

Nuevas metodologías aplicadas al estudio de secuencias sedimentarias de plataforma en el basamento Ediacarano-Cámbrico inferior del NO argentino (Formación Puncoviscana).

Vanina L. LÓPEZ DE AZAREVICH^{1,2}; Miguel B. AZAREVICH² y Ricardo H. OMARINI^{1,2}

Abstract: *NEW METHODOLOGIES APPLIED TO THE STUDY OF PLATFORM SEQUENCES IN THE EDIACARAN-LOWER CAMBRIAN BASEMENT FROM NW ARGENTINA (PUNCOVISCANA FORMATION).*- New methodologies applied to the study of clastic rhythmic sequences of tidal origin in the Puncoviscana Formation provide a new conception on the paleoenvironments of the basin and constitute a key for the comprehension of paleoastronomic parameters that affected tides at the Ediacaran-Cambrian boundary in NW Argentina. Application of Fast Fourier Transforms to lamina thickness variations in tidal rhythmites was developed in last 25 years in old and modern rocks, and implemented in Argentina since 2008 in the Ediacaran-Early Cambrian Puncoviscana Formation. This methodology allows recognition of lunar cycles (synodic, anomalistic, tropical) from patterns obtained in period versus power spectral density graphics, and how these periodic component influenced in the tidal record. Also, this method can be used for calculate the Earth-Moon distance for time of deposition. So the estimation of lunar retreat rate has been calculated as 7.31 cm/year for the period 620-523 Ma and 2.70 cm/years for 523-305 Ma.

Resumen: *NUEVAS METODOLOGÍAS APLICADAS AL ESTUDIO DE SECUENCIAS SEDIMENTARIAS DE PLATAFORMA EN EL BASAMENTO EDIACARANO-CÁMBRICO INFERIOR DEL NO ARGENTINO (FORMACIÓN PUNCOVISCANA).*- Nuevas metodologías aplicadas al estudio de secuencias clásticas rítmicas de origen mareal en la Formación Puncoviscana proveen una concepción de los paleoambientes de la cuenca y constituyen la clave para la comprensión de los parámetros paleoastronómicas que afectaron las mareas en el límite Ediacarano-Cámbrico en el NO argentino. La aplicación de Transformadas Rápidas de Fourier a la variación de espesores de lámina en ritmitas mareales ha sido desarrollada en los últimos 25 años en rocas tanto modernas como antiguas, e implementada en Argentina desde 2008 en la Formación Puncoviscana (Ediacarano-Cámbrico inferior). Esta metodología permite reconocer los ciclos lunares (sinódico, anomalístico, tropical) a partir de los patrones obtenidos en gráficos período vs densidad de poder espectral, y cómo estos componentes periódicos han influenciado en el registro mareal. Así mismo, este método puede ser utilizado para calcular la distancia Tierra-Luna para el tiempo de depositación. De esta manera, la estimación de la tasa de alejamiento lunar ha sido calculada en 7,31 cm/año para el lapso 620-523 Ma y de 2,70 cm/año en el lapso 523-305 Ma.

Keywords: Tidal rhythmites. Fast Fourier Transforms. Earth-Moon distance. Puncoviscana Formation. Northwest Argentina.

Palabras clave: Ritmitas mareales. Transformadas Rápidas de Fourier. Distancia Tierra-Luna. Formación Puncoviscana. Noroeste de Argentina

¹) CONICET - CEGA

²) Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Naturales, Escuela de Geología. Avenida Bolivia 5150, Salta, Argentina. e-mail: vlllopez@yahoo.com.ar, miguel_azarevich@yahoo.com.ar, rhomarini@arnet.com.ar

Introducción

El basamento Precámbrico-Cámbrico del noroeste argentino se encuentra representado por la Formación Puncoviscana (Turner 1960), la cual aflora desde el límite argentino-boliviano, al menos hasta la provincia de Tucumán.

La Formación Puncoviscana se formó en una cuenca marina iniciada durante el desmembramiento del supercontinente Rodinia (~750 Ma.), cuyo registro geológico comprende: i) secuencias turbidíticas (Turner 1960, Omarini 1983, Jêzek 1990), ii) sedimentitas clásticas de plataforma, con influencia de olas y tormentas (López de Azarevich *et al.* 2010, iii) secuencias de plataforma carbonática (Salfity *et al.* 1976), iv) vulcanitas alcalinas sinsedimentarias (Omarini *et al.* 1999, Hauser *et al.* 2010). Las facies clásticas contienen diversos icnogéneros de edad Ediacarano-Cámbrico inferior (Aceñolaza *et al.* 1999, Aceñolaza y Aceñolaza 2007, Aceñolaza *et al.* 2010 y literatura incluida).

La edad mínima de la unidad es de 523 Ma (U/Pb en circón) la cual se corresponde a la secuencia clástica con trazas fósiles aflorante en la localidad de Rancagua-Cachi (Adams *et al.* 2008). Los cuerpos graníticos que intruyen la secuencia (Tástil, Chañi, Tipayoc y Cañani) tienen un rango de edades de 560-517 Ma (Lork *et al.* 1990, Hong *et al.* 2001, 2010, Matteini *et al.* 2008, Zappettini *et al.* 2008, Aceñolaza y Toselli 2009, Hauser *et al.* 2010).

La presencia de ritmitas inter y submareales, tanto en secuencias clásticas como carbonáticas ha sido difundida en investigaciones recientes por López de Azarevich y Omarini (2008a y b), López de Azarevich *et al.* (2008a y b) y López de Azarevich *et al.* (2010 a-b). Estas secuencias, originadas por procesos de flujo y reflujos mareales, permiten identificar bordes de cuenca en las localidades de Rancagua, Palermo Oeste, Bárcena, Purmamarca, Km 13. Todas ellas ubicadas en la Cordillera Oriental (Figura 1).

El presente trabajo tiene como propósito dar a conocer metodologías aplicadas al estudio de secuencias rítmicas mareales en la Formación Puncoviscana. En los últimos 25 años han sido desarrollados métodos muy precisos para resolver problemas vinculados con depósitos en ambientes de plataformas someras, actuales y antiguos, influenciados por mareas en el marco de la atracción Tierra-Luna (Allen y Homehood 1984, Yang y Nio 1985, Williams 1989, Kvale *et al.* 1994, Miller y Erikson 1997, Archer y Johnson 1997, Ehlers y Chan 1999). Estas propuestas se basan en análisis matemático-estadísticos de series rítmicas periódicas, y permiten inferir las características del sistema astronómico (Tierra-Luna-Sol) que influye en los sistemas mareales, al momento de generarse el depósito. La distancia Tierra-Luna es un parámetro fundamental a ser considerado porque condiciona la sedimentación en ambientes dominados por mareas. Además, constituye un factor relevante cuya variación en el tiempo geológico permite obtener conclusiones sobre aspectos paleoastronómicos y paleodinámicos de cuencas sedimentarias que conservan las características originales del depósito.

Breve reseña histórica del estudio de las mareas

Desde la antigüedad, el hombre ha observado los fenómenos naturales e intentado dar una explicación a los mismos. Entre sus inquietudes se encontraban los cambios de las fases lunares y los pulsos rítmicos o periódicos de las mareas, fenómenos que se vieron representados y explicados a través de ciertas deidades tanto en Occidente como en Oriente.

En el siglo XVII, la teoría gravitacional de Newton permite una comprensión parcial de la correlación existente entre el fenómeno mareal y los ciclos lunares (Newton 1687). En el

siglo XVIII, en su “Tratado de la mecánica celeste”, Laplace genera un avance notable en el conocimiento de las órbitas de los cuerpos celestes, presentando cálculos matemáticos de las mismas, algunos de los cuales aún se encuentran vigentes (Laplace 1799-1825). Este autor además, descubre la influencia del achatamiento de la Tierra sobre el movimiento de traslación de la Luna y el valor de achatamiento terrestre a partir de la correspondiente anomalía del movimiento lunar. Así mismo, sus aportes en el área de la hidrodinámica y comportamiento de los fluidos permitieron una mejor comprensión y predicción del fenómeno mareal a nivel local.

Durante los siglos XVIII y XIX numerosas investigaciones demostraron que el movimiento de rotación de la Tierra produce energía y un momento angular que es transferido a la órbita lunar, disminuyendo en consecuencia la velocidad de rotación de la Tierra y acelerando la órbita de la Luna (Darwin 1877, 1879, 1880).

