sedimentario permite explicar e interpretar procesos auto- y alocíclicos relacionados con el tamaño de grano, selección mareal, reciclamiento por eventos erosivos, aunado a los procesos que generan discordancias angulares-erosivas registradas en diferentes periodos estratigráficos. En un estudio de caso concreto, el InReSe es aplicado a la columna sedimentaria de la Fosa de Monterrey por sus discordancias, las cuales han sido tradicionalmente interpretadas en ser generadas por procesos intraformacionales y factores alocíclicos (*e.g.*, Carillo-Bravo, 1961; Michalzik, 1988; Rubio-Cisneros, 2008).

5.3. Procesos alocíclicos versus autocíclicos en los depósitos mareales y dunas subacuosas reflejados en InReSe

De acuerdo con Klein (1971) y Dalrymple *et al.* (1992, 2006), los depósitos y ambientes sedimentarios relacionados con mareas son procesos alocíclicos. Las planicies mareales se encuentran muy influenciadas por los procesos autocíclicos como son la dimensión y sinuosidad de los canales o tamaño de grano, además de procesos alocíclicos que incluyen tormentas o periodos de alto oleaje. Partiendo de este concepto, los valores del InReSe en depósitos mareales más las observaciones sedimentológicas realizadas por Ocampo-Díaz *et al.* (2008), permiten interpretar lo siguiente: 1) los depósitos basales muestran patrones con variaciones con alternancia y repetición relacionadas a procesos autocíclicos, por las diferencias en el tamaño de grano (areniscas finas a medias; Figura 6), y alocíclicos que favorecieron el reciclamiento mareal validado por la presencia de lodos acoplados (Figura 6); 2) las muestras colectadas en los depósitos influenciados por canales mareales muestran un incremento en los valores del InReSe, indicando su conexión a procesos autocíclicos relacionados con la clasificación hidráulica de partículas en tamaño de grano (areniscas muy gruesas-microconglomerados), y el reciclamiento por acción de los canales mareales (*e.g.*, Allen, 1985); 3) los valores del InReSe son sensibles y disminuyen ante los procesos de desborde de canal, mostrando su relación autocíclica; por el contrario los valores se incrementan en las facies de desborde de canal; y 4) otra evidencia del incremento del InReSe para los procesos alocíclicos vinculados con canibalismo y/o reciclamiento es en los depósitos ligados a tormentas (Figura 6).

Las dunas subacuosas también soportan la relación de los procesos autocíclicos vs. alocíclicos. Los depósitos de dunas subacuosas son un caso texturalmente más maduro del resto aquí estudiado, y con una granulometría homogénea (Ocampo-Díaz, 2007). De acuerdo con Allen (1970, 1982), los depósitos de dunas subacuosas se caracterizan por mostrar secuencias cortas del tipo grano- y estratodecreciente, con el desarrollo de gradación normal y

laminaciones paralelas. Al término de cada ciclo es común observar estructuras sedimentarias como superficies de reactivación caracterizadas por una superficie lodosa y una discordancia angular-erosiva. La superficie lodosa marca el cese del aporte de sedimentos y su posterior reinicio en el reciclamiento/canibalismo parcial de los estratos inferiores. Los valores de InReSe son altos en los estratos que sobreyacen a las superficies de reactivación (~ 0.84 , R-21; ~ 0.78 , R-6; Figura 7).

El patrón cíclico del valor del InReSe cuantificado en el resto de las muestras indica cambios constantes en el aumento de grado de transporte y en la madurez textural. Ambos procesos se relacionan con el reciclamiento y canibalismo autocíclico del ambiente sedimentario que los genera (Allen, 1982).

