

# EVOLUCION GEOLÓGICA Y DISPOSICIÓN DEL PAISAJE ACTUAL

CARLOS M. GONZÁLEZ-LEÓN<sup>1</sup>

**RESUMEN.** Las rocas más antiguas de Sonora son metamórficas e ígneas con edades entre 1 800 y 1 100 Ma, e indican que durante el tiempo Proterozoico la región sufrió procesos tectónicos y magmáticos que produjeron montañas. Entre 1 100 y 800 Ma la región estuvo sujeta a la erosión, permitiendo las incursiones marinas donde vivieron los primeros organismos simples que habitaron la Tierra. En el Período Cámbrico los mares someros albergaron abundantes formas de vida como los trilobites, braquiópodos y bivalvos, mientras que durante el resto de la Era Paleozoica y hasta principios de la Mesozoica, el territorio continuó siendo invadido por mares tropicales. Durante el Mesozoico, Sonora estuvo dominado por actividad magmática, pero una última invasión marina ocurrió a finales del Jurásico y principios del Cretácico. A finales del Cretácico en la región se desarrolló un arco magmático y prevaleció un efecto climático de invernadero, el cual está registrado por las rocas del grupo Cabullona. Para el Cenozoico se configuró la actual geomorfología del estado: la Sierra Madre Occidental se formó por vulcanismo que ocurrió entre 33 y 27 Ma y la fisiografía de Sierras y Valles Paralelos se formó por fallamiento que empezó a los ~27 Ma. La apertura del Golfo de California inició hace ~12 Ma y, asociado a ella, el vulcanismo de El Pinacate empezó entre hace 3 a 4 Ma. El Gran Desierto empezó a formarse hace ~1 Ma cuando Sonora estaba poblada por una megafauna de vertebrados, y al principio del Holoceno el clima entró a una época interglacial que permitió el poblamiento de sus primeros habitantes, los Clovis, y la extinción de la megafauna.

**ABSTRACT.** The oldest rocks of Sonora are metamorphic and igneous rocks with ages between 1 800 and 1 100 Ma, that record tectonic and magmatic processes

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de México.

that formed mountains during Proterozoic time. Between 1 100 and 800 Ma the erosive processes leveled the relief of the region giving way to the first marine incursions where some of the oldest forms of life on Earth flourished. During Cambrian time an abundant fauna of trilobites, brachiopods and bivalves lived in those shallow tropical seas that intermittently continued invading the region during the Paleozoic Era and early Mesozoic time. During the Mesozoic, Sonora was dominated by magmatic activity but a last marine incursion occurred between Late Jurassic and early Cretaceous. A magmatic arc started to develop by Late Cretaceous time, just when the World was subject to greenhouse conditions whose effect in Sonora are recorded by rocks of the Cabullona Group. The present geomorphology of the state was erected during the Cenozoic: The Sierra Madre Occidental was formed by profuse volcanism between 33 and 27 Ma and the Basin and Ranges physiography started to form by faulting at ~27 Ma. The opening of the Gulf of California initiated at ~12 Ma and one of its associated consequences was initiation of volcanic activity, at ~4 Ma, that formed the El Pinacate volcanic field. The El Gran Desierto started to develop closet to 1 Ma when an abundant vertebrate megafauna was living in Sonora. At the beginning of the Holocene climate shifted from a glacial to an interglacial stage, the first human Clovis populated the region, and the megafauna became extinct.

## INTRODUCCIÓN

La región noroeste de México que incluye Sonora ha sido el escenario de complejos cambios geológicos, bióticos y climáticos que han ocurrido desde la formación de su primera corteza terrestre, durante el Eón Proterozoico, hace cerca de dos mil

millones de años (Ma). Desde entonces, y puesto que la corteza terrestre (que aloja a los continentes) es dinámica debido al proceso de la tectónica de placas, la región de Sonora ha ocupado distintas latitudes geográficas formando parte de diversos continentes. La compleja historia geológica que registran las rocas de esta región empieza cuando sus rocas más antiguas, que son graníticas y metamórficas, pertenecían al paleo-continente llamado Columbia (figura 1A). Estas rocas, al ser fechadas por métodos isotópicos, han proporcionado edades entre 1 600 y 1 800 Ma (Anderson y Silver, 2005). El continente Columbia aglutinaba a núcleos de las rocas más antiguas alrededor de los cuales fueron creciendo los continentes actuales, pero posteriormente sus placas tectónicas se reorganizaron para formar un nuevo y más extenso continente llamado Rodinia, que se consolidó hace 1 100 Ma (figura 1B).

El presente trabajo se propone dar una semblanza general de la compleja evolución geológica que ha experimentado la región de Sonora, desde los tiempos de formación de sus primeras rocas hasta el actual: una historia de aproximadamente 1 800 Ma. Dicha historia, que está escrita en las rocas que afloran en sus valles y sierras, ha sido hurgada, descifrada y reportada por muchos naturalistas, geólogos y paleontólogos, cuyo trabajo acumulado ha contribuido a su conocimiento. Entre los primeros de ellos están el de un minero de nombre A. Rémond de Corbiveau, quien, en 1866, notó la presencia de carbón y plantas fósiles del triásico en la localidad de Los Bronces, cerca del poblado de San Javier en el centro de Sonora (en Burckhardt, 1930), el del paleontólogo W. M. Gabb, quien, en 1869, publicó un trabajo con ilustraciones de los fósiles cretácicos del cerro Las Conchas de Arivechi, el del médico G.E. Goodfellow, quien, en 1887, reportó el temblor del 3 de mayo de 1887 en la región de Bavispe y el del geólogo José G. Aguilera, quien, un año después, en 1888, publicó el primer mapa geológico de Sonora (Suter, 2007). Un primer esfuerzo para compilar ampliamente la historia geológica de Sonora fue realizado por el geólogo A. Escárcega-Escárcega en 1985. Aunque el

enfoque y propósito del presente trabajo no permite hacer una revisión exhaustiva de las numerosas contribuciones a este conocimiento, a lo largo del texto se mencionan algunas de las publicaciones más importantes sobre las que basamos buena parte del conocimiento actual.

## ERA NEOPROTEROZOICA

Las rocas que constituyen el basamento de Sonora son rocas metamórficas e ígneas intrusivas de carácter granítico que registran los procesos geológicos más antiguos que ocurrieron en esta región. Estas rocas pertenecen al Eón Proterozoico y fueron formadas entre 1 800 y 1 600 Ma. Las rocas metamórficas fueron originalmente rocas sedimentarias y volcánicas que se agregaron a los supercontinentes Columbia y Rodinia por procesos tectónicos. Estos procesos las deformaron, plegándolas, fallándolas y metamorfizándolas y, finalmente, dieron lugar a su levantamiento para formar grandes cordilleras y montañas. Contemporánea a esa deformación debió haber ocurrido actividad ígnea que se continuó hasta hace 1 100 Ma, tal como se infiere por la presencia de cuerpos de rocas graníticas con edades de 1 700, 1 400 y 1 100 Ma que cortan a las rocas metamórficas (figura 2A). Estos cuerpos graníticos corresponden a cámaras magmáticas que alimentaron a volcanes cuyos productos (rocas volcánicas) deben haber sido erosionados, ya que no se observan en la región.

Durante los aproximadamente 300 Ma que siguieron a estos eventos tectónicos y magmáticos la región muy probablemente permaneció emergida y en quiescencia (sin movimientos tectónicos) y en una paleolatitud cercana al Ecuador. Durante ese tiempo, que va de entre ~1 100 a 800 Ma (figura 1B), los procesos erosivos debieron haber causado la degradación del relieve montañoso y transformado la región en una gran planicie con altitud cercana al nivel del mar.

Hace aproximadamente 800 Ma, todavía durante el tiempo Proterozoico, el supercontinente Rodinia empezó de nuevo a fragmentarse (Meert y

Torsvik, 2003) para formar dos grandes masas terrestres llamadas Laurentia y Gondwana (figuras 1C y D), pero Sonora permaneció en Norteamérica dentro del continente Laurentia. Este reajuste de placas continentales fue probablemente una de las causas de las oscilaciones del nivel del mar que provocó que la región de Sonora sufriera varias incursiones marinas durante los siguientes 540 Ma, desde finales del Proterozoico (Neoproterozoico) hasta el Período Pérmico en la Era Paleozoica, esto es, entre aproximadamente 800 y 260 Ma.