A partir de estos conocimientos, en el siglo XX se desarrollaron nuevas estrategias de investigación del sistema Tierra-Luna. Estas incluyen: i) dendrología: medición de líneas de crecimiento en invertebrados y plantas en relación con la duración del día y el mes en tiempos pasados y presentes (ver compilación en Williams 2000), ii) la toma de datos a partir de las misiones “Apollo” y “Luna”, que permitieron el cálculo preciso de la distancia Tierra-Luna, iii) el reconocimiento de los ciclos de sicigia-cuadratura lunar en el registro sedimentario como la variación de espesores en láminas de acreción lateral (*tidal boundles*) o vertical (*tidal rhythmites*). (Figura 2)

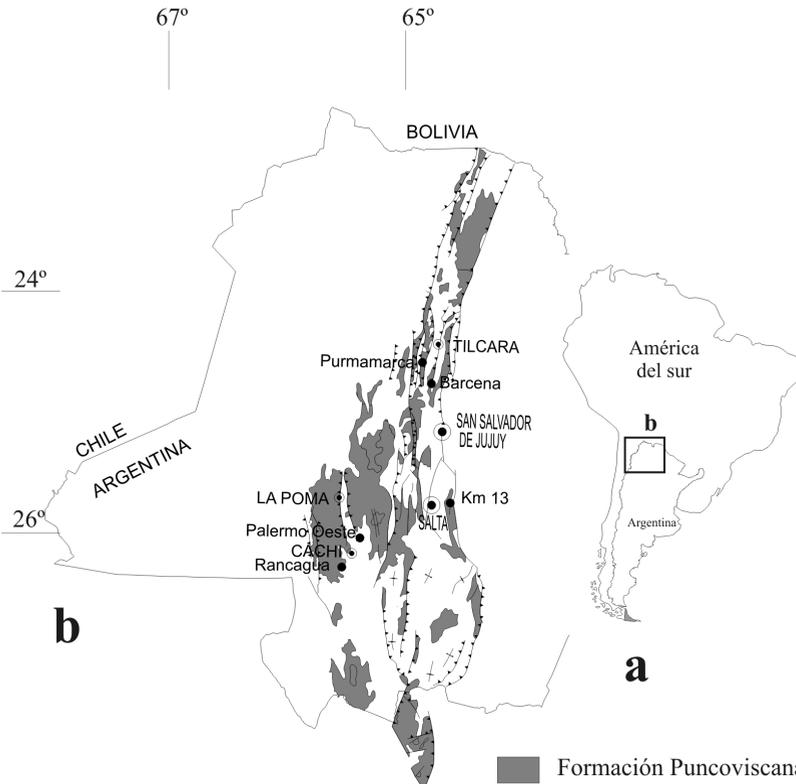


Figura 1. Ubicación de las localidades con ambientes someros. Gris: basamento Ediacarano-Cámbrico inferior del NO argentino, Formación Puncoviscana (Turner 1960).

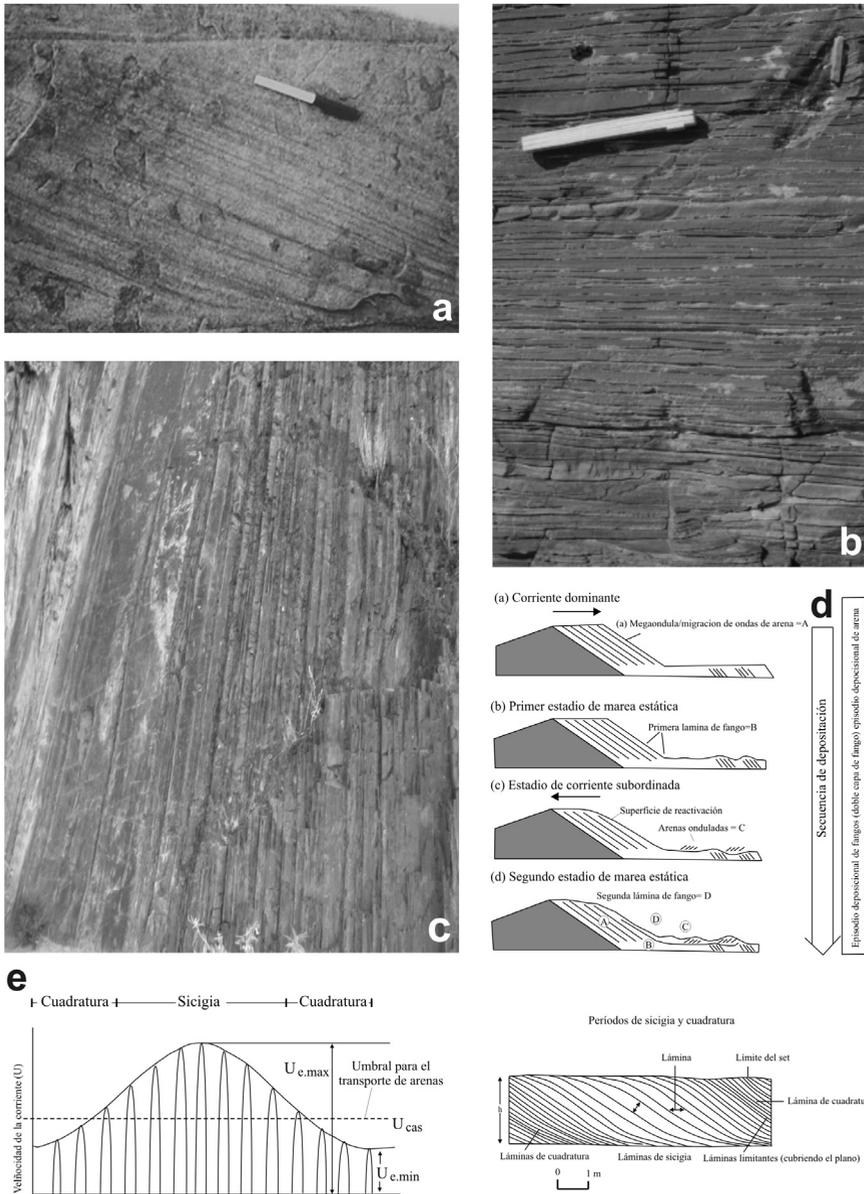


Figura 2. a) Ritmitas mareales acrecionadas lateralmente. Arenisca Chaibasa, Proterozoico de India, depositada en ambiente submareal. Nótese la doble capa de fango y la alternancia característica de espesores de lámina delgadas-gruesos. Tomado de Bose *et al.* (1997). b) Ritmitas mareales acrecionadas verticalmente. Limolitas de plataforma externa conformadas casi exclusivamente por capas gradadas de 0,5-2 cm y contactos netos. Formación Skjoklungebrae, Groenlandia Oriental (Erikson *et al.* 1998). c) Ritmitas mareales acrecionadas verticalmente. Limolitas de plataforma externa conformadas casi exclusivamente por capas gradadas de 0,2-3 cm. Formación Puncoviczana, localidad de Rancagua, Cordillera Oriental, Salta, Argentina. d) Distribución esquemática de láminas depositadas por acción de mareas (*tidal complets*) durante los estadios de flujo y reflujó en un sistema semidiurno (dos inundaciones diarias). Modificado de Visser (1980). e) Diagrama izquierdo: distribución esquemática de la velocidad de la corriente y el transporte de arenas generado durante los ciclos de sicigia y cuadratura lunar (modificado de Allen 1982). Diagrama derecho: sedimentación de láminas mareales que responde al esquema anterior (modificado de Yang y Nio 1985).

El paleoambiente de depósito de la Formación Puncoviscana ha sido interpretado, originalmente en el marco de secuencias de “flysch”, término de por sí muy amplio usado para definir secuencias sedimentarias marinas de carácter profundo, muy en boga para principio de la décadas del ‘40 y ‘50. Esta terminología fue utilizada por Borrello (1969) en su libro “*Los Geosinclinales de la Argentina*” cuando adscribe la Formación Puncoviscana al “*Geosinclinal Protoídico*”. Posteriormente en la década del ‘60 una nueva concepción surgió para interpretar las secuencias de “flysch”, considerando la secuencialidad del depósito y la naturaleza hidrodinámica del mismo como turbiditas (Sanders 1963, 1965, Bouma y Brouwer 1964, entre otros). Este concepto perduró durante las décadas del ‘70, ‘80 y ‘90 sin modificaciones sustanciales respecto al concepto original (Mutti y Ricci Lucchi 1972, Postma *et al.* 1988, Mutti 1992).