5.4. Cambios en los valores del InReSe asociados a procesos intraformacionales y factores alocíclicos

Algunas interpretaciones previas a las discordancias angulares-erosivas extra- e intraformacionales de la columna estratigráfica en la Fosa de Monterrey sugieren una génesis ligada con el ambiente sedimentario y factores alocíclicos (*e.g.*, Salvador, 1987; Michalzik, 1988 y 1991). Sin embargo, recientemente fueron interpretadas como el resultado de procesos alocíclicos de carácter tectono-sedimentario (Ocampo-Díaz, 2011, 2012; Rubio-Cisneros, 2012). Bajo estas dos interpretaciones, los valores del índice de reciclamiento sedimentario en las areniscas que sobreyacen a algunas de las discordancias indican una conexión con procesos regionales de carácter tectono-sedimentario y eventos locales ligados a procesos intraformacionales.

5.5. El índice de reciclamiento sedimentario y su relación con procesos regionales de carácter tectono-sedimentario:

1. La Formación Huizachal descansa en discordancia angular de carácter tectono-sedimentaria sobre rocas del Paleozoico o rocas cristalinas del basamento, y exhibe valores altos por el reciclamiento de rocas subyacentes (~ 0.81). Esta interpretación es concordante con la propuesta por Rubio-Cisneros (2012), la cual sugiere que durante el Triásico Tardío ocurre un periodo de erosión y reciclamiento de rocas del basamento en el noreste de México, con procesos sedimentarios relacionados a la extensión ocasionada por el rompimiento del súpercontinente Pangea (Figura 8; Tabla 1). Los procesos de extensión favorecieron la exhumación de rocas cristalinas, mismas que fueron erosionadas y transportadas por grandes sistemas fluviales que propiciaron la destrucción de los minerales inestables y el enriquecimiento en cuarzo.
2. La Formación Huizachal fue documentada por Rubio-Cisneros (2008) por medio de un análisis petrográfico y geoquímico incorporando una discordancia de carácter

tectono-sedimentario. En ese estudio la Formación Huizachal es dividida informalmente en Unidad Inferior y Unidad Superior para el área de San Pablo Tranquitas. Los valores del índice de reciclamiento sedimentario en la Unidad Superior disminuyen de ~ 0.81 a ~ 0.67 , indicando la erosión, aporte e influencia de rocas volcánicas. La discordancia es interpretada como tectono-sedimentaria por su relación con procesos extensivos sin-*rift*, durante los cuales algunos cuerpos ígneos pudieron ser exhumados, erosionados y haber aportado material a las rocas clásticas (*cf.*, Ocampo-Díaz, 2011, 2012; Rubio-Cisneros, 2012; Figura 8).

3. El límite Triásico-Jurásico entre las Formaciones Huizachal y La Boca en la Fosa de Monterrey está representado por una discordancia angular-erosiva, vinculada a los procesos extensivos durante la apertura del Golfo de México (Michalzik, 1988; Ocampo-Díaz, 2012; Rubio-Cisneros, 2012). Estas interpretaciones son consideradas por algunos para representar a la Formación la Boca como la progradación de un sistema fluvial a otro de tipo aluvial durante la etapa extensiva (*e.g.*, Michalzik, 1991). Si la hipótesis anterior fuese acertada los valores del InReSe debiesen ser similares o más elevados que los que muestra la Formación Huizachal, indicando un reciclamiento o mayor grado de transporte. Sin embargo, la Formación La Boca muestra los más bajos valores de InReSe de la columna estratigráfica estudiada. La disminución en los valores del índice de reciclamiento sedimentario (~ 0.37 ; Tabla 1) indica el aporte de material clástico de nuevas áreas fuentes con carácter volcánico, metamórfico y plutónico (Figura 8). Los resultados son soportados por la propuesta de varios autores para relacionar a la Formación La Boca con características sedimentológicas de cuencas sedimentarias en arcos continentales de tipo andino de carácter extensional. Las cuencas se alojaron en la margen paleopácifica de México y favorecieron el rejuvenecimiento de las áreas fuentes, además del incremento de líticos volcánicos (*e.g.*, Pindell y Dewey, 1982; Barboza-Gudiño, 2008; Barboza-Gudiño *et al.*, 2008; Gray y Lawton, 2008; Rubio-Cisneros y Lawton, 2011; Ocampo-Díaz, 2012; Zavala-Monsiváis *et al.*, 2012; Figura 8).
4. La discordancia angular-erosiva presente entre las Formaciones La Casita y Taraises (Miembro Arenoso Galeana) en el área de Galeana, Nuevo León, es otra evidencia para interpretar procesos alocíclicos o tectono-sedimentarios registrados dentro de la Fosa de Monterrey. El InReSe en las areniscas del Miembro Arenoso Galeana muestran valores promedio de ~ 0.62 (Tabla 1), comparables con una pequeña disminución de los valores en las areniscas de la Formación La Casita (~ 0.69 ; Tabla 1). La disminución en el valor del InReSe en las areniscas del Miembro Arenoso Galeana de la Formación Taraises permite interpretar