Las primeras invasiones marinas se dieron del Neoproterozoico al período Cámbrico (entre 800 Ma y 500 Ma). Durante ese tiempo los mares cubrieron periódicamente gran parte del occidente de Norteamérica y en el territorio de Sonora se extendieron desde la región de Caborca hasta Sahuaripa, pasando por los alrededores de Hermosillo, tal como lo prueba la presencia de rocas sedimentarias que se formaron en los fondos de esos mares (figura 2A). Los fondos marinos, sin embargo, no alcanzaron grandes profundidades y la región permaneció bajo aguas someras donde predominaban ambientes costeros, de intermareas y playa. Periódicamente las invasiones marinas alternaban con regresiones marinas (es decir, períodos en que el mar se alejaba del continente) y durante esos tiempos se desarrollaban ríos y localmente áreas con ambientes desérticos donde se depositaban sedimentos que ahora se preservan como rocas sedimentarias.

El registro estratigráfico y fósil de estas primeras incursiones marinas está bien documentado en la región central de Sonora por las rocas sedimentarias (conglomerados, areniscas, limolitas, calizas y dolomitas que alcanzan ~3 000 m de espesor) de los grupos Las Víboras y El Águila, que fueron formadas principalmente en ambientes marinos someros, entre aproximadamente 800 y 700 Ma (Stewart *et al.*, 2002). Un poco después siguió el depósito de los sedimentos que forman el Grupo Las Bolas en la región de Sahuaripa y que afloran en la Sierra Chiltepín (localizada a diez kilómetros al poniente de Sahuaripa). El Grupo Las Bolas alcanza 2 600 m de espesor y está formado por calizas, dolomitas y

areniscas que se formaron en ambientes de intermareas y ríos. Contiene además un paquete de diamictitas (rocas formadas por procesos glaciales) que se correlaciona con niveles semejantes que están presentes en rocas del suroeste de Estados Unidos, donde se considera tienen entre 760 y 700 Ma de edad.

Otra sucesión de rocas, un poco más jóvenes, que fueron formadas durante la transición del Neoproterozoico al Cámbrico, es la que aflora en la región entre Hermosillo y Caborca y que alcanza un espesor de al menos 3 300 m (figuras 2A y 3). Estas rocas sedimentarias fueron formadas en ambientes marinos de aguas someras, cálidas y ecuatoriales y se dividen en varias formaciones (figura 3; Stewart *et al.*, 1984). Fue en esos ambientes marinos de Sonora y de otras regiones de la Tierra donde empezaron a desarrollarse algunas formas de vida primitivas que después dieron origen a organismos más avanzados.

Las primeras trazas de vida que aparecieron sobre la Tierra pertenecen a cianobacterias, también llamadas algas «azul-verde». Éstas son formas de carácter unicelular, acuáticas y fotosintéticas que se han encontrado fosilizadas en rocas de hasta ~3 500 Ma. Aunque las cianobacterias existen todavía formando uno de los grupos importantes de las bacterias, en el Arqueano fueron responsables de formar la primera atmósfera oxigenada de la Tierra. Sus abundantes acumulaciones en los fondos marinos del Proterozoico constituían estructuras biogénicas en forma de carpetas y montículos, muchas de las cuales se preservaron, por lo que ahora las encontramos fósiles y se conocen con el nombre de *estromatolitos*. Los estromatolitos son los microfósiles más antiguos que conocemos y son comunes en las rocas sedimentarias que se formaron a partir de hace 1 000 Ma.

Algunas formaciones de las rocas Neoproterozoicas de Sonora tienen capas o niveles donde los estromatolitos son abundantes. Los más antiguos ocurren en capas dolomíticas del grupo Las Bolas (formaciones Año Nuevo y Monteso) y en las formaciones Gamuza y Papalote de la región de Caborca (figura 3). Los estromatolitos de la formación Gamuza pertenecen a los géneros *Conophyton*,

*Jacutophyton* y *Platella* (figura 4A) (Weber y Cevallos-Ferriz, 1980; Cevallos-Ferriz y Weber, 1980; Cevallos-Ferriz *et al.*, 1981; Weber *et al.*, 1979). También, en la misma secuencia de rocas Neoproterozoicas de la región de Caborca y en capas de caliza de la formación El Arpa (figura 3) se descubrió una microbiota de filamentos tipo algales, entre las que se distingue el género *Eomycetopsis*(?) (McMenamin *et al.*, 1983). En las rocas de la formación Clemente (figura 3) se han encontrado trazas de fósiles que pudieran pertenecer a los organismos eucariontes más antiguos, los cuales son conocidos como la biota Ediacara (McMenamin, 1996). El surgimiento de la biota Ediacara en la Tierra, que ocurrió entre los 575 y 542 Ma (Narbonne, 2005), es un parteaguas en la evolución de la vida, ya que, en contraste con las formas microscópicas que dominaron la vida anterior, ésta contiene los primeros organismos macroscópicos y de organización compleja que existieron. Los organismos Ediacara fueron marinos, diversos, abundantes y cosmopolitas, tal como lo prueba su presencia en varias localidades de los cinco continentes (Narbonne, 2005). La biota Ediacara la forman principalmente impresiones dejadas por organismos de cuerpos blandos (entre los que se tienen esponjas y cnidarios), sus huellas y perforaciones (algunas fueron de gusanos) y, en menor proporción, restos de sus partes duras. Los fósiles tipo Ediacara reportados de la formación Clemente (figura 3) (McMenamin, 1996; McMenamin y D'Ambrosio, 1997; McMenamin, 2001) pertenecen a *Evandavia aureola* (McMenamin, 2001) (figura 4E) y *Sekwia* (figura 4D) y las trazas o huellas clasificadas como *Lockeia*, *Palaeophycus tubularis* y *Vermiforme antiqua*. McMenamin (1996) consideró esta fauna como la más antigua de Ediacara y le asignó una edad aproximada de 600 Ma.

Otra fauna del tipo Ediacara ocurre en rocas sedimentarias de la formación La Ciénega (figura 3) de la región de Caborca (McMenamin *et al.*, 1983; Stewart *et al.*, 1984). La forman conchas de formas tubulares y cónicas de tamaños milimétricos que ocurren en dolomitas arenosas de esa formación y que pertenecen a los géneros *Cloudina* (fi-

gura 4B) (Sour-Tovar *et al.*, 2007), *Sinotubulites ciengensis*, *Turcutheca?* y probablemente el fósil traza *Rusophycus* (Stewart *et al.*, 1984; McMenamin y D'Ambrosio, 1997). A esta fauna se le da también el nombre de «pretrilobítica», ya que anuncia el pronto advenimiento de una «explosión biótica» de organismos superiores que ocurrió durante el período Cámbrico. A diferencia de las trazas y moldes dejados por la fauna Ediacara, los organismos con los que se inició (hace aproximadamente 542 Ma) y continuó después el período Cámbrico dejaron fósiles de las partes duras de sus cuerpos. Su inicio es considerado por los paleontólogos con la aparición por primera vez del fósil *Treptichnus pedum* (figura 4C). Este fósil ocurre en la parte inferior de la formación Puerto Blanco en el cerro La Ciénega al sur de Pitiquito (figura 3), mientras que en los estratos que siguen hacia arriba empiezan a dominar macrofósiles de los primeros trilobites, braquiópodos y arqueociatidos (tipo de esponjas) (figura 3) que fueron organismos abundantes, diversos y cosmopolitas durante principios de la Era Paleozoica.

## ERA PALEOZOICA

En Sonora, el límite entre las eras Neoproterozoica y Paleozoica de la historia de la Tierra, el cual además coincide con el inicio del período Cámbrico, se ubica muy probablemente en la parte inferior del paquete de rocas sedimentarias que corresponde a la formación Puerto Blanco (figura 3) (Sour-Tovar *et al.*, 2007). Los primeros macrofósiles cámbricos aparecen en la parte media de esa formación, a ~420 m por encima de la fauna pretrilobítica de la formación La Ciénega (figura 3). Hacia la parte superior de la columna sedimentaria cámbrica de la región de Caborca la fauna fósil se vuelve más abundante y diversa dentro de las formaciones Provedora, Buelna, Cerro Prieto, Arrojos y El Tren (figura 3) y consiste de braquiópodos, trilobites, bivalvos, arqueociatidos y gasterópodos. De ella, en 1952 Christina Lochman Balk identificó diversas especies nuevas de trilobitas a las cuales les asignó nombres científicos que hacen



referencia a características regionales y nacionales obvias. Ejemplos de éstas son: *Caborcella arrojensis*, *Bonnia sonora*, *Albertella proveedora*, *Alokistokare mexicana*, *Arellanella caborcana*, *Arellanella sonora*, *Mexicaspis difuntosensis*, *Mexicella mexicana*, *Olenellus puertoblancoensis*, *Onchocephalus mexicanus* y *Sombrierella mexicana*, entre otras (figuras 5A-H). Aparte de éstas, las rocas cámbricas de Sonora también están distribuidas en la parte central, oriental y norte del estado (figura 2B), donde se distinguen otras formaciones (figura 6A) cuya fauna fósil es igualmente abundante.