En la Formación Puncoviscana, los primeros trabajos sedimentológicos ajustados a la sistemática de serie de Bouma fueron realizados en las décadas del ‘80 y ‘90 por Omarini (1983), Omarini y Baldi (1984), Jêzek (1986, 1990), Moya (1998). Estas secuencias interpretadas como parte de abanicos turbidíticos han sido reinterpretadas, y muchas de ellas reasignadas a ambientes someros de plataforma bajo influencia de ciclos mareales (López de Azarevich y Omarini 2008b, Omarini *et al.* 2008, López de Azarevich *et al.* 2010 a-b). Esta evolución conceptual ha generado una nueva corriente de opinión sobre las secuencias sedimentarias que integran la Formación Puncoviscana. Es así que hoy se debe considerar para la cuenca la existencia de ambientes profundos, intermedios y costeros. Estos nuevos conceptos brindan la posibilidad de interpretar con mayor precisión la evolución de la cuenca del Ediacarano-Cámbrico inferior, previa a la configuración del Gondwana Occidental.

Mareas y ciclos lunares: características generales

Las mareas representan un fenómeno natural en la Tierra, el cual resulta de la atracción gravitacional ejercida por la Luna y el Sol sobre las aguas de los océanos, mares y lagos, imponiendo la Luna un efecto mayor que el Sol.

Al girar la Tierra sobre su eje se genera un abultamiento mareal de mayor expresión en el ecuador que en los polos (Figura 3). Su magnitud es del orden de un metro de altura y gran longitud de onda en océanos abiertos y produce dos inundaciones diarias a lo largo de la mayoría de las costas actuales, proceso que se define como régimen semi-diurno. En algunas costas ocurre solo una inundación diaria (régimen diurno) debido a la complejidad de su morfología.

En un régimen semi-diurno las secuencias mareales están representadas por dos láminas depositadas cada ciclo de 24 horas, con espesores mayores durante la marea dominante y menores durante la marea subordinada. Por lo contrario, en el régimen diurno se genera una sola lamina cada 24 horas (Figura 3b).

Los cambios de fase de la Luna son definidos como ciclos de sicigia-cuadratura y actualmente, ocurren cada 14,8 días. La sumatoria de dos ciclos sucesivos define un mes sinódico de 29,6 días. De tal manera, cuando se produce una conjunción Tierra-Luna-Sol se dan las mareas de mayor intensidad y cuando la Luna se ubica con ángulo de 90° respecto a la posición Tierra-Sol (cuadratura lunar), las mareas son de menor intensidad.

Estos fenómenos de configuración astronómica se ven reflejados en los depósitos con una sucesión de bancos con mayores espesores en el caso de una conjunción total y más delgados en el caso de cuadratura lunar, como se indica en la figura 3c.

El mes anomalístico se define como el tiempo que la Luna tarda en recorrer la distancia entre las posiciones de apogeo y perigeo lo cual ocurre en la actualidad cada 27,55 días. Estas posiciones de la Luna respecto a la Tierra son diferentes con una distancia máxima en el apogeo y mínima en el perigeo. Las variaciones de posición quedan registradas en los depósitos con una modificación en los espesores de láminas y en su conjunto revelan una diferencia en orden de magnitud la cual se interpreta como una desigualdad quincenal (Figura 3e).

El mes tropical se define como el tiempo que tarda la Luna desde una declinación dada (Norte o Sur) hasta ubicarse nuevamente en la posición original de declinación. Este valor temporal es actualmente de 27,32 días. Estas situaciones de declinación lunar generan desigualdad diaria en la intensidad de las mareas con diferencia en los espesores de láminas depositadas. Por lo contrario, cuando la Luna se encuentra en el cenit del punto considerado la diferencia diaria de intensidad mareal será igual a cero y en este caso la sedimentación registra dos capas de igual espesor (Figura 3d).

Se ha comprobado que el análisis detallado de las ritmitas mareales, en el marco de la dinámica de mareas, es de gran utilidad para definir las características de las órbitas lunares durante el tiempo geológico. En tal sentido, los ciclos lunares definidos como meses anomalístico y tropical permiten obtener un valor para la distancia Tierra-Luna a partir de la medición de espesores en ritmitas mareales actuales y antiguas (Kvale *et al.* 1999).

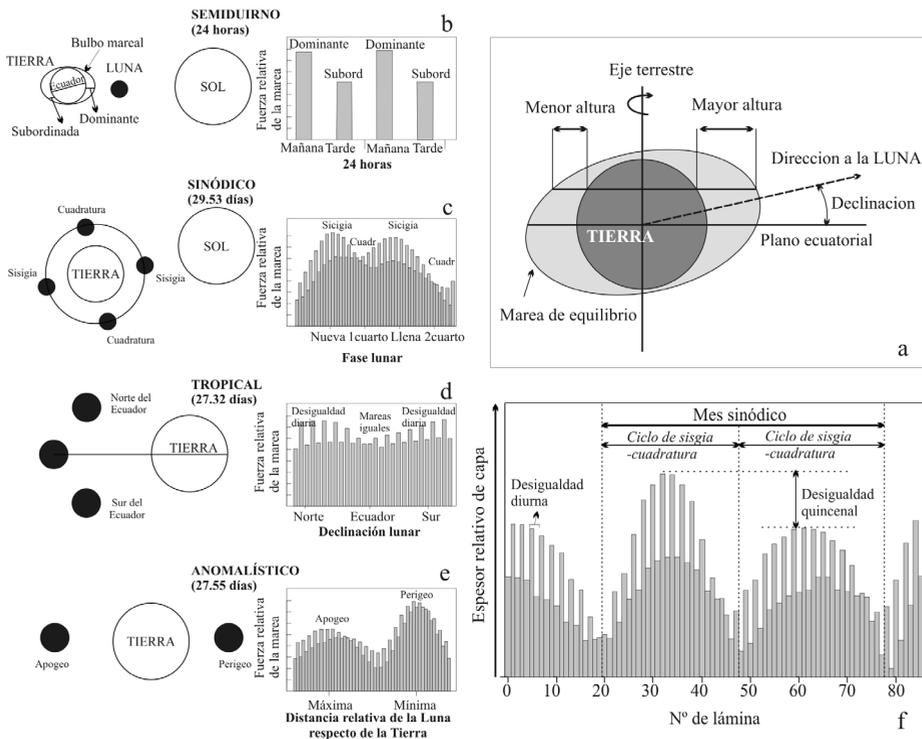


Figura 3. a) Representación esquemática del efecto de la marea ejercido por la Luna sobre la Tierra. Modificado de De Boer *et al.* (1989). b–e) Factores astronómicos significativos para generar períodos mareales cortos (un mes o menos), y su influencia en la ciclicidad registrada por la variación de espesor de láminas. Adaptado de Kvale *et al.* (1995) y Archer (1996). f) Registro de espesores en una ritmita mareal y ciclos identificados.

Metodología

La metodología fue aplicada en secuencias sedimentarias de la Formación Puncoviscana, que presentan ritmicidad y estructuras bioturbadas (ignogéneros), en las localidades de: Rancagua, Palermo Oeste, Purmamarca, Bárcena, Cuesta de Muñano entre otras. Sobre los perfiles se realizó: 1) Estudio sedimentológico y estratigráfico, 2) Estudio estadístico-matemático de espesores de lámina.

Los perfiles estratigráficos fueron cuidadosamente seleccionados a partir de un análisis estructural previo. Ello permitió localizar secciones no deformadas dentro de la secuencia, con buena continuidad y adecuada exposición de estructuras sedimentarias.

ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO

Este estudio comprende el análisis de secuencias sedimentarias continuas según los siguientes pasos:

- a- Relevamiento de columnas estratigráficas a escala 1:50 y 1:25.
- b- Relevamiento de estructuras sedimentarias y mediciones de paleocorrientes a escala 1:1.
- c- Análisis de facies y asociaciones de facies.
- d- Análisis de contenido paleontológico.
- e- Análisis paleoambiental.