un pequeño periodo de rejuvenecimiento de las áreas fuentes, principalmente de génesis plutónica, volcánica y metamórfica de grado bajo-medio (Figura 8). Las observaciones son concordantes con la propuesta de Ocampo-Díaz (2007), quien atribuye el desarrollo de la discordancia a procesos tectono-sedimentarios relacionados al levantamiento del Archipiélago de Tamaulipas y a subsidencia en el área de Galeana, Nuevo León.

5.6. El índice de reciclamiento sedimentario y su relación con procesos locales de tipo intraformacional

1. El incremento de los valores del InReSe en la Formación La Boca (~ 0.37 a ~ 0.66 ; Tabla 1), entre sus miembros Inferior y Superior documentado por Rubio-Cisneros y Lawton (2011), permite interpretarse como una discordancia de tipo intraformacional. La superficie representa una etapa de erosión para el Miembro Inferior de la Formación La Boca, constatado por un incremento en el contenido de cuarzos monocristalinos, líticos sedimentarios de lutitas o areniscas presentes en el Miembro Superior, y el posible reciclamiento de líticos volcánicos por el incremento de los valores de InReSe (Figura 8; Tabla 1).
2. La discordancia angular-erosiva localizada entre la Unidad Inferior y la Superior de la Formación La Joya presenta en sus muestras valores del InReSe muy elevados, sugiriendo periodos asociados con alto reciclamiento y canibalismo (~ 0.90 ; Tabla 1; Figura 8). El incremento en los valores del InReSe para la Formación La Joya y su posterior disminución hacia la Formación La Casita permiten establecer el cierre de un evento de sedimentación clástica, relacionado con la ruptura del súpercontinente Pangea y los arcos continentales de tipo andino. Esta interpretación es concordante con la propuesta de Ocampo-Díaz (2011, 2012) y Rubio-Cisneros (2012), quienes sugieren que la Formación La Joya en el noreste de México representa el depósito final de un gran ciclo de sedimentación clástica que va del Triásico Tardío al Jurásico Medio.

5.7. El índice de reciclamiento sedimentario en función del ambiente geotectónico

Los valores del InReSe muestran sensibilidad y cambios cuantitativos por sus valores dentro de los cuatro campos composicionales para areniscas propuestos por Dickinson y Suczek (1979). En la división de los campos los valores altos del InReSe están sujetos al ambiente relacionado con bloques continentales (~ 2.55 ; Figura 9). Los valores altos reflejan elevadas concentraciones de cuarzo monocristalino y policristalino, algo característico para esos ambientes. La abundancia de cuarzo sugiere una tendencia hacia un mayor grado de madurez textural (*cf.*, Dickinson y Suczek, 1979).

En cambio, los arcos magmáticos presentan los valores más bajos en InReSe entre los cuatro ambientes geotectónicos (~ 0.45 ; Figura 9). El InReSe es bajo por el incremento de los valores del denominador en la ecuación, que representan constituyentes inestables (*e.g.*, líticos volcánicos y feldespatos). De acuerdo con Dickinson y Suczek (1979), los ambientes relacionados con sistemas de arcos magmáticos son sistemas de alto aporte de material nuevo o rejuvenecimiento de áreas fuentes que principalmente aportan feldespatos y líticos volcánicos por la destrucción del arco (Figura 9).