Durante el resto de la Era Paleozoica los mares someros y tropicales continuaron cubriendo intermitentemente a la parte norte y central de Sonora, pero hacia la parte sur del estado éstos se volvían de aguas profundas. Sin embargo, las rocas que en ellos se formaron afloran en pocos lugares, aunque localmente alcanzan grandes espesores (figuras 2B y 3). Al Período Ordovícico lo representan rocas sedimentarias que en la parte central del estado alcanzan hasta 3 500 m de espesor y cuyos fósiles indican que se formaron entre ~480 y ~450 Ma (figura 3). En los fondos de los mares someros de ese tiempo se depositaron sedimentos ricos en carbonato de calcio que formaron roca caliza y los fósiles más comunes en ellas son braquiópodos, trilobites, conodontos, gasterópodos, cefalópodos, briozoarios y crinoides (Peiffer-Rangin *et al.*, 1980; Almazán-Vázquez *et al.*, 2006). Las formaciones Las Norias y Pozo Nuevo en los alrededores de Hermosillo (Vega-Granillo y Araux-Sánchez, 1987; Page *et al.*, 2003; Almazán-Vázquez *et al.*, 2006) son unidades distintivas que representan a las rocas del Ordovícico Temprano (figura 3). Hacia la parte sur del estado los mares ordovícicos fueron profundos y los sedimentos que en ellos se depositaron están representados por rocas de las formaciones El Quemado, El Mezquite, El Pedernal, El Yaqui (figura 6B) y la Caliza Torote que consisten de lutitas negras, pedernal, calizas y areniscas. Estas unidades tienen una fauna fósil de braquiópodos, graptolites, conodontos y radiolarios, típica de ambientes marinos de aguas profundas (Poole *et al.*, 2000 y 2005). A finales del Período Ordoví-

co (~450 Ma) los mares se retiraron durante casi 30 Ma y regresaron de nuevo a finales del período Silúrico, tiempo durante el cual se depositaron las rocas de la formación Dolomita San Antonio (Poole *et al.*, 2000). En esos mares existieron arrecifes con abundantes corales cuyos fósiles se han preservado en las rocas de esa unidad. No obstante, las rocas sedimentarias que representan a este período solamente se conocen en la localidad de Sierra López (Rancho Placeritos, ubicado a 40 km al noroeste de Hermosillo) y su escasa presencia se debe a que después de su depositación los mares se retiraron de nuevo y la región quedó expuesta a la erosión durante otro largo período de ~30 millones de años (figura 3).

De finales del período Silúrico y hasta finales del Devónico Medio la región de Sonora permaneció emergida y no se tiene registro de los eventos que entonces ocurrieron. Sin embargo, durante el Devónico Tardío los mares volvieron a invadir todo el estado y la sedimentación se reanudó en la cuenca marina. En la parte norte y central de Sonora se conocen varias localidades donde las rocas de esta edad están compuestas principalmente por rocas carbonatadas (calizas y dolomitas), areniscas y lutitas que alcanzan hasta 400 m de espesor. En la región de Cananea-Agua Prieta aflora la Caliza Martín (figura 6A) que contiene una abundante fauna fósil arrecifal de corales coloniales, estromatopóridos, braquiópodos y briozoarios (González-León, 1986). En la región de Caborca se tiene a la formación Murciélagos (Brunner, 1975) y en el centro de Sonora a las formaciones San Miguel (Poole *et al.*, 2000) y La Sata (Almazán-Vázquez, 1989). Simultáneamente, en la parte sur de Sonora ocurría sedimentación en un ambiente de mar profundo donde se acumulaban sedimentos como pedernal, lutita, limolita, arenisca, caliza y barita que ahora están representados por la formación Los Pozos (Poole *et al.*, 2005) que tiene fósiles de graptolites, radiolarios, braquiópodos y conodontos.

Los mares se retiraron a finales del período Devónico para retornar y permanecer durante todo el Misisípico Temprano, tiempo durante el cual se de-

positó una columna de rocas sedimentarias de casi 800 m de espesor dominada por calizas (figura 3). Estos mares tropicales y someros de la parte central y norte del estado estaban poblados por abundantes organismos como corales y crinoides que formaban arrecifes, y por braquiópodos, esponjas, briozoarios y foraminíferos, entre los que predominaban los fusulínidos. La formación Escabrosa es unidad típica que representa la sedimentación marina formada durante el período Misisípico en el norte de Sonora (figura 6A) y la formación Placeritos la representa en el centro del estado (figura 3). Hacia la parte sur del estado continuó predominando la sedimentación marina profunda y las rocas Misisípicas están representadas por la parte superior de la formación Los Pozos y por la Caliza Cerro Tasajo. La litología de lutita, pedernal, limolita, arenisca, caliza y barita y los fósiles de radiolarios y conodontos de estas últimas unidades indican que fueron depositadas por grandes abanicos submarinos dentro de un mar profundo (Poole *et al.*, 2005).

Durante el Misisípico medio empezó una colisión o choque tectónico entre la parte sur del continente Laurentia y la parte norte de Gondwana que condujo a la formación del nuevo supercontinente llamado Pangea (figura 1E). Esta colisión produjo que las rocas paleozoicas previamente formadas en la parte sur de Sonora se levantaran, deformaran, en parte se erosionaran y que los mares se retiraran de la región durante ese tiempo. Sin embargo, la presencia marina se reanudó a finales del período Misisípico y principios del Pensilvánico y continuó intermitentemente hasta principios del período Pérmico (hasta ~280 Ma). En la parte central y norte de Sonora estos fueron de nuevo mares tropicales someros, de aguas claras y templadas que depositaron sedimentos carbonatados (caliza) y en menor proporción lodosos (lutita) y arenosos (arenisca), los cuales actualmente forman un paquete de rocas sedimentarias de aproximadamente 1 500 m de espesor dentro del cual se distinguen a las formaciones Horquilla, Earp, Colina, Concha y Epitaph en la parte noreste de Sonora (figura 6A). En esos mares florecieron los arreci-

fes formados por crinoides y corales y vivían abundantes braquiópodos, briozoarios, gasterópodos, foraminíferos y algas. En la región de Caborca (sierra del Álamo) se tiene a la formación Monos, del Pérmico Medio, cuyas rocas calizas tienen abundantes fósiles, entre los que destaca la presencia de braquiópodos (figuras 5I-L), corales y fusulínidos. En la parte sur de Sonora la sedimentación contemporánea ocurría en una cuenca marina de aguas profundas donde se depositaron lutitas, limolitas, areniscas, conglomerados, pedernal, barita y caliza con una fauna fósil de radiolarios, conodontos y fusulínidos. Estos sedimentos forman actualmente una pila de rocas de más de 2 000 m de espesor que se conoce como formaciones Rancho Nuevo y Mina México, las cuales se depositaron durante la deformación tectónica que empezó en el Misisípico Medio y terminó hasta el Pérmico Tardío (Poole *et al.*, 2005).

## ERA MESOZOICA

Posterior al choque entre los continentes Laurentia y Gondwana, éstos continuaron unidos formando el supercontinente Pangea que empezó de nuevo a disgregarse durante el período Jurásico (figura 1F). Al principio de la Era Mesozoica la región continuó recibiendo incursiones marinas durante todo el período Triásico y hasta principios del Jurásico. Sin embargo, desde el comienzo del Mesozoico (hace 251 millones de años) la geografía de Sonora empezó a cambiar y, de ser la tierra de relativa estabilidad tectónica y con notable presencia marina de la Era Paleozoica, pasó a ser el lugar donde la actividad tectónica y magmática empezó a predominar como fenómeno geológico. Este cambio determinó también un cambio en la geografía, climas y el tipo de organismos que poblaron la región.

El mar triásico cubrió a Sonora de 250 a ~180 millones de años y en sus fondos depositó una pila de sedimentos que ahora están representados por las rocas del Grupo El Antimonio (González-León *et al.*, 2005) que alcanza un espesor de >3 000 m. Este mar alternó entre niveles de aguas someras y

profundas donde vivieron abundantes organismos como amonitas, bivalvos (figuras 7A-K), braquiópodos, corales, esponjas, gasterópodos, crinoideos y hasta grandes reptiles marinos como los ictiosaurios (Callaway y Massare, 1989).