Los espesores de los estratos son medidos con cinta métrica y calibre digital con error de 0,01 mm. La toma de muestras orientadas tiene la utilidad de medir espesores milimétricos a partir de secciones pulidas y cortes delgados correctamente orientados respecto al plano sedimentario (Figura 4). Los datos se representan en papel milimetrado conjuntamente con la litología y granulometría correspondiente, identificada mediante lupa de aumento x10 y x25.

ESTUDIO ESTADÍSTICO-MATEMÁTICO DE ESPESORES DE LÁMINAS

Para llevar a cabo el análisis estadístico-matemático de espesores de láminas se debe reconocer, en el perfil seleccionado, el paleoambiente de depósito que contenga evidencias de influencia mareal. Dentro de esta secuencia se identificaron los sectores con ritmitas mareales (Figura 5a) con un contenido de láminas de 200 a 800, óptimas para obtener resultados confiables en el análisis estadístico aplicado. La secuencialidad analítica comprende los siguientes puntos:

Análisis armónico: características y naturaleza

Los estudios de periodicidad registrada en depósitos rítmicos mareales han sido originalmente aplicados por Visser (1980) a partir de la medición de espesores de lámina y análisis visual de su variación en secuencias submareales del Holoceno de Holanda.

Los datos obtenidos de espesores de láminas se representan en un gráfico (X–Y) número de láminas versus espesor (Figura 5b-c), a partir del cual pueden identificarse diversos patrones de repetición de acuerdo al siguiente orden: i) cada dos láminas, ii) cada 10-15 láminas, iii) cada 28-29 láminas. La periodicidad de los ciclos de sicigia-cuadratura se estima mediante el conteo de número de láminas entre picos o senos de acuerdo a la propuesta de Visser (1980). En estos diagramas, las evidencias de otros ciclos periódicos como el anomalístico y tropical no se identifican con claridad. Para poner en evidencia su presencia en el depósito se han desarrollado técnicas de estimación espectral a partir del análisis armónico de la serie de datos (Press *et al.* 1988, Horne y Baliunas 1986, Kvale *et al.* 1989).

En los depósitos de plataforma marina, la importancia de éste análisis se basa en el principio que el registro de las mareas es la suma de un número de componentes cuyos períodos se corresponden con un período astronómico particular vinculado a los movimientos del sistema rotacional Tierra-Luna-Sol (Mazumder y Arima 2005). Los datos necesarios para efectuar el análisis son la altura de mareas (en sistemas mareales actuales) o espesores de lámina (en ambientes antiguos). Esta correlación es considerada en función que la cantidad de sedimento transportado y depositado como ritmita mareal está relacionado con la altura o rango de la marea. Es importante aclarar que la naturaleza del depósito constituye de por sí una secuencia temporal en función de los ciclos lunares diurnos, mensuales o multianuales.



Figura 4. a) Medición efectuada con calibre digital. b) Toma de muestra orientada.

Transformadas de Fourier: modelo dinámico y aplicación al análisis mareal

El estudio de los procesos sedimentarios en general y mareales en particular para el caso considerado, conlleva la necesidad de reconocerlos como modelos dinámicos con un comportamiento variable respecto al tiempo. Consecuentemente, es necesario emplear ecuaciones diferenciales respecto al tiempo para representar matemáticamente el comportamiento del mecanismo involucrado que se intenta analizar.

En la naturaleza, el comportamiento dinámico de los fenómenos naturales puede aproximarse de acuerdo al modelo general de comportamiento dinámico lineal, expresado como la función:

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + a_{n-2} \frac{d^{n-2} y(t)}{dt^{n-2}} + \dots + a_0 y(t) = x(t)$$

La transformada de Laplace es una herramienta matemática útil para el análisis de sistemas dinámicos lineales. Esta permite resolver ecuaciones diferenciales lineales mediante su transformación en ecuaciones algebraicas facilitando el estudio de los sistemas dinámicos. En tal sentido, la transformada de Laplace es una fórmula matemática general que representa una función no periódica con límite infinito, que se expresa en la siguiente ecuación:

$$X(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-st} dt$$

Las transformadas de Fourier (FT) constituyen un caso especial de las transformadas de Laplace y brindan la posibilidad de transformar un período singular de una función periódica en una serie infinita, de función periódica temporal continua, razón por la cual su utilización es importante para el estudio de mareas. La FT se convierte así en una serie de límites de carácter matemático que puede ser guardada dentro de una base de datos, facilitando su aplicación a través de programas de computación.

Desde el punto de vista matemático, la continua transformación de Fourier es equivalente a la evaluación de la transformada de Laplace bilateral con $s = i$ (argumento complejo) o $\omega s = 2\pi f$, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$X(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

Esta relación entre las transformadas de Fourier y Laplace se utiliza para determinar el espectro de frecuencias de una señal o sistema dinámico, y es la base de su utilización en el análisis de secuencias rítmicas (periódicas) mareales.

De acuerdo a su naturaleza, la FT es de gran utilidad para trabajar con funciones o señales bien definidas que no tienen una energía infinita (como sería un circuito eléctrico) y pueden extenderse a una función senoide o periódica.

La transformada discreta o rápida de Fourier ("*Discrete-Time Fourier Transform*" - DTFT, o "*Fast Fourier Transform*" - FFT) es aquella aplicada para señales discretas, la cual constituye una técnica conocida que transforma una señal periódica y discreta, en el dominio de tiempo, en una señal periódica y discreta en el dominio de frecuencia.

El análisis armónico mediante las FT resuelve una función sinusoidal (secuencia temporal) en componentes sinusoidales (armónicos) con frecuencias conmensuradas. En un diagrama de densidad poder espectral del componente armónico versus frecuencia del mismo, la contribución de cada frecuencia se encuentra indicada por la amplitud de dicho componente o poder expresado como el cuadrado de la amplitud (Jenkins y Wats 1968, Yang y Nio 1985).

Aplicación de programas computarizados

Las características de los ciclos lunares imperantes al momento del depósito se modelan a partir de los datos de espesores de lámina tomados en el campo o a partir de microfotografías sobre muestras pulidas. Sobre los datos obtenidos se aplica un análisis armónico con FFT, de acuerdo con las especificaciones indicadas por Archer (1996), Archer y Johnson (1997), Kvale *et al.* (1995, 1999), Mazumder y Arima (2005). De esta manera, se logra un diagrama de densidad poder espectral vs frecuencia del componente armónico, utilizando un programa Matlab 7.2 o programas equivalentes que permiten resolver esta función.

Se obtiene así un diagrama oscilatorio que identifica las series numéricas analizadas con las FFT, y diagramas período (= 1/frecuencia) vs densidad de poder espectral (Figura 5d). A partir de estos diseños se pueden identificar diversos picos de mayor y menor poder espectral, que representan los componentes dominantes del ciclo mareal representados en la secuencia sedimentaria.

En los depósitos rítmicos mareales los componentes de frecuencia pueden corresponder al número de días que identifican los distintos períodos seculares sinódico y/o tropical y/o anomalístico, o ciclos estacionales de diversa longitud.

Utilización de filtros

Este proceso tiene la finalidad de evaluar los datos no periódicos que afectan el patrón oscilatorio en el registro sedimentario. Por ello, se aplican filtros en aquellos componentes (láminas) que se desvían del patrón general en el diagrama número de láminas vs espesor: por ejemplo niveles de tormentas con un espesor mayor (anómalo) al registrado por la mayoría de las láminas de la secuencia y que representan episodios de sedimentación no periódicos.

Una vez filtrados estos valores se procede al análisis del patrón resultante mediante FFT para determinar la necesidad de utilizar o no nuevos filtros (Figura 5e).

Evaluación de los resultados obtenidos

PALEOAMBIENTE DE DEPÓSITO

El análisis de facies y de asociación de facies se realizó según las definiciones y conceptos originalmente propuestos por Gressly (1838), Middleton (1973), Collinson (1979), entre otros representantes de la disciplina.