Las muestras con valores intermedios están registradas de manera dispersa entre los campos de orógenos reciclados (~ 0.91) y procedencias mezcladas (~ 0.93). El resultado de la ecuación InReSe para estos ambientes geotectónicos refleja un equilibrio entre el numerador (fuentes ricas en cuarzos), y el denominador (fuentes ricas en líticos y feldespatos). Dickinson y Suczek (1979), proponen una coexistencia entre los sistemas geotectónicos de orógenos reciclados y mezclas de procedencias, por vincular el rejuvenecimiento de nuevas áreas fuentes, grado de transporte y madurez textural. La interpretación es concordante con las altas concentraciones de cuarzos monocristalinos y policristalinos, y aportes moderados en feldespatos y líticos (Figura 9).

6. Conclusiones

Este trabajo por sus análisis detalla la composición de las rocas fuentes que dieron origen a las secuencias del Triásico Tardío al Cretácico Temprano de la Fosa de Monterrey. También fue posible identificar algunos procesos de reciclado y canibalismo sedimentario al que se encuentran asociadas en la génesis para las secuencias clásticas de las Formaciones Huizachal, La Boca, La Joya y La Casita así como el Miembro Arenoso Galeana de la Formación Taraises. Las variaciones composicionales de las muestras analizadas son muy marcadas, variando desde areniscas ricas en fragmentos líticos metamórficos (Formación Huizachal), líticos volcánicos (Formación La Boca), líticos sedimentarios (Formación La Boca y Formación La Casita), y ricas en feldespatos, líticos volcánicos, metamórficos y plutónicos (Miembro Arenoso Galeana).

Los cambios composicionales entre formaciones se pueden comparar dentro del esquema de clasificación propuesto por McBride (1963), donde las muestras se clasifican como litarenitas (Formación Huizachal; Figura 3a), arcosas feldespáticas (Formación La Boca), sublitarrenitas (Formación La Joya), subarcosa (Formación La Casita; Figura 3a) y arcosas líticas (Miembro Arenoso Galeana; Figura 3a). Los modos detríticos sujetos a los diagramas QFLt y QmFLt muestran una evolución que va del campo de cuarzoso reciclado (Formación Huizachal), al arco reciclado (Formación La Boca), hacia cuarzoso reciclado (Formación La Joya) y a transición continental (Formación La Casita y Formación Taraises; Figuras 3b y 4).

Las variaciones composicionales de las muestras estudiadas están soportadas por confrontar diversos índices composicionales y de reciclamiento, que representan los procesos de rejuvenecimiento de rocas fuentes, reciclamiento y canibalismo sedimentario. El canibalismo sedimentario está corroborado por el incremento de líticos sedimentarios de lutitas (relación Ls/Qm). El rejuvenecimiento de las áreas fuentes está condicionado por el incremento de Lv/Lm en muestras con alto de fragmentos metamórficos (Formación Huizachal > Formación La Casita; Figura 5). Los índices composicionales soportan la disminución del aporte de áreas fuentes hasta el Jurásico Medio. Esto sugiere para la Formación La Joya su génesis a partir del reciclamiento de las Formaciones Huizachal y La Boca, mientras que durante el Jurásico Tardío (Formación La Casita) y Cretácico Temprano (Formación Taraises), se presenta un periodo de reciclado y rejuvenecimiento de las áreas fuentes.

El uso de relaciones composición para áreas fuentes y reciclado (*e.g.*, F/Qt), adicionadas al análisis composicional permiten interpretar en la columna estratigráfica de la Fosa de Monterrey en la Sierra Madre Oriental tres discordancias relacionadas con eventos tectono-sedimentarios: 1) el Triásico Tardío representa la erosión de rocas cristalinas del basamento (*e.g.*, gneiss, esquistos, rocas plutónicas y volcánicas), documentado por las abundantes proporciones de cuarzo monocristalino y líticos metamórficos (Figura 8); 2) el Jurásico Temprano es un periodo con alto rejuvenecimiento de rocas fuentes principalmente volcánicas, como lo sugiere la presencia de líticos volcánicos y en menor proporción de tipo metamórficos de grado bajo a alto (Figura 8); y 3) el Cretácico Temprano representa un moderado rejuvenecimiento de rocas del basamento y es soportado por la presencia de líticos volcánicos, metamórficos de grado bajo-medio y plutónicos.