Durante ese mismo tiempo, en la parte central del estado se desarrollaban grandes deltas, ríos, lagos y pantanos en lugares costeros del mar triásico, los cuales depositaron gruesos espesores (>3 000 m) de sedimentos del Grupo Barranca. El Grupo Barranca (Alencáster, 1961a y 1961b) está compuesto por las formaciones Arrayanes, Santa Clara y Coyotes que consisten de areniscas, carbón, lutitas y conglomerados. En esos lugares tropicales floreció una abundante vegetación cuyos restos atrapados en los sedimentos pantanosos de la formación Santa Clara constituyeron los importantes depósitos de carbón y grafito de Sonora. Sus restos mejor preservados los encontramos como hojas, tallos y frutos que atestiguan la diversidad florística que pobló a los bosques del período Triásico en Sonora (figura 8).

Durante el Jurásico Medio (entre 180 y 160 Ma) la región se vio sujeta a una fuerte actividad tectónica que produjo volcanismo y levantamiento, lo que hizo que los mares se retiraran de ella. Fue un tiempo donde predominaron los ambientes continentales en los que se acumularon enormes pilas de rocas ígneas producto de la erupción de varios centros volcánicos, así como sedimentos formados por procesos fluviales. Localmente también existieron desiertos donde se acumularon arenas en dunas eólicas. Las rocas producto de estos eventos afloran ampliamente en las serranías de la parte norte de Sonora, desde Sonoita hasta Nacoziari, y localmente se les conoce con varios nombres, como la formación Elenita (figuras 2 y 3) en las sierras alrededor de Cananea. Su edad Jurásica Media se ha determinado por numerosos fechamientos isotópicos de estas rocas (por ejemplo, Anderson *et al.*, 2005).

El tiempo Jurásico Medio-Tardío fue cuando el supercontinente Pangea empezó a separarse en las dos grandes masas continentales de Laurencia y Gondwana (figura 1E). Su separación dio inicio a la formación del Golfo de México y del océano

Atlántico del norte y como parte de este proceso las aguas tropicales del mar Tethys (figura 1F) llegaron hasta Sonora durante el Jurásico Tardío (~160 Ma) (Villaseñor *et al.*, 2005). Esta nueva invasión marina trajo además una rica diversidad de organismos (figura 7), que dominó la biota marina hasta el Cretácico Temprano. Dicha incursión marina ocurrió a lo largo de cuencas o depresiones producidas por fallamiento que estuvo probablemente relacionado a la apertura del Golfo de México (Dickinson *et al.*, 1986) y en ellas se acumularon sedimentos tanto de origen continental como marinos. En la región de Cananea-Agua Prieta las primeras acumulaciones las produjeron ríos y abanicos aluviales que depositaron conglomerados, areniscas y rocas volcánicas del Conglomerado Glance, mientras que en la región central de Sonora ocurrió acumulación de sedimentos marinos de la Formación Cucurpe (figuras 2, 3 y 6C). Estos últimos corresponden a lutitas y areniscas en las cuales se encuentran abundantes fósiles de amonitas, bivalvos y belemnitas, indicios de la abundante fauna de esos mares (Villaseñor *et al.*, 2005). Hace aproximadamente 145 Ma los mares se retiraron de Sonora debido probablemente a un evento de deformación tectónica que afectó a la región, pero una nueva y última incursión marina que inició hacia ~130 Ma se prolongó, aunque intermitentemente, por treinta millones de años más, dando origen a los depósitos sedimentarios del Grupo Bisbee a inicios del período Cretácico (figura 3). En ese tiempo se depositaron lutitas, areniscas y calizas de la formación Mural (figuras 3 y 6D) dentro de un mar somero que cubría el norte de Sonora y que hacia el oriente del estado se volvía más profundo y depositaba allí las rocas del grupo Lampazos. El mar somero formaba una amplia plataforma donde se desarrollaban arrecifes de corales y rudistas (género de bivalvos) con una fauna asociada de gasterópodos, crinoideos, equinodermos, briozoarios y foraminíferos (González-León *et al.*, 2008).

Esta última invasión marina en territorio de Sonora se terminó hace ~100 Ma, casi al tiempo que empezaba el Cretácico Tardío y se debió al inicio de una nueva fase de actividad tectónica que mo-

dificó drásticamente el paisaje preexistente (Rangin, 1986). Este evento tectónico levantó y deformó (por plegamiento y fallamiento) a las rocas preexistentes y las erigió en cordilleras y montañas. La elevación del relieve fue también el resultado de una profusa actividad volcánica contemporánea que abarcó todo el estado de Sonora (figura 2D). Así, durante el Cretácico Tardío y en los tiempos cuando el globo terrestre estaba afectado por climas calientes y húmedos producto de un efecto invernadero que lo envolvía, Sonora pasó a ser tierra montañosa con abundantes volcanes, enormes ríos y extensos lagos. Uno de estos sistemas lacustres fue el que se desarrolló en la región de Naco-Fronteras, en la parte noreste de Sonora, dentro de la cuenca de Cabullona.

Entre los ~80 y 70 Ma la cuenca de Cabullona fue una región de vegetación profusa y grandes lagos donde desembocaban ríos y deltas cargados de abundantes sedimentos. Las rocas producto de estos procesos sedimentarios afloran allí actualmente formando un paquete de >2 500 m de espesor de lutitas, areniscas y conglomerados y al cual llamamos grupo Cabullona (figuras 6E y F) (Taliaferro, 1933; González-León y Lawton, 1995). En esos ambientes lacustres y fluviales vivieron dinosaurios, cocodrilos, tortugas y peces cuyos restos fósiles se encuentran actualmente en las formaciones del grupo Cabullona (figuras 3 y 9) (Lucas *et al.*, 1995). Los restos de dinosaurios consisten de abundantes vértebras, dientes y huesos de hadrosaurios, ceratópidos y terópodos e incluyen representantes de los temibles Tiranosaurios. Tanto los dinosaurios herbívoros como los carnívoros alcanzaban tamaños gigantescos y los de Sonora fueron de los últimos representantes de dicho grupo en la Tierra, ya que su extinción ocurrió hace 65 Ma, justo al límite entre los períodos Cretácico y Cenozoico.

El volcanismo del Cretácico Tardío se continuó hasta principios de la Era Cenozoica y las rocas formadas por este evento, que llamamos Formación Mesa y Formación Tarahumara (Valentine, 1936; Wilson y Rocha, 1949), están ampliamente distribuidas en casi todas las sierras de Sonora, don-

de tienen espesores de >2 000 m. Localmente éstas incluyen niveles con plantas fósiles que indican que dentro de la cadena volcánica coexistían lagos (Chacón-Baca *et al.*, 2002; Hernández-Castillo y Cevallos-Ferriz, 1999). Todos estos elementos indican que durante el Cretácico Tardío la región estuvo afectada por un clima tropical, caliente y lluvioso, donde florecía una abundante vegetación que soportaba la existencia de una rica fauna acuática y terrestre.

## ERA CENOZOICA

La actividad volcánica que empezó en Sonora hace aproximadamente 100 Ma disminuyó hace ~50 Ma, ya a finales de la época Paleocénica, en la Era Cenozoica. Sin embargo, las enormes cámaras magmáticas que alimentaron al volcanismo durante 50 Ma continuaron enfriándose a varios kilómetros debajo de la superficie terrestre y las últimas terminaron de hacerlo hace ~40 Ma (Valencia-Moreno *et al.*, 2006a). El magma de esas cámaras formó rocas graníticas, pero antes, y asociado a tal actividad magmática, se formaron los principales yacimientos minerales de Sonora. Los fluidos hidrotermales provenientes de las cámaras magmáticas eran ricos en elementos minerales y, mientras migraban, encontraron como los sitios más apropiados para descargar sus componentes metálicos a las rocas de la formación Tarahumara (figura 3). Cuando eso ocurrió y llegaron a acumularse en gran cantidad, dieron origen a depósitos minerales importantes que, tiempo después, al quedar expuestos en la superficie terrestre o cerca de ella, el hombre los minaría para su beneficio.

Actualmente algunas de las cámaras magmáticas que han quedado expuestas por levantamientos tectónicos y por la erosión forman grandes sierras de rocas graníticas, como es el caso de las sierras de Baviácora-Aconchi, donde geológicamente se les conocen como Batolitos de Aconchi y El Jiralito (Roldán Quintana, 1991) (figura 6H). La mayor parte de los yacimientos con mineralización asociada de Cobre, Plata, Plomo, Zinc, Molibde-



no, Tungsteno y Oro de Sonora (por ejemplo las grandes minas de Cananea y La Caridad) tienen edades entre 60 y 50 Ma y fueron también formados durante este gran evento magmático (Valencia-Moreno *et al.*, 2006b).