En la Formación Puncoviscana, en los perfiles relevados, han sido reconocidas estructuras diagnósticas de ambientes costeros (López de Azarevich *et al.* 2010b): i) estructuras entrecruzadas en hueso de arenque, representativas de igual intensidad de flujo y reflujos mareal, ii) ondulitas de doble cresta, que definen desigualdades en la intensidad de flujo y reflujos mareal, iii) estructuras algales y microbiales, indicadoras de zona fótica, iv) estructuras entrecruzadas en artesa y hombrera, propias de ambientes dominados por olas y tormentas. Así mismo, se reconocen estructuras bi- y multi-direccionales que indican ambientes someros

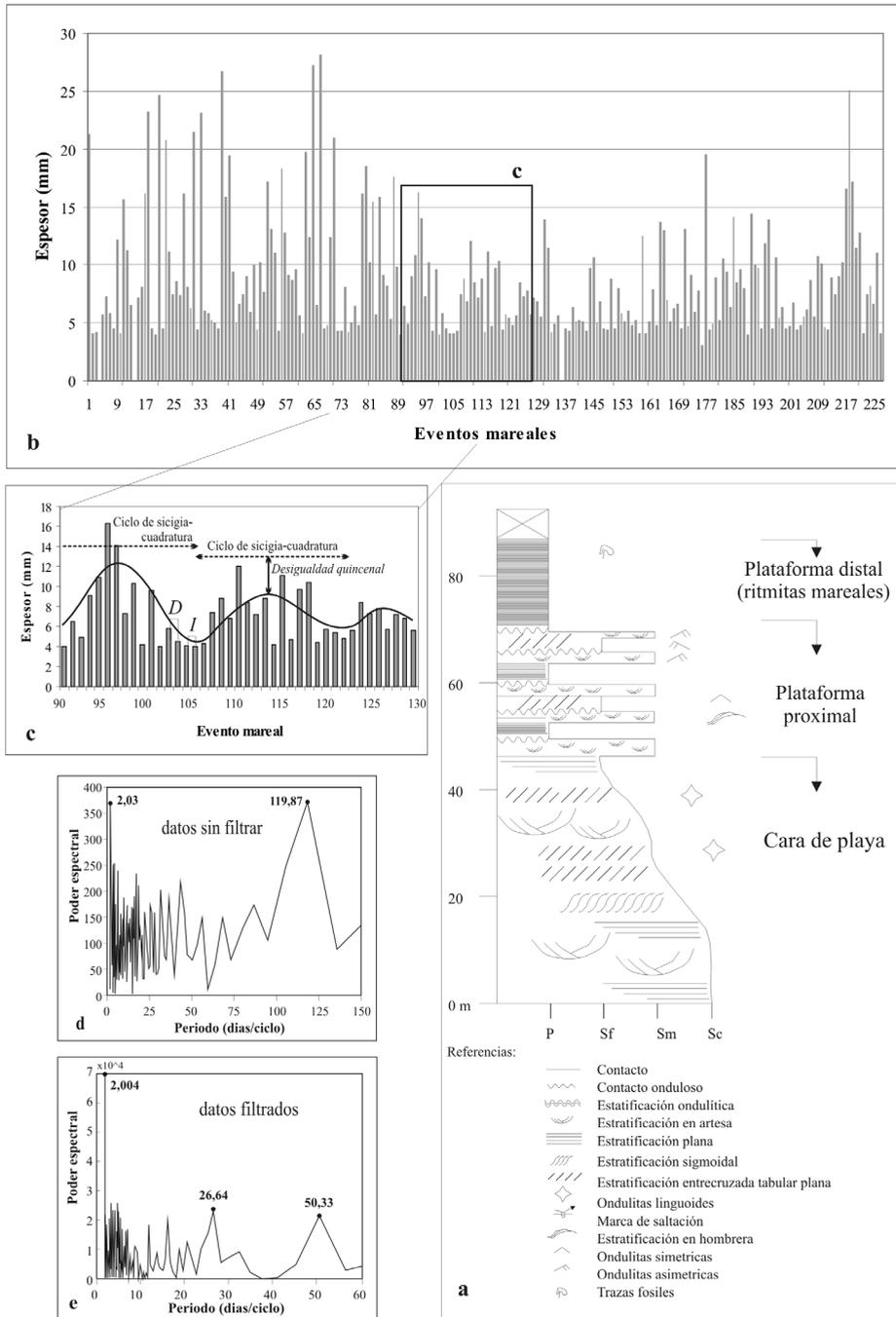


Figura 5. a) Perfil esquemático de la asociación litofacial de la Formación Puncoviciana en la localidad de Rancagua, donde se reconocen ritmitas mareales. b-c) Gráficas de la variación de n° de lámina vs espesor para dichas ritmitas mareales. Obsérvese los patrones oscilatorios producto del período sinódico (relacionado a la fase lunar) y la desigualdad quincenal (mes anomalístico), las desigualdades e igualdades diurnas (*D*, *I*), que caracterizan el período tropical (relacionado a la declinación lunar).d-e) Gráfica del Período (días/ciclo) vs Poder Espectral para datos sin filtrar y filtrados, respectivamente.

dominados por mareas y corriente de mareas. La conjunción de estas estructuras representa un conjunto de ambientes litorales inter- y sub-mareales con registros de niveles de olas de tormentas. En los perfiles analizados, las ritmitas mareales marcan un desarrollo de ambientes sub-mareales en una plataforma dominada por mareas.

En el perfil de Rancagua (Figura 5a), por ejemplo, se reconoce a partir de la asociación litofacial una transición desde ambientes intermareales de cara de playa, a ambientes submareales de plataforma proximal, y finalmente hacia ambientes submareales dominados por la acción de mareas (López de Azarevich *et al.* 2010a). Esta asociación responde a un modelo de plataforma somera (pericontinental) con una profundidad inmediatamente por debajo del nivel de olas de tormenta. En este caso, se ajusta con un perfil de costa-plataforma distal que registra un período de agradación con buen aporte de sedimentos (Johnson y Baldwin 1986) y abundante actividad orgánica.

CONSIDERACIONES PALEOASTRONÓMICAS Y EL CÁLCULO DE LA DISTANCIA TIERRA-LUNA

A los fines de dar a conocer la utilidad de la metodología expuesta y su aplicación a cálculos paleoastronómicos, a manera de ejemplo, se desarrolla el método de cálculo a partir de los datos obtenidos de las ritmitas mareales de la localidad de Rancagua.

La secuencia rítmica evaluada cuenta con 480 láminas cuyos espesores varían entre 0,4 y 36,5 milímetros. La variación de los espesores de lámina presenta un patrón oscilatorio con diferentes grados de simetría (Figura 5b). La alternancia sistemática de láminas con espesores delgados y gruesos es común en los depósitos mareales modernos, y representan la desigualdad diurna de las mareas. En las ritmitas mareales de Rancagua éstas se asocian a incrementos semidiurnos del día lunar (D en Figura 5c). Espesores sucesivos de igual magnitud indican, en este caso, iguales intensidades de las mareas dominante y subordinada (I en Figura 5c), los cual sugieren una posición astronómica de la Luna ajustada al mes tropical.

El adelgazamiento de espesores en determinadas secciones de la secuencia responde a ciclos de cuadratura lunar, momento en el cual las mareas muestran menor intensidad. Estos períodos son seguidos por ciclos de mayor espesor que coinciden con los ciclos de sicigia tal como se identifican en la Figura 5c. En este caso, el patrón de sedimentación completo está dominado por la alineación del sistema Tierra-Luna-Sol en el mes sinódico.

El análisis armónico de los datos “crudos” mediante FFT permite obtener un diagrama de densidad poder espectral vs período en el cual se visualizan dos picos claramente dominantes (Figura 5d): i) 2,03 eventos/ciclo, ii) 119,87 eventos/ciclo. El primero representa los dos eventos de inundación (dos láminas) por día lunar reconocido originalmente en la secuencia rítmica. El segundo pico representa la conjunción de los períodos sinódico, tropical y anomalístico, que ocurre dos veces al año, cuando las mareas alcanzan su máxima intensidad por el refuerzo de cada período (Kvale *et al.* 1999).