La discriminación de los constituyentes relacionados con el grado de transporte (*e.g.*, Qm), y de los indicadores de composición de las áreas fuentes (*e.g.*, F, Lm), fueron sometidos a un análisis de *Q-cluster* y matrices de correlación para construir un índice de reciclamiento sedimentario (InReSe). El InReSe es una ecuación que documenta, cuantifica y permite validar tres discordancias angulares-erosivas en el noreste de México, relacionadas con procesos alocíclicos documentadas por diversos autores (*e.g.*, Michalzik, 1988; Ocampo-Díaz, 2007; Rubio-Cisneros, 2008). Los incrementos en los valores del InReSe en las formaciones y miembros informales de Jurásico Temprano y Jurásico Medio permiten interpretarse como discordancias angulares-erosivas relacionadas al proceso de reciclamiento y canibalismo entre procesos autocíclicos del ambiente sedimentario.

También, el InReSe ha permitido soportar interpretaciones documentados por Rubio-Cisneros (2008) para la discordancia angular-erosiva en la Formación Huizachal, que la divide en Miembro Inferior y Miembro Superior. El incremento en el contenido de líticos volcánicos sugiere que la discordancia está relacionada con procesos tectono-

sedimentarios que favorecieron la posible destrucción de los cuerpos ígneos presentes en el Miembro Inferior.

El InReSe fue aplicado en tres casos de estudio particulares, y permiten demostrar susceptibilidad composicional por cambios de facies, tamaño de grano, y tipos de áreas fuente. La aplicación del índice no solo justificó factores autocíclicos y alocíclicos, sino también variaciones composicionales en los cuatro ambientes tectónicos propuestos por Dickinson y Suczek (1979). Los resultados permiten relacionar a los ambientes, en donde los sistemas de bloques continentales se asocian a distancias grandes de transporte. Otros ambientes, como los arcos magmáticos se emparentan con periodos de rejuvenecimiento de las áreas fuentes por procesos de exhumación y erosión de las rocas, aportando a los sedimentos con feldespatos, plagioclasas, líticos volcánicos, líticos sedimentarios y líticos metamórficos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACyT, por las becas doctorales. A Uwe Jenchen y Martín Guerrero-Suastegui por los comentarios y sugerencias al InReSe. A Gabriel Chávez-Cabello, por el enriquecer con sus críticas y comentarios la versión temprana del presente manuscrito. Apreciamos el préstamo de muestras por parte de Ramos-Ledezma. A Aarón Ulises Ocampo-Díaz y Roberto Soto-Villalobos por el soporte matemático de la ecuación del InReSe. A Margarita Martínez-Paco, por la revisión crítica del manuscrito. Finalmente a los dos árbitros que con sus valiosas observaciones y sugerencias han enriquecido el presente manuscrito. Finalmente a los revisores anónimos que con sus valiosos comentarios enriquecieron enormemente la versión final del manuscrito.