La época Eocénica que sigue a la Paleocénica no tiene un registro geológico significativo en Sonora. Al parecer fue un tiempo durante el cual prevaleció la actividad tectónica que mantuvo a la región levantada y sus rocas sujetas a la erosión y quizá es durante este tiempo que fueron expuestas las cámaras magmáticas mencionadas. Sin embargo, al iniciar la Época Oligocénica comenzó otro período de actividad volcánica de la mayor importancia que se extendió por toda la costa del Pacífico mexicano. Este evento, y los que posteriormente siguieron hasta el presente, son los que modelaron el panorama actual de Sonora y, aunque todavía pertenecen al Cenozoico, se discuten por separado en el siguiente apartado.

### EVENTOS GEOLÓGICOS RECIENTES Y EL PANORAMA ACTUAL

La morfología actual de Sonora (figura 10) está definida por varias provincias fisiográficas que, según Raisz (1964), incluye las siguientes del oriente al poniente: la provincia de la Sierra Madre Occidental, la de Sierras Alargadas, la de Sierras Enterradas, la del Desierto y la de los Deltas. Antes, Robert E. King, geólogo explorador y pionero de la geología de Sonora, en 1939 también había advertido que la fisiografía del estado está formada por las provincias de la Sierra Madre Occidental con sus subprovincias de Mesetas y de Barrancas, la de Sierras y Valles Paralelos y la del Desierto. Los eventos geológicos y bióticos que contribuyeron al modelado de este paisaje y que se describen de forma breve, de más antiguo a más joven, son los siguientes: 1) la formación de la Sierra Madre Occidental, 2) el evento de fallamiento de Sierras y Valles Paralelos, 3) la formación del Golfo de California, 4) el volcanismo de la región del Pinacate y de otros valles del estado, 5) la formación del Gran

Desierto, 6) la presencia de la megafauna, 7) los primeros humanos en la región y, 8) la sismicidad activa.

### La Sierra Madre Occidental y la Provincia de Sierras y Valles Paralelos

Los elementos principales del relieve actual de Sonora fueron determinados a partir del Oligoceno, hace aproximadamente 33 Ma, cuando, adyacente a la costa del Pacífico mexicano, empezó una época de intenso volcanismo continental que formó una de las provincias volcánicas más grandes de la Tierra. Este evento se prolongó hasta aproximadamente los 27 Ma y, pese a que fue de corta duración, produjo tal acumulación de rocas volcánicas que llegaron a formar la elevada meseta de la actual Sierra Madre Occidental (Ferrari *et al.*, 2005). Aunque en Sonora dicho evento volcánico cubrió gran parte del estado, fue en su región oriental donde se centró con mayor intensidad y donde sus lavas y productos volcánicos alcanzaron espesores de hasta 1 000 m (Cochemé y Demant, 1991). El volcanismo de esa época fue de carácter explosivo, tal como lo prueban las calderas de hasta 20 km de diámetro que actualmente se distinguen en la Sierra Madre Occidental (por ejemplo las de Tepoca y Yécora en Sonora y la de Tomóchic en Chihuahua), que fueron algunos de los centros de las erupciones volcánicas. Las rocas que forman esta meseta volcánica han permanecido elevadas y en posición casi horizontal desde su formación (figuras 6G y 14B) debido al limitado efecto que les ha causado el fallamiento más reciente, aunque no han podido escapar al poder erosivo del agua que le ha cavado cañones profundos. Las altitudes en la Sierra Madre Occidental rondan los dos mil metros sobre el nivel del mar (msnm), pero algunas sierras del noreste del estado, como las de San Luis, Hachita Hueca y El Palomo alcanzan entre 2500 y 2700 msnm (figura 10).

Casi al finalizar el evento volcánico que formó a la Sierra Madre Occidental, la región de Sonora estuvo sujeta a un evento de fallamiento extensional que produjo bloques levantados y hundidos



alargados en dirección norte-sur. Dicho evento, que es conocido como de Sierras y Valles Paralelos, empezó a los ~27 Ma y terminó a los ~10 Ma (Stewart y Roldán-Quintana, 1994). Los bloques levantados formaron las actuales sierras de Sonora, mientras que los bloques hundidos formaron los valles principales (figura 10) a lo largo de los cuales empezaron a desarrollarse los ríos más importantes. Las rocas expuestas en los bloques levantados fueron erosionadas y sus productos, gravas y arenas, fueron transportados hacia los valles por corrientes de aguas donde fueron depositadas en abanicos aluviales, ríos y ocasionalmente en lagos. Este proceso acumuló importantes paquetes de sedimentos que, al consolidarse, formaron conglomerados, areniscas y limolitas de hasta 2 km de espesor y a los que se les conoce con el nombre de Formación Báucarit (King, 1939; McDowell *et al.*, 1997) (figura 6I).

### Golfo de California

Casi de forma contemporánea con el evento de Sierras y Valles Paralelos, entre los 23 y los 6 Ma, y a lo largo de lo que actualmente es la costa de Sonora y la costa oriental de Baja California, continuó ocurriendo volcanismo (Mora-Álvarez y McDowell, 2000). Dicha actividad magmática anunciaba la próxima formación del Golfo de California. Este volcanismo se distribuyó en ambas regiones cuando formaban una sola entidad, ya que en ese tiempo la Península estaba unida al continente y el Golfo de California todavía no se individualizaba. En Sonora, las rocas volcánicas de este evento se localizan principalmente en la región costera ubicada entre Guaymas y Puerto Peñasco y en la Isla del Tiburón, donde forman algunas serranías.

La formación del Golfo de California empezó hacia los 12 Ma cuando una cuenca empezó a abrirse en su parte sur debido a la fragmentación de la corteza continental, lo que causó su adelgazamiento y la formación allí de una dorsal oceánica (figura 10) (las dorsales son regiones de los fondos marinos donde ocurre separación entre placas tectónicas y crecimiento de nueva corteza terrestre debido a la

continua actividad volcánica que las caracteriza; estas se presentan desplazadas por fallas transformantes). Sin embargo, no fue sino hasta los 6 Ma cuando la dorsal se extendió hacia el norte dando lugar a la apertura continental entre la Isla del Tiburón y el Delta del Río Colorado (Oskin y Stock, 2003). En este proceso de apertura y separación, Baja California se convirtió en una península, mientras que la depresión fue invadida por aguas del océano Pacífico para formar el Golfo de California. La separación de la Península, que a la fecha se ha distanciado (~300 km) de Sonora, aún continúa a razón de ~5 cm por año y la dorsal activa localizada en el fondo del Golfo ha avanzado hasta cerca de la región del delta del Río Colorado, donde forma la Cuenca Wagner (figura 10). Allí, la dorsal termina y es reemplazada por fallas transformantes que se extienden en dirección noroeste hasta la bahía de San Francisco, en California, formando la gran zona de fallamiento activo conocida como falla de San Andrés; la falla Cerro Prieto en Sonora es una falla que pertenece a ese sistema (figura 10).

Con la apertura del Golfo de California los ríos que corrían por los valles de Sonora y que se iniciaron durante el evento de Sierras y Valles Paralelos empezaron a fluir hacia esa depresión marina depositando sus sedimentos en deltas de la región costera. Al consolidarse, dichos sedimentos se convirtieron en los reservorios de los importantes acuíferos de la región. Del mismo modo, los sedimentos que dichos ríos (como el Asunción –o Magdalena–, Sonora, Yaqui, Mayo y otros de menor magnitud) han continuado transportado desde entonces provienen de la erosión de las topografías altas del estado, proceso que lentamente ha rebajado y modelado al actual paisaje sonorenses.

El delta más grande de Sonora es el formado por el río Colorado en la parte norte del Golfo. Éste empezó a formarse entre hace ~5 y 4 Ma (Winker y Kidwell, 1986) y es todavía sitio de acumulación de sedimentos. El espesor del paquete sedimentario que allí se ha depositado es de casi 5.5 km y consiste de lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados (Pacheco *et al.*, 2006).

El Golfo de California continúa siendo una región tectónicamente activa y el fallamiento reciente ha levantado, en algunas regiones, terrazas marinas de aproximadamente cien mil años de edad (Ortlieb, 1991). En la costa de Sonora, sin embargo, se observan terrazas marinas emergidas que exponen restos de organismos marinos bien preservados (figuras 11A y 11B) y cuyo levantamiento fue producido por cambios globales en el nivel del mar (Ortlieb, 1991).