El filtro aplicado a las ritmitas mareales de Rancagua consistió en eliminar las láminas con espesor mayor de 20 mm, que representan niveles arenosos con estructuras entrecruzadas y en hombrera, depositados durante episodios de tormenta. La metodología aplicada a los datos filtrados permitió identificar, además del período tropical, los ciclos de sicigia-cuadratura con una desigualdad quincenal marcada (mes anomalístico, Figura 5c). El análisis armónico de estos datos mediante FFT registra 3 picos destacados (Figura 5e):

- i) 2,004 eventos/ciclo: ciclo semidiurno de la marea.
- ii) 26,64 días (eventos)/ciclo: ciclo que podría corresponder tanto al período sinódico

(relacionado a la fase lunar) como tropical (relacionado a la declinación lunar). Este último es el responsable de la desigualdad de las mareas en los sistemas semidiurnos. Este patrón se registra también a partir de la Figura 5b-c, y tiene una mejor resolución en los depósitos respecto al sinódico. Por lo tanto se asignará este pico espectral al período tropical.

- iii) 50,33 días/ciclo: representativo de la sobreimposición de algunos de los períodos sinódico, tropical o anomalístico que revisten un carácter estacional a lo largo del año.

Es necesario resaltar que la posición orbital de la Luna y la rotación de la Tierra han variado a lo largo del tiempo geológico (Laplace 1799-1825, Darwin 1877, 1879, 1880, Archer 1996, Sonett *et al.* 1996, Kvale *et al.* 1999, Williams 2000, Mazumder y Arima 2005). El alejamiento de la Luna respecto de la Tierra registra, en el tiempo geológico, tasas progresivas, generando un patrón con ciclos sinódico, tropical y anomalístico progresivamente más extensos, los cuales han quedado codificados en el registro sedimentario.

Este patrón dinámico ha sido reconocido en el perfil de Rancagua de acuerdo a la longitud de los ciclos lunares establecidos según la metodología aplicada.

La mayor duración de los ciclos mencionados es una consecuencia del alejamiento de la Luna en el tiempo geológico. El cálculo de la distancia Tierra-Luna requiere conocer la duración del mes sideral en días, el cual se mide a partir de un punto fijo en el cielo. Su valor solamente puede ser calculado en la actualidad. Por ello, para las secuencias antiguas se considera éste como equivalente al mes tropical, $P_{sid} = P_{trop}$: si bien el año tropical es más corto que el sideral esta conversión es válida si se considera que la fracción de tiempo es lo suficientemente pequeña como para considerarse insignificante respecto al grado de precisión esperado para las ritmitas mareales (Kvale *et al.* 1999). El período sideral puede ser calculado también a partir del período sinódico dado que estos dos períodos guardan una relación constante: $P_{sin}/P_{sid} = 1,0808$, relación que puede ser utilizada con certeza desde 1 Ga (Kvale *et al.* 1999). Bajo estas consideraciones la distancia Tierra-Luna surge de aplicar la ecuación:

$$(P_{sid} / P_{sid_0})^2 = (a / a_0)^3$$

Donde: P_{sid} : número de días en el mes sideral actual (27,3186 días), a : distancia Tierra-Luna actual ($3,844 \times 10^{10}$ cm), P_{sid_0} : número de días mes sideral en el tiempo pasado, y a_0 : distancia Tierra-Luna en el tiempo pasado.

La distancia Tierra-Luna puede ser calculada entonces tomando el valor del mes tropical: $P_{trop} = P_{sid} = 26,64$ días. Aplicando la ecuación se obtiene una distancia Tierra-Luna de $3,78 \times 10^{10}$ cm, expresada como eje semi-mayor, para la Formación Puncoviscana en la localidad de Rancagua (Figura 6). Este valor a los 523 Ma permite ajustar la tasa de alejamiento de la Luna para el lapso temporal Ediacarano-Paleozoico medio, la cual registra una magnitud de 7,31 cm/año para el rango 620-523 Ma (Ediacarano-Cámbrico inferior) y de 2,70 cm/año entre los 523 y 305 Ma (Cámbrico inferior-Carbonífero). Figura 6b.

Consideraciones finales

La reinterpretación paleoambiental de las secuencias de la Formación Puncoviscana en las localidades de Rancagua, Palermo Oeste, Km 13, Bárcena, Purmamarca, permitieron

reconocer facies litorales depositadas a una profundidad inmediatamente por debajo del nivel de olas de tormenta. Estos sedimentos delimitan bordes de la cuenca Ediacarano-Cámbrico inferior en las localidades relevadas.

Dentro de la secuencia sedimentaria estudiada se encuentran registros de series rítmicas de origen mareal. La variación de los espesores de lámina se halla en directa relación con las condiciones de la marea al momento del depósito, y por ende de la configuración paleoastronómica del momento.

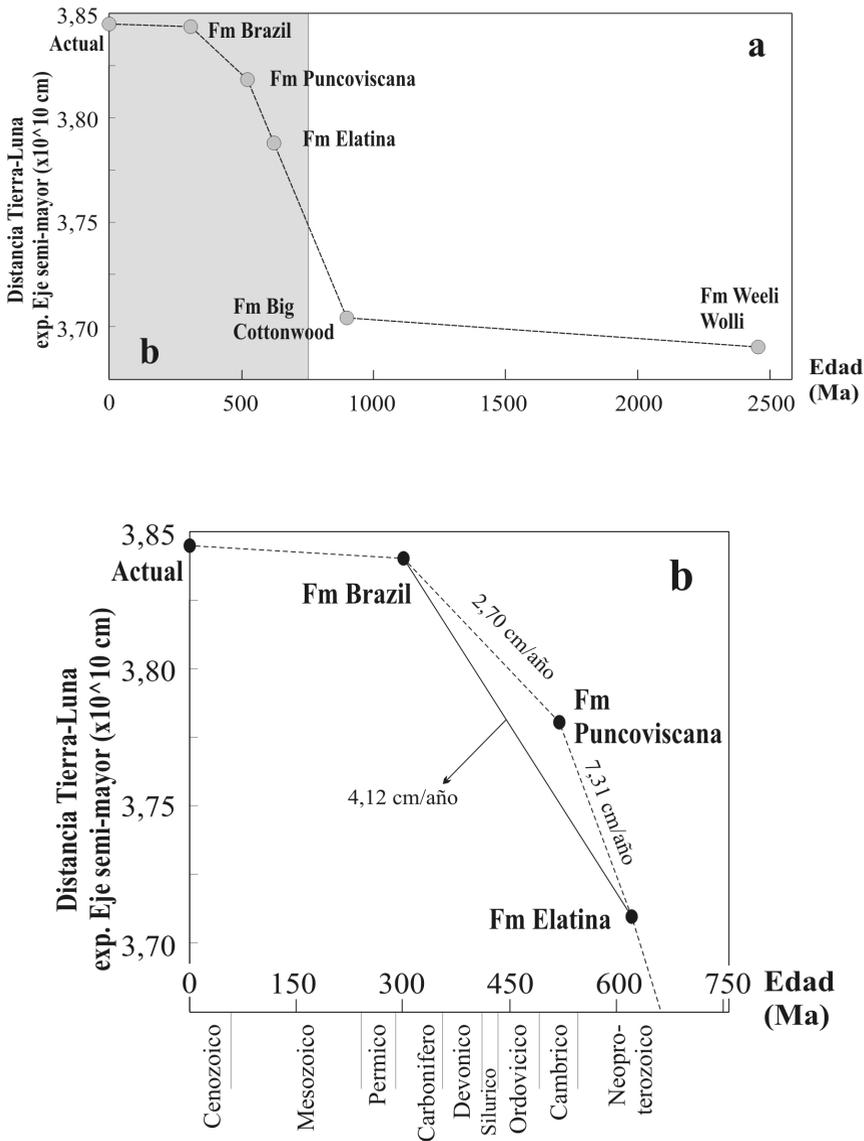


Figura 6. Variación de la distancia Tierra-Luna a lo largo del tiempo geológico, calculada como el eje semimayor en cm, para el lapso temporal a) Paleoproterozoico-Actual, b) Ediacarano-Actual. Formación Weeli Wolli, Australia (2450 Ma, Williams 2000), Formación Big Cottonwood-USA (900 Ma, Sonett y Chan 1998), Formación Elatina-Australia (620 Ma, Sonett y Chan 1998), Formación Puncoviscana-Argentina (523 Ma, López de Azarevich 2010, López de Azarevich *et al.* 2010), Formación Brazil-USA (Carbonífero, Kvale *et al.* 1999).