Referencias

- Aitchison, J., 1986, *The Statistical Analysis of Compositional Data*: Londres, Chapman & Hall, 416 p.
- Aitchison, J., 1992, On criteria for measures of compositional difference: *Mathematical Geology*, 24, 365-379.
- Allen, J.R.L., 1970, The avalanching of granular solids on dune and similar slopes: *The Journal of Geology*, 78(3), 326.
- Allen, J.R.L., 1982, *Sedimentary structures: Their character and physical basis*: Amsterdam, The Netherlands, Elsevier Scientific Publishing Company, 592 p.
- Allen, J.R.L., 1985, *Principles of physical sedimentology*: London, George Allen & Unwin, 271 p.
- Arribas, J., Gómez-Gras, G., Rosell, J., Tortosa, A., 1990, Estudio comparativo entre las areniscas paleozoicas y Triásicas de la isla de Menorca: Evidencias de procesos de reciclamiento: *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 3, 105-116.
- Barboza-Gudiño, R., 2008, Detrital-zircon geochronology of Triassic fluvial and submarine fan deposits from northeastern Mexico: stratigraphy, paleogeography and tectonic implications (Abstracts with Programs), *en Geological Society of America annual meeting, USA*, Geological Society of America, 40(6), 197 p.
- Barboza-Gudino, J.R., 2012, Sedimentary tectonics and stratigraphy: The early mesozoic record in central to northeastern Mexico, *in* Elitok, Ö., (ed.), *Stratigraphic analysis of layered deposits*: Rijeka, Croacia, InTech, 255-278.
- Barboza-Gudiño, R., Orozco-Esquivel, M.T., Gómez-Anguiano M., Zavala-Monsiváis, A., 2008, The early Mesozoic volcanic arc of western North America in northeastern of Mexico: *Journal of South American Earth Science*, 25, 49-63.
- Barceló, C., Pawlowsky, V., Grunsky, E., 1996, Some aspects of transformations of compositional data and the identification of outliers: *Mathematical Geology*, 28, 501-518.
- Basu, A., Schieber, J., Patranabis-Deb, S., Dhang, P. C., 2013, Recycled detrital quartz grains are sedimentary rocks fragments indicating unconformities_ example from the Chhattisgarh Supergroup, Bastar Craton, India: *Journal of Sedimentary Research*, 83, 368-376.
- Carrillo-Bravo, J., 1961, Geología del Anticlinorio Huizachal-Peregrina al NW de Ciudad Victoria, Tamaulipas: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 13(1-2), 1-98.
- Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A., Boyd, R., 1992, Estuarine facies models: Conceptual basis and stratigraphic implications: *Journal of Sedimentary Petrology*, 62(6), 1130.
- Dalrymple, R.W., Yang, B.C., Chun, S.S., 2006, Sedimentation on a wave-dominated, open-coast tidal flat, south-western Korea: Summer tidal flat – winter shoreface – reply: *Sedimentology*, 53(3), 693.
- Davis, M.H., 2005, *The Tectonics of Tranquitas: A Field Study of Rift through Passive Margin Development and Laramide Deformation in Triassic and Jurassic Strata of the Sierra Madre Oriental, NE-Mexico*: Austin, Texas, University of Texas at Austin, tesis de maestría, 122 p.
- Dickinson, W.R., 1970, Interpreting detrital modes of graywacke and arkose: *Journal of Sedimentary Petrology*, 40, 695-707.
- Dickinson, W.R., Suczek, C.A., 1979, Plate tectonics and sandstone compositions: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63(12), 2164.
- Dickinson, W.R., Beard, L.S., Brakenridge, G.R., Erjaves, J.L., Ferguson, R.C., Inman, K.F., Knepp, R.A., Lindberg, F.A., Ryberg, P.T., 1983, Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting: *Geological Society of America Bulletin*, 94, 222-235.
- Fastovsky, D.E., Don Hermes, O., Strater, N.H., Bowring S.A., Clark, J.M., Montellano, M., Hernandez, R.R., 2005, Pre-Late Jurassic fossil-bearing volcanic and sedimentary red beds of Huizachal Canyon, Tamaulipas, Mexico, *en* Anderson T.H., Nourse J., McKee J.W., Steiner M.B. (eds.), *The Mojave-Sonora Megashield Hypothesis: Development, Assessment, and Alternatives*: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Publication 393, 401-426.
- Gabriel, K.R., 1971, The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis: *Biometrika* 58, 453-467.
- García-Obregón, R., 2007, *Cartografía geológica y petrología del vulcanismo mesozoico en el Valle de Huizachal, Tamaulipas*: Linares, Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, tesis de licenciatura, 137 p.
- García-Obregón, R., 2008, *Cartografía geológica y petrología del vulcanismo mesozoico en el valle de Huizachal, Tamaulipas*: Linares, Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, tesis de licenciatura, 137 p.
- Gray, G.G., Lawton, T.F., 2008, Evidence for basement type distribution from zircon U/Pb age spectra from Jurassic and Cretaceous sandstones, greater Monterrey area, Mexico (resumen), *en Geological Society of America Annual Meeting*, Houston, Texas: Geological Society of America, Abstracts with Programs, 40(6), 199.
- Klein, G.d., 1971, Tidal origin of a Precambrian quartzite; the lower fine-grained quartzite (middle Dalradian) of Islay, Scotland; reply: *Journal Of Sedimentary Research*, 41(3), 886.
- McBride, E.F., 1963, A classification of common sandstones: *Journal of Sedimentary Research*, 33, 664-669.
- Michalzik, D., 1988, *Trias bis tiefste Unter-Kreide der nordöstlichen Sierra Madre Oriental, Mexico: Fazielle Entwicklung eines passiven Kontinentalrandes*: Darmstadt, Alemania, Technischen Hochschule Darmstadt, tesis doctoral, 247 p.