### Actividad volcánica reciente y el Gran Desierto de Sonora

En Sonora ha ocurrido actividad volcánica reciente, principalmente en el campo volcánico El Pinacate y en el campo volcánico de Moctezuma. Otros derrames volcánicos de menor importancia se ubican en los valles de Sonora, como en el de San Bernardino en la parte norte del estado (figura 10). La actividad volcánica en el campo El Pinacate, localizado en la parte norte del Golfo de California, se estima que empezó entre 3 y 4 Ma, aunque la edad más antigua que se ha fechado de sus lavas es de  $\sim 1.2$  Ma (Gutmann, 2002 y J. Gutmann, com. per., enero, 2007). El volcanismo de dicho campo es de carácter basáltico y los derrames de sus lavas cubren un área de más de 1 500 km<sup>2</sup>; tiene  $\sim 400$  conos volcánicos de tamaño pequeño pero sólo once de ellos poseen cráteres de tamaño considerable. De estas estructuras, el cráter Elegante es el de mayor tamaño, ya que mide 1 600 m de diámetro y 244 m de profundidad (figura 12 A). Lo siguen en tamaño los cráteres McDougal, Cerro Colorado, Sykes y Molina (figura 12). Los derrames volcánicos más antiguos del cráter Elegante tienen una edad de  $\sim 32$  600 años (Gutmann, 2006) y los depósitos sedimentarios de un lago que existió en su fondo tienen edades entre  $\sim 13$  000 a  $\sim 17$  000 años (en Gutmann, 1976). Las rocas volcánicas más jóvenes que en él se han fechado provienen del cerro La Laja con edad de 12 400 años (Gutmann *et al.*, 2000). De esta manera, el volcanismo en el campo El Pinacate está actualmente activo y su origen se relaciona a los procesos tectó-

nicos activos que están conduciendo a la separación de la Península de Baja California del continente americano.

En el valle de Moctezuma, entre el poblado del mismo nombre y el de Tepache (figura 10), se presentan derrames basálticos en posición horizontal, los cuales sobreyacen a rocas de la formación Báucarit. Éstos fueron producto de actividad volcánica relacionada a fallamiento reciente que ocurre en la margen occidental del valle (Paz-Moreno, 1985) y son contemporáneos con el volcanismo de El Pinacate. Sin embargo, y a diferencia de este último, el volcanismo de Moctezuma-Tepache no fue producto de actividad magmática explosiva, sino que los derrames se originaron a través de fisuras de la corteza terrestre por las que el magma fluyó hacia la superficie. En este campo sólo se distinguen cinco conos volcánicos de poca altitud que produjeron lavas y que se localizan en los cerros Villalobos, Mogote de Corrales, El Barril, Los Fierros y Cerro Blanco (Paz-Moreno *et al.*, 2003). Fechamientos isotópicos realizadas en las rocas volcánicas más antiguas de este campo indican que la actividad empezó alrededor de 1.7 Ma y continuaba todavía hasta hace  $\sim 300$  000 años (Paz-Moreno *et al.*, 2003; Mead *et al.*, 2006).

El Gran Desierto de Sonora es el campo de dunas activas más grande de Norteamérica y se localiza al poniente del campo El Pinacate, donde cubre un área aproximada de 5 700 km<sup>2</sup> (Blount y Lancaster, 1990). Gran parte de las arenas que forman sus dunas fueron transportadas por los sistemas de vientos que afectan la región y provienen de los sedimentos depositados en el delta por el río Colorado, de las playas del Golfo y, en menor proporción, son derivadas del campo volcánico El Pinacate. El viento que transporta la arena es también el agente de formación de las dunas y llega de las siguientes direcciones: durante el invierno proviene del noroeste, durante la primavera llega del oeste y los vientos del verano llegan del suroeste. En la parte oriental del Gran Desierto existe un campo de dunas cretónicas con alturas de entre 10 y 80 m que están formadas por granos bien redondeados de arena de tamaño fino a grueso, cons-

tituidos de cuarzo y en menor proporción de carbonatos y plagioclasas. Por otra parte, en la parte occidental del desierto se desarrollan dunas en forma de estrella con alturas de entre 80 y 150 m (figura 11C).

El Gran Desierto empezó a formarse durante el Pleistoceno Medio (hace menos de 1.0 Ma), ya que sus dunas más antiguas sobreyacen a sedimentos del Delta del Río Colorado, donde se han encontrado restos de mamíferos de esa edad (por ejemplo, osos hormigueros; Shaw y McDonald, 1987).

### La megafauna y los primeros humanos

Durante el último millón de años (del Pleistoceno Medio al Tardío) la Tierra se vio afectada por no menos de diez grandes glaciaciones (períodos glaciales) de aproximadamente cien mil años de duración cada una, las cuales se alternaron con épocas de climas más cálidos, o períodos interglaciales, de aproximadamente la misma duración. La más reciente de esas glaciaciones, a la cual se le conoce con el nombre de Wisconsin, empezó hace ~100 000 años y terminó con el retiro de los últimos glaciales (que llegaron a cubrir hasta la parte central de Estados Unidos) hace aproximadamente diez mil años. Así como el clima, durante ese tiempo la fauna en Norteamérica fue diferente a la actual. En ese entonces existían grandes mamíferos como los mamuts, mastodontes, gomfoterios y gliptodontes, entre otros, por lo que se le ha dado el nombre de megafauna. Existían también bisontes, camellos, llamas, tigres dientes de sable, caballos, osos hormigueros, armadillos gigantes y tapires. En Sonora se han encontrado restos de megafauna asociada con fauna menor en las localidades del golfo de Santa Clara (Shaw *et al.*, 2005), Rancho La Brisca (Cucurpe) (Van Devender *et al.*, 1985) y en Térapa (Moctezuma) (Mead *et al.*, 2006) (figura 10), de donde se han colectado restos de camellos, bisontes, gomfoterios, mamuts, caballos, tigres diente de sable, armadillos, milodontes, antílopes, anfibios, peces, reptiles y aves. Esta fauna se ha encontrado en sedimentos que indican ambientes de ríos y lagos con climas cálidos

que indicaría que prosperó durante períodos interglaciares. Su edad se considera del Pleistoceno Medio al Tardío, y la de Moctezuma se constriñe entre los ~500,000 y ~300,000 años (Mead *et al.*, 2006). Algunos restos más escasos de megafauna han sido encontrados en otros lugares aislados de Sonora (figura 13).

En tiempos más recientes, pero todavía en coexistencia con la megafauna, llegaron a América los primeros humanos provenientes de Asia. Éstos fueron los clovis cazadores que entraron por el estrecho de Bering (Beringia) hace ~13,500 años. Lo hicieron aprovechando un puente terrestre que se formó entre Siberia y Alaska a finales de la glaciación Wisconsin. En ese tiempo, el nivel del mar se encontraba hasta 100 m por debajo del actual, debido a que parte del agua de los océanos se acumulaba en glaciares. Antes de los clovis, el mismo viaje migratorio ya lo habían realizado varias especies de animales nativos de Asia a las cuales siguieron los humanos para alimentarse de ellas. En oposición, especies nativas de América como los caballos y camellos migraron hacia el viejo continente por los mismos puentes terrestres. También, durante la glaciación Wisconsin y para hace ~40 000 años los humanos modernos (*Homo sapiens sapiens*) ya se habían individualizado. Durante el breve período comprendido entre los 11 500 y 10 000 años que siguió a la entrada de los clovis, en Norteamérica se extinguieron 15 géneros de la megafauna. Esto ocurrió posiblemente debido a la acción depredadora de esos habitantes o quizá por el cambio climático caracterizado por los climas más cálidos y secos en los que todavía vivimos y que ocurrió a la entrada de la nueva época interglacial. Dicha extinción incluyó a los mamuts, mastodontes, gomfoterios (con el género *Cuveronius*; figura 13), megaterios, esmilodontes (*Smilodon fatalis*) y gliptodontes, así como a los caballos, camellos, osos gigantes (de tamaños mayores al actual Grizzly), leones americano (*Panthera leo atrox*), lobo gigante (*Canis dirus*) y algunas especies de aves gigantes. Los caballos no regresarían al continente sino hasta que los españoles los trajeron de nuevo durante la conquista de América.

Los clovis parecen haber poblado amplias regiones de Norteamérica, pero en el sureste del estado de Arizona, muy cerca de la frontera con el de Sonora, se han encontrado varios sitios con abundantes huesos de mamuts y de otra fauna asociados con puntas de flechas y herramientas hechas por esos cazadores. En Sonora se han encontrado varios sitios con puntas de flecha (Montané-Martí, 1987) de formas típicas clovis, pero el sitio conocido como El Bajío (figura 10), localizado a ~60 km al noreste de Hermosillo, es el mejor conocido y el que ha proporcionado una cantidad importante de utensilios (Montané-Martí, 1987). De acuerdo a Sánchez (2001), este lugar es posiblemente el sitio clovis de mayor tamaño en Norteamérica.