La metodología de análisis armónico de secuencias rítmicas mareales se basa en la evaluación de los componentes periódicos que afectan la sedimentación, tomando como base de datos los espesores de lámina. La aplicación de FFT sobre datos “crudos” o filtrados permite conocer aquellos parámetros astronómicos que afectaron las mareas en el límite Ediacarano-Cámbrico en el NO argentino. Estos corresponden a los ciclos lunares (sinódico, anomalístico, tropical), períodos estacionales o régimen semidiurno, y son reconocidos en gráficos n° de lámina versus espesor y período vs densidad poder espectral.

Así mismo, los resultados obtenidos por este método fueron utilizados para calcular la distancia Tierra-Luna para el tiempo de depositación, permitiendo reconocer la tasa de alejamiento de la Luna en el lapso Ediacarano-Cámbrico inferior y Cámbrico inferior-Carbonífero.

Las metodologías desarrolladas para el análisis de secuencias sedimentarias afectadas por mareas del Ediacarano-Cámbrico inferior del NOA son aplicables también a sucesiones rítmicas mareales más jóvenes o más antiguas. La importancia que tiene su aplicación es también la posibilidad de comprender las relaciones paleoastronómicas del sistema Tierra-Luna en un espectro más amplio del tiempo geológico.

Bibliografía

- Aceñolaza, G.F. y Aceñolaza, F.G., 2007 Insights in the Neoproterozoic Early Cambrian transition of NW Argentina: facies, environments and fossils in the proto-margin of western Gondwana. *Geological Society, London, Special Publications*. 286: 1-13.
- Aceñolaza, F.G. y Toselli, A.J., 2009. The Pampean Orogen: Ediacaran-Lower Cambrian Evolutionary History of Central and Northwest Region of Argentina. In Gaucher, C. Sial, A., Halverson, G y Frimmel, H. (Eds) Neoproterozoic-cambrian tectonic, Global Change and Evolution: a focus on southwestern Gondwana. *Development in Precambrian Geology* 16: 239-254. Elsevier.
- Aceñolaza, F.G., Aceñolaza, G.F. y Esteban, S.B., 1999. Bioestratigrafía de la Formación Puncoviscana y unidades equivalentes en el NOA. En: González Bonorino, G., Omarini, R., Viramonte, J. (Eds.), Geología del Noroeste Argentino. *Relatorio 14º Congreso Geológico Argentino*, pp. 91-114, Salta.
- Aceñolaza, F.G., Toselli, A.J., Miller, H. y Adams, Ch., 2010. Interpretación de las poblaciones de Circones detríticos en Unidades estratigráficas equivalentes del Ediacarano-Cámbrico de Argentina. En: Aceñolaza, F.G. y Toselli, A.J. (eds.): Ediacarano-Cámbrico inferior, *Serie de Correlación Geológica* 26: 27-36. INSUGEO, Tucumán.
- Adams, C., Miller, H., y Toselli, A.J. 2008. Detrital circon U-Pb ages of the Puncoviscana Formation, Late Neoproterozoic – Early Cambrian, of NW Argentina: provenance area and maximum age of deposition. *VI South American Symposium on Isotope Geology (VI SSAGI). Abstract*, p. 152.
- Allen, P.A. y Homehood, P., 1984. Evolution and mechanics of a Miocene tidal sandwave. *Sedimentology* 31 (1): 63-81.
- Archer, A.W., 1996. Reliability of lunar orbital periods extracted from ancient cyclic tidal rhythmites. *Earth and Planetary Science Letters*, 141: 1-10.
- Archer, A.W. y Johnson, T., 1997. Modelling of cyclic tidal rhythmites (Carboniferous of Indiana and Kansas, Precambrian of Utah, USA) as a basis for reconstruction of intertidal positioning and paleotidal regimes. *Sedimentology*, 44: 991-1010.
- Borrello, A., 1969. Los geosinclinales de la Argentina. *Anales de la Dirección Nacional de Minería y Geología*, XIV. Buenos Aires.
- Bouma, A.H. y Brouwer, A., 1964. Developments in sedimentology 3: Turbidites. 264 pp. *Elsevier*. Amsterdam.
- Collinson, J.D., 1979. The sedimentology of the Grindslow Shales and the Kinderscout Grit: a deltaic complex in the Namurian of northern England. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39: 194-221.
- Darwin, G.H., 1877. On the influence of geological changes on the Earth's axis of rotation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 167:271.
- Darwin, G.H., 1879. On the precession of a viscous spheroid and on the remote history of the earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 170: 447-530.
- Darwin, G.H., 1880. On the secular change of the orbit of a satellite revolving about a tidally distorted planet. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 171: 713-891.

- Ehlers, T.A. y Chan, M.A., 1999. Tidal sedimentology and estuarine deposition of the Proterozoic Big Cottonwood Formation, Utah. *Journal of Sedimentary Research*, 69 (6): 1169-1180.
- Gressly, A., 1838. Observations géologiques sur le Jura Soleurois. *Neue Denkschr. Allg. Schweiz. Ges. Ges. Naturw.*, 2, 1-112.
- Hauser, N., Matteini, M., Omarini, R. y Pimentel, M., 2010. combined U-Pb and Lu-Hf isotope data for turbidites of the Paleozoic basement of NW Argentina and petrology of associated igneous rocks : implications for the tectonic evolution of western Gondwana between 560 and 460 Ma. *Gondwana Research*. En prensa.
- Hongn, F.D., Tubía, J.M., Aranguren, A. y Mon, R., 2001. El batolito de Tastil (Salta, Argentina): un caso de magmatismo poliorogénico en el basamento andino. *Boletín Geológico y Minero*, 112: 113-124.
- Hongn, F.D., Tubía, J.M., Aranguren, A., Vegas, N., Mon, R. y Dunning, G., 2010. Magmatism coeval with lower Paleozoic shelf basins in NW-Argentina (Tastil batholith): constraints on current stratigraphic and tectonic interpretations. *Journal of South American Earth Sciences* 29, 289-305.
- Jezek, P., 1990. Análisis sedimentológico de la Formación Puncoviscana entre Tucumán y Salta. En Aceñolaza F.G. *et al* (eds). El Ciclo Pampeano en el Noroeste argentino. *Serie Correlación Geológica* 4 : 9-36.
- Horne, J.H. y Baliunas, S.L., 1986. A prescription for period analysis of unevenly sampled time series. *Astrophysics Journal*, 302: 757-763.
- Jenkins, G.M. y Wats, D.G., 1968. Spectral analysis and its applications. Holden-Day. San Francisco CA, 525 pp.
- Jezek, P., 1986. *Petrographie und facies der Puncoviscana Formation, einer turbiditischen serie im Oberpräkambrium und Unterkambrium NW-Argentiniens*. Diss. Univ. Munster. Inédito.
- Jezek, P., 1990. Análisis sedimentológico de la Formación Puncoviscana entre Tucumán y Salta. En: Aceñolaza, F., Miller, H. y Toselli, A. (Eds.), El Ciclo Pampeano en el noroeste argentino, *Serie Correlación Geológica* 4: 9-36, Tucumán.
- Johnson, H.D. y Baldwin, C.T., 1986. *Shallow siliciclastic seas*. En: Reading, H.G. (ed.), Sedimentary environments and Facies, 2da edición, 229-282. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Kvale, E.P., Archer, A.W. y Johnson, H.R., 1989. Daily, monthly, and yearly tidal cycles within laminated siltstones of the Mansfield Formation (Pennsylvanian) of Indiana. *Geology* 17: 365-368.
- Kvale, E.P., Fraser, G.S., Archer, A.W., Zawistoski, A., Kemp, N. y McGough, P., 1994. Evidence of seasonal precipitation in Pennsylvanian sediments of the Illinois Basin. *Geology*, 22: 331-334.
- Kvale, E.P., Cutright, J., Bilodeau, D., Archer, A.W., Johnson, H.R. y Pickett, B., 1995. Analysis of modern tides and implications for ancient tides. *Continental Shelf Research*, 15: 1921-1943.
- Kvale, E.P., Johnson, H.R., Sonett, C., Archer, A.W. y Zawistoski, A., 1999. Calculating lunar retreat rates using tidal rhythmites. *Journal of Sedimentary Research*, 69: 1154-1168.
- Laplace, P.-S., 1799-1825. *Tratado de Mecánica Celeste*, 5 volúmenes. París.
- López de Azarevich, V.L., 2010. Advances in harmonic analysis of tidal rhythmites in the Puncoviscana Formation (Proterozoic - Early Cambrian), northwest Argentina. *18° International Sedimentological Congress, Abstract* 606. Mendoza.
- López de Azarevich, V.L. y Omarini, R., 2008a. **Tidal rhythmites in the Puncoviscana Formation (s.l.): The lost Precambrian-Eocambrian coast of NW Argentina.** *12° Reunión Argentina de Sedimentología. Actas*, pp. 100, Buenos Aires.
- López de Azarevich, V.L. y Omarini, R., 2008b. Mixed paleotidal system for the Proterozoic-Cambrian carbonate platform in NW Argentina. *12° Reunión Argentina de Sedimentología. Actas*, pp. 99, Buenos Aires.
- López de Azarevich, V.L., Omarini, R.H. y Salvo, N., 2008a. Paleo-hidrodinámica mareal de la plataforma carbonática proterozoico-eocámbrica del NO argentino. *XVII Congreso Geológico Argentino, Actas* I: 358-359. Jujuy.
- López de Azarevich, V.L., Omarini, R.H. y Salvo, N., 2008b. Ritmitas tidales en la Formación Puncoviscana (s.l.), NOA: dinámica mareal y consideraciones. *XVII Congreso Geológico Argentino, Actas* I: 360-361. Jujuy. ISBN: 978-987-22403-1-8.
- López de Azarevich, V.L., Omarini, R.H., Sureda, R.J. y Azarevich, M.B., 2010a. Ritmitas mareales en la Formación Puncoviscana (s.l.), en la localidad de Rancagua, noroeste argentino: dinámica mareal y consideraciones paleoastronómicas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 66 (1): 104-118. Buenos Aires.
- López de Azarevich, V.L., Omarini, R.H., Sureda, R.J. y Azarevich, M.B., 2010b. Sedimentary structures in the Puncoviscana Formation (Proterozoic - Early Cambrian), NW-Argentina: a comparison with modern shallow water analogs. *18° International Sedimentological Congress, Abstract* 652. Mendoza.
- Lork, A., Miller, H., Kramm, U. y Grauert, B., 1990. Sistemática U-Pb de circones detríticos de la Formación Puncoviscana y su significado para la edad máxima de sedimentación en la Sierra de Cachi (Provincia de Salta, Argentina). En: Aceñolaza, F., Miller, H. y Toselli, A. (eds.): El Ciclo Pampeano en el Noroeste Argentino, *Serie de Correlación Geológica* 4: 199-208. Tucumán.
- Matteini, M., Hauser, N., Pimentel, M.M., Omarini, R., Dantas, E.L. y Buhn, B.M. 2008. Combined in situ U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd systematics applied to the Tastil batholith, Eastern Cordillera, NW Argentina: Implications for the evolution of Western margin of Gondwana during the Early Paleozoic. San Carlos de Bariloche, *VI South American Symposium on Isotope Geology*, 4 p. CD-ROM.