- Michalzik, D., 1991, Facies sequence of Triassic-Jurassic red beds in the Sierra Madre Oriental (NE Mexico) and its relation to the early opening of the Gulf of Mexico: *Sedimentary Geology*, 71, 243-259.
- Michalzik, D., Schumann, D., 1994, Lithofacies relations and palaeoecology of a Late Jurassic to Early Cretaceous fan delta to shelf depositional system in the Sierra Madre Oriental of north-east Mexico: *Sedimentology*, 41, 463-477.
- Mixon, R.B., 1963, Geology of the Huizachal Red Beds, Sierra Madre Oriental, Mexico: Baton Rouge, Louisiana, Louisiana State University, tesis doctoral, 70 p.
- Ocampo-Díaz, Y.Z.E., 2007, Evolución sedimentológica y geoquímica del Miembro Arenoso Galeana: Linares, N.L., México: Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León., tesis de maestría, 276 p.
- Ocampo-Díaz, Y.Z.E., 2011, Implicaciones tectono-sedimentarias de la intercalaciones clásticas en el límite Jurásico-Cretácico del noreste de México (fosa de Monterrey y cuenca de Sabinas): Linares, Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, tesis doctoral, 275 p.
- Ocampo-Díaz, Y.Z.E., 2012, Tectónica sedimentaria del límite Jurásico-Cretácico: Implicaciones tectono-sedimentarias en el límite jurásico-cretácico del noreste de México: Editorial Académica Española, 324 p.
- Ocampo-Díaz, Y.Z.E., Jenchen U., Guerrero-Suategui, M., 2008, Facies y sistemas de depósito del Miembro Arenoso Galeana (Formación Taraises, Cretácico Inferior, NE de México): *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25, 438-464.
- Ocampo-Díaz, Y.Z.E., Guerrero-Suategui, M., Jenchen, U., 2012, Petrografía y procedencia del miembro arenoso galeana (Formación Taraises, Valanginiano-Hauteriviano Temprano), sierra madre oriental, NE México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64, 335-352.
- Otha, T., Arai, H., 2007, Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering: *Chemical Geology*, 240, 280-297.
- Pindell, J.L., Dewey, J.F., 1982, Permo-Triassic reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico/Caribbean region: *Tectonics*, 1, 179-211.
- Pitman, W.C., III, 1978, Relationship between eustasy and stratigraphic sequences of passive margins: *Geological Society of America Bulletin*, 89, 1389-1403.
- Ramos-Ledezma, A., 2007, Análisis microfacial del intervalo Jurásico-Cretácico Inferior en un corte del flanco sur del valle de Huizachal, Tamaulipas, México: Linares, Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, tesis de maestría, 113 p.
- Rubio Cisneros, I.I., 2008a, Geochemistry and petrography of sandstones from the Huizachal, and La Joya formations (Upper Triassic – Lower Jurassic), NE of Mexico (resumen), *en Geological Society of America Annual Meeting, Houston, Texas: Geological Society of America, Abstracts with programs*, 40(6), 481.
- Rubio-Cisneros, I.I., 2008b, Análisis geoquímico y petrográfico de areniscas de las Formaciones Huizachal y La Joya (Triásico Superior-Jurásico Inferior), NE de México: Linares, Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, tesis de licenciatura, 121 p.
- Rubio Cisneros, I.I., 2012, Análisis de procedencia de las formaciones El Alamar, La Boca y La Joya, noreste de México (Triásico Superior-Jurásico Medio): Linares, Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, tesis doctoral, 217 p.