A la entrada del Holoceno (que comprende los últimos 11 800 años), con el desarrollo de un clima más parecido al actual, y ya sin mucha de la fauna típica de esos tiempos, los clovis de la región de Sonora-Arizona empezaron a reunirse en pequeños grupos y, para la mitad del primer milenio, antes de la Era Cristiana (hace 2 500 años) empezaron a practicar la agricultura; cultivaban maíz que habían adquirido de las culturas mesoamericanas, así como frijol y calabaza (Reid y Whittlesey, 1997).

### Sismicidad activa

En Sonora existen dos provincias con sismicidad activa. La primera se localiza en el fondo del Golfo de California, donde a diario se registra sismicidad de baja intensidad asociada a la dorsal oceánica que recorre su parte central, así como a las fallas transformantes que son parte del sistema que continúa conduciendo la apertura del Golfo (figura 10). Sin embargo, la sismicidad que ocurre en las fallas continentales, asociadas y pertenecientes al sistema San Andrés, tal como la de Cerro Prieto (figura 10), llega a ser de mayor magnitud, aunque de menor frecuencia que la del fondo del Golfo.

Otra región con sismicidad activa ocurre en la región noreste del estado, en el valle San Bernardino, asociada a la falla Pitaycachi o Batepito (figu-

ras 10 y 14). El 3 de mayo de 1887 ocurrió allí el epicentro de un sismo de magnitud 7.5 que causó grandes daños a las poblaciones de la región y sus efectos se sintieron hasta el centro del país. El sismo causó la muerte de 42 personas en el pueblo de Bavispe (Goodfellow, 1887) y dañó severamente a poblados cercanos como Fronteras, Nácori Chico, Bacadéhuachi, Granados, Huásabas, Villa Hidalgo, Moctezuma, Sahuaripa y hasta Janos en Chihuahua. Este sismo es, aparentemente, el de mayor magnitud que haya afectado a la Provincia de Sierras y Valles Paralelos (Suter y Contreras, 2002), la cual abarca desde el suroeste de Estados Unidos hasta la parte central de México. El temblor ocurrió cuando la falla Pitaycachi de tipo normal rompió produciendo una larga traza que todavía puede observarse en el terreno (figura 14). Dicha traza tiene una longitud de 101 km de largo y un salto vertical máximo de 5.1 m (Suter y Contreras, 2002). De esta manera, la falla Pitaycachi es parte del fallamiento que todavía ocurre asociado a la Provincia de Sierras y Valles Paralelos y a la apertura del Golfo de California.

La sismicidad ha continuado en la región del valle San Bernardino y en las áreas adyacentes. El segundo temblor de importancia en dicho valle ocurrió el 26 de mayo de 1907 con magnitud 5.2, además de que frecuentemente se presenta microsismicidad. En la región de Fronteras y al oeste de la falla Pitaycachi se ha presentado sismicidad entre los años de 1908 y 1989 asociada con fallas de tipo normal; el evento de mayor importancia en esa área sucedió el 25 de mayo de 1989 con magnitud de 4.2. Igualmente, en la región de Huásabas-Granados se han presentado sismos importantes como el del 17 de mayo de 1913 ( $M=5$ ), el del 18 de diciembre de 1923 ( $M=5.7$ ) y una serie de temblores con intensidades menor a 4 que se dieron en 1913, 1927 y 1993 (Suter, 2001). Otros sismos históricamente documentados han ocurrido como eventos aislados en las regiones de los valles de Sahuaripa, Guaymas, Nacozari, Bacadéhuachi y Magdalena (Suter, 2006), como el de magnitud de 4.5 ocurrido el 16 de octubre de 1999 en esta última localidad.



## AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos a Fred Croxen, Jim Gutman, Whitey Hagadorn, Hannes Löser, Mark McMennamin, Barney Poole, Jaime Roldán Quintana, Francisco Sour Tovar y Max Suter, quienes amablemente proporcionaron material fotográfico para las ilustraciones en este trabajo. Igualmente aprecio los permisos otorgados por el Dr. Roger Thomas a nombre de la Paleontological Society, por el Dr. Thomas Jorstad del Smithsonian National Museum of Natural History y la Revista Mexicana de Ciencias Geológicas para usar algunas de las imágenes de fósiles aquí publicadas. Agradezco también a los doctores Luca Ferrari y Dante Morán Zenteno por sus revisiones al trabajo, las cuales fueron de gran ayuda para mejorarlo.

## LITERATURA CITADA

- AGUILERA, J.G. 1888. *Estudios de los fenómenos sísmicos del 3 de mayo de 1887*. Anales del Ministerio de Fomento de la República Mexicana, vol. 10: 5-56.
- ALENCÁSTER, G. 1961a. Estratigrafía del Triásico Superior de la parte central del estado de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. *Paleontología Mexicana* 11: 1-18.
- ALENCÁSTER, G. 1961b. Fauna fósil de la formación Santa Clara (Cárnico) del estado de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. *Paleontología Mexicana* 11: 19-45.
- ALMAZÁN-VÁZQUEZ, E. 1989. El Cámbrico-Ordovícico de Arivechi, en la región centro-oriental del estado de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. *Revista* 8: 58-66.
- ALMAZÁN-VÁZQUEZ, E., B.E. BUITRÓN-SÁNCHEZ y O. FRANCO-VEGA. 2006. Formación Pozo Nuevo: una nueva secuencia litoestratigráfica de plataforma del Ordovícico Temprano de la región central de Sonora, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 23, 1: 23-38.
- ANDERSON, T.H., J.L. RODRÍGUEZ-CASTAÑEDA y L.T. SILVER. 2005. Jurassic Rocks in Sonora, Mexico: Relations to the Mojave-Sonora Megashield and its Inferred Northwestward Extension. En T.H. Anderson, J.A. Nourse, J.W. McKee y M.B. Steiner, eds. *The Mojave-Sonora Megashield Hypothesis: Development, Assessment, and Alternatives*. Geological Society of America Special Paper 393: 51-95.
- ANDERSON, T.H. y L.T. SILVER. 2005. The Mojave-Sonora Megashield. Field and Analytical Studies Leading to the Conception and Evolution of the Hypothesis. En: T.H. Anderson, J.A. Nourse, J.W. McKee y M.B. Steiner, eds. *The Mojave-Sonora Megashield Hypothesis: Development, Assessment, and Alternatives*. Geological Society of America Special Paper 393: 1-50.
- BLOUNT, G., y N. LANCASTER. 1990. Development of the Gran Desierto Sand Sea, Northwestern Mexico. *Geology* 18: 724-728.
- BRUNNER, P. 1975. Estudio estratigráfico del Devónico en el área de El Bisani, Caborca, Sonora. *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo* 7: 16-45.
- BURCKHARDT, C. 1930. Étude synthétique sur le Mésozoïque mexicain. *Mémoire de la Société Paléontologique Suisse* 49, parte 1, 123 p.
- CALLAWAY, J.M. y J.A. MASSARE. 1989. *Shastasaurus altispinus* (Ichthyosauria, Shastasauridae) from the Upper Triassic of the El Antimonio District, Northwestern Sonora, Mexico. *Journal of Paleontology* 63: 930-939.
- CEVALLOS-FERRIZ, S., A. SALCIDO-REYNA y A. PELAYO-LEDEZMA. 1981. Una nueva sección del Precámbrico de Sonora; los estromatolitos y su importancia. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. *Revista* 5: 1-16.
- CEVALLOS-FERRIZ, S. y R. WEBER. 1980. Arquitectura, estructura y ambiente de depósito de algunos estromatolitos del Precámbrico sedimentario de Caborca, Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. *Revista* 4: 97-103.
- CHACÓN-BACA, E., H. BERARDI-CAMPESI, S.R.S. CEVALLOS-FERRIZ, A.H. KNOLL y S., GOLUBIC. 2002. 70 Ma Nonmarine Diatoms from Northern Mexico. *Geology* 30: 279-281.
- COCHEMÉ, J.J. y A. DEMANT. 1991. Geology of the Yecora Area, Northern Sierra Madre Occidental, Mexico. En: E. Pérez-Segura y C. Jacques-Ayala, eds. *Studies of Sonoran Geology*. Geological Society of America Special Paper 254: 81-94.
- COOPER, G.A. 1952. Permian fauna at El Antimonio, western Sonora. *Smithsonian Miscellaneous Collections* 119, 2: 1-13.
- DAMBORENEA, S.E. y C.M. GONZÁLEZ-LEÓN. 1997. Late Triassic and Early Jurassic Bivalves from Sonora,