- Mazumder, R. y Arima, M., 2005. Tidal rhythmites and their implications. *Earth-Science Reviews*, 69: 79-95.
- Middleton, G.V., 1973. Johannes Walther's Law of the correlation of facies. *Bulletin of the Geological Society of America*, 84: 979-988.
- Miller, D.J. y Erikson, K.A., 1997. Late Mississippian prodeltaic rhythmites in the Appalachian Basin: a hierarchical record of tidal and climatic periodicities. *Journal of Sedimentary Research*, 67: 653-660.
- Moya, M.C., 1998. El Paleozoico inferior en la sierra de Mojotoro, Salta-Jujuy. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 53 (2): 219-238.
- Mutti, E., 1992. *Turbidite sandstones*. AGIP, Instituto de Geología. Università di Parma.
- Mutti, E. y Ricci Lucchi, F., 1972. Le torbidit del l'Appennino sttentrionale: introduzione all'analisi di facies. *Memoria de la Sociedad Geologica Italiana*, 11: 161-199.
- Newton, I., 1687. *Principios matemáticos de la Filosofía natural [Philosophiae Naturalis Principia Mathematica]*. Ediciones Altaya, S.A. Grandes Obras del Pensamiento, 21. 621 págs. Barcelona, 1993, ISBN 84-487-0140-2.
- Omarini, R., 1983. *Caracterización litológica, diferenciación y génesis de la Formación Puncoviscana entre el Valle de Lerma y La Faja Eruptiva de la Puna*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, 202 pp. (inédita).
- Omarini, R. y Baldis, B., 1984. Sedimentología y mecanismos deposicionales de la Formación Puncoviscana (Grupo Lerma, Precámbrico – Cámbrico) del Noroeste Argentino. *IX Congreso Geológico Argentino, Actas I*: 384-398.
- Omarini, R., Sureda, R., Götz, H., Seilacher, A. y Pflüger, F., 1999. **Puncoviscana folded belt in northwestern Argentina: testimony of Late Proterozoic Rodinia fragmentation and pre-Gondwana collisional episodes.** *International Journal of Earth Science*, 88: 76-97.
- Omarini, R.H., Sureda, R.J., López de Azarevich, V.L. y Hauser, N., 2008. El basamento Neoproterozoico-Cámbrico inferior en la provincia de Jujuy. En: Coira, B. y Zappettini, E. (Eds.): *Geología y Recursos Naturales de la provincia de Jujuy. Relatorio XVII Congreso Geológico Argentino, Capítulo IIa: Ciclo Pampeano y Famatiniano*: 17-28.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A. y Vetterling, W.T., 1988. *Numerical recipes in C, The art of Scientific Computing*, 745 pp. Cambridge University Press, New York. En: Archer, A., 1996. Reliability of lunar orbital periods extracted from ancient cyclic tidal rhythmites. *Earth and Planetary Science Letters*, 141: 1-10.
- Postma, G., Memec, W. y Kleinspehn, K.L., 1988. Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement. *Sedimentary Geology*, 58: 47-61.
- Salfity, J., Omarini, R., Baldis, B. y Gutierrez, W., 1976. Consideraciones sobre la evolución geológica del Precámbrico y Paleozoico del norte argentino. *2º Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 4*: 341-361. Buenos Aires.
- Sanders, J.E., 1963. Concepts of fluid mechanics provided by primary sedimentary structures. *Journal of Sedimentary Research* 33 (1): 173-179.
- Sanders, J.E., 1965. Primary sedimentary structures formed by turbidity currents and related re-sedimentation mechanisms. En: Middleton, G.V. (ed.): *Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication*, 12: 192-219.
- Sonett, C.P. y Chan, M.A., 1998. Neoproterozoic Earth-Moon dynamics: Rework of the 900 Ma Big Cottonwood Canyon tidal rhythmites. *Geophysical Research Letters*, 25: 539-542.
- Sonett, C.P., Kvale, E.P., Zakharian, A., Chan, M.A. y Demko, T.M., 1996. **Late Proterozoic and Palaeozoic tides, retreat of the Moon, and rotation of the Earth.** *Science*, 273: 100-104.
- Turner, J.C.M., 1960. Estratigrafía de la Sierra de Santa Victoria y adyacentes. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias*, 41 (2): 163-196, Córdoba.
- Visser, M.J., 1980. Neap-spring cycles reflected in Holocene subtidal large-scale bedform deposits: A preliminary note. *Geology*, 8 (11): 543-546.
- Williams, G.E., 1989. Late Proterozoic tidal rhythmites in South Australia and the history of the earth rotation. *Journal of the Geological Society (London)*, 146: 97-111.
- Williams, G.E., 2000. Geological constraints on the precambrian history of Earth's rotation and the Moon's orbit. *Reviews of Geophysics*, 38 (1): 37-59.
- Yang, C-S y Nio, S-D., 1985. The estimation of palaeohydrodynamic processes from subtidal deposits using time series analysis methods. *Sedimentology*, 32 (1): 41-57.
- Zappettini, E., Coira, B. y Santos, J.O., 2008. Edad U/Pb de la Formación Chañi: granito del arco magmático tilcárico. *XVII Congreso Geológico Argentino, Actas I*: 248-249. Jujuy.

Recibido: 5 de agosto de 2010

Aceptado: 15 de octubre de 2010