- Rubio-Cisneros, I.I., Lawton, T.F., 2011, Detrital zircon U-Pb ages of sandstones in continental red beds at Valle de Huizachal, Tamaulipas, NE Mexico: Record of Early-Middle Jurassic arc volcanism and transition to crustal extension: *Geosphere*, 7, 159-170.
- Rubio-Cisneros, I.I., Ocampo-Díaz, Y.Z.E., 2010, Compositional analysis and sedimentary recycling evidences associated to unconformities in the northeastern Mexico, a Late Triassic-Early Cretaceous example (resumen): *Geological Society of America Annual Meeting, Branson, Missouri: Geological Society of America, Abstracts with Programs*, 42(2), 70 p.
- Rubio-Cisneros, I.I., Ramírez-Fernández, J.A., García-Obregón, R., 2011, Análisis preliminar de procedencia de rocas clásticas jurásicas del valle de Huizachal, Sierra Madre Oriental: Influencia del vulcanismo sinsedimentario y el basamento cristalino: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63, 137-156.
- Salvador, A., 1987, Late Triassic-Jurassic paleogeography and origin of Gulf of Mexico basin: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 71, 419-451.
- Shanmugam, G., 1988, Origin, recognition and importance of erosional unconformities in sedimentary basins, *en Kleinspehn, C.P., Paola, C. (eds.), New Perspectives in Basin Analysis: Nueva York, Springer-Verlag*, 83-109.
- Schlager, W., 1993, Accommodation and supply—a dual control on stratigraphic sequences: *Sedimentary Geology*, 86, 111-136.
- von Eynatten, H., Barceló-Vidal, C., Pawlowsky-Glahn, V., 2003, Modelling compositional change: the example of chemical weathering of granitoid rocks: *Mathematical Geology* 35, 231-251.
- Weltje, G.J., 2002, Quantitative analysis of detrital modes: statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology: *Earth-Science Reviews*, 57, 211-253.
- Weltje, G.J., Meijer, X.D., De Boer, P.L., 1998, Stratigraphic inversion of siliciclastic basin fills: a note on the distinction between supply signals resulting from tectonic and climatic forcing: *Basin Research*, 10, 129-153.
- Widdowson, M., 1997, The geomorphological and geological importance of palaeosurfaces, *en Widdowson, M. (ed.), Palaeosurfaces: Recognition, Reconstruction and Palaeoenvironmental Interpretation: Londres, The Geological Society, Special Publication 120*, 1-12.
- Young, S.W., 1976, Petrographic textures of detrital polycrystalline quartz as an aid to interpreting crystalline source rocks: *Journal of Sedimentary Petrology*, 46, 59-603.
- Zavala-Monsiváis, A., Barboza-Gudiño, J.R., Velasco-Tapia, F., García-Arreola, M.E., 2012, Sucesión volcánica jurásica en el área de charcas, San Luis Potosí: Contribución al entendimiento del arco Nazas en el noreste de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64, 277-293.
- Zuffa, G.G., 1980, Hybrid arenites: their composition and classification: *Journal of Sedimentary Petrology*, 50, 21-29.
- Zuffa, G.G., Cibir, U., Di Giulio, A., 1995, Arenite petrography in sequence stratigraphy: *The Journal of Geology*, 103, 451-459.

Manuscrito recibido: Octubre 26, 2012.

Manuscrito corregido recibido: Marzo 15, 2013.

Manuscrito aceptado: Marzo 30, 2013.