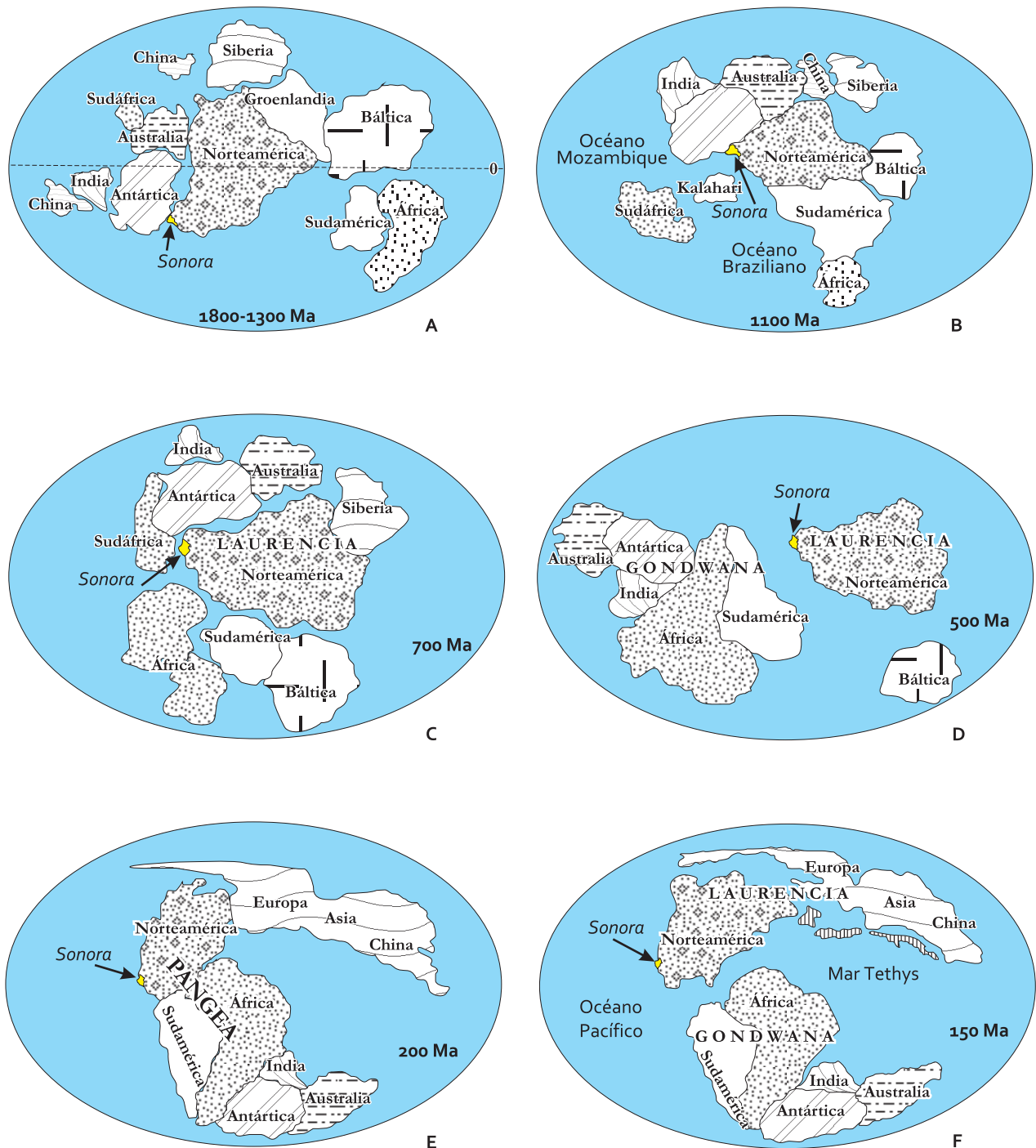
- Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 14: 178-201.
- DICKINSON, W.R., M.A. KLUTE y P.N. SWIFT. 1986. The Bisbee Basin and its Bearing on Late Mesozoic Paleogeographic and Paleotectonic Relations between the Cordilleran and Caribbean Regions. En: P.L. Abbott, ed. *Cretaceous Stratigraphy Western North America*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section 46: 51-62.
- ESCÁRCEGA-ESCÁRCEGA, J.A. 1985. Geología de Sonora. En: *Historia General de Sonora*. T. 1. Gobierno del Estado de Sonora, México, pp. 27-77.
- ESTEP, J.W., S.G. LUCAS y C.M. GONZÁLEZ-LEÓN. 1997. Late Triassic (Late Carnian) Ammonoids at El Antimonio, Sonora. En: C.M. González-León y G.D. Stanley Jr. *US-Mexico Cooperative Research: International Workshop on the Geology of Sonora*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste. Publicaciones Ocasionales 1: 16-18.
- FERRARI, L., M. VALENCIA-MORENO y S. BRYAN. 2005. Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, t. LVII, núm. 3, pp. 343-378.
- GABB, M.W. 1869. Notes on Some Mexican Cretaceous Fossils with Descriptions of New Species. California Geological Survey. *Paleontology* 2: 257-276.
- GONZÁLEZ-LEÓN, C.M. 1986. Estratigrafía del Paleozoico de la sierra del Tule, noreste de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. *Revista* 6: 117-135.
- GONZÁLEZ-LEÓN, C.M., G.D. STANLEY, G.E. GEHRELS y E. CENTENO-GARCÍA. 2005. New Data on the Lithostratigraphy, Detrital Zircon and Nd Isotope Provenance, and Paleogeographic Setting of the El Antimonio Group, Sonora, Mexico. En T.H. Anderson, J.A. Nourse, J.W. McKee y M.B. Steiner, eds. *The Mojave-Sonora Megashear Hypothesis: Development, Assessment, and Alternatives*. Geological Society of America Special Paper 393: 259-282.
- GONZÁLEZ-LEÓN, C.M., M.A. VALENCIA-MORENO, B. NOGUÉZ-ALCÁNTARA y E. SALVATIERRA-DOMÍNGUEZ. 2006. Mapa geológico de Sonora, México. Escala 1:1 000 000. *Digital Geosciences* ([http://digital-geosciences.unam.mx/toc.htm#Gonzalez\\_2006](http://digital-geosciences.unam.mx/toc.htm#Gonzalez_2006)).
- GONZÁLEZ-LEÓN, C.M., R.W. SCOTT, H. LÖSER, T.F. LAWTON y E. ROBERT. 2008. Upper Aptian-Lower Albian Mural Formation: Stratigraphy, Biostratigraphy and Depositional Cycles on the Sonoran Shelf, Northern México. *Cretaceous Research* 29: 249-266.
- GONZÁLEZ-LEÓN, C.M. y T.F. LAWTON. 1995. Stratigraphy, Depositional Environments and Origin of the Cabullona Basin, Northeastern Sonora. En: C. Jacques-Ayala, C.M. González-León y J. Roldán-Quintana, eds. *The Mesozoic of Sonora and Adjacent Areas*. Geological Society of America Special Papers 301: 121-142.
- GOODFELLOW, G.E. 1887. The Sonora Earthquake. *Science* 10: 81-82.
- GUTMANN, J.T. 1976. Geology of Crater Elegante, Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 87: 1718-1729.
- GUTMANN, J.T. 2002. Strombolian and Effusive Activity as Precursors to Phreatomagmatism: Eruptive Sequence at Maars of the Pinacate Volcanic Field, Sonora, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 113: 345-356.
- GUTMANN, J.T. 2006. The Age of Crater Elegante, a Maar in the Pinacate Volcanic Field, Sonora, Mexico. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 38, 6: 32.
- GUTMANN, J.T. TURRIN, B.D. y J.C. DOHRENWEND. 2000. Basaltic Rocks from the Pinacate Volcanic Field Yield Notably Young <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ages. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 81: 33-37.
- HERNÁNDEZ-CASTILLO, G.R. y S.R.S. CEVALLOS-FERRIZ. 1999. Reproductive and Vegetative Organs with Affinities to Haloragaceae from the Upper Cretaceous Huepac Chert Locality of Sonora, Mexico. *American Journal of Botany* 86: 1717-1734.
- HOFFMAN, P.F. 1991. Did the Breakout of Laurentia Turn Gondwanaland Inside-Out? *Science* 252: 1409-1412.
- INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SCIENCES. 2006. International Stratigraphic Chart. International Union of Geological Sciences, International Commission on Stratigraphy (<http://www.stratigraphy.org/cheu.pdf>).
- KING, R.E. 1939. Geological Reconnaissance in Northern Sierra Madre Occidental of Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 50: 1625-1722.
- LOCHMAN, C. 1948. New Cambrian Trilobite Genera from Northwest Sonora, Mexico. *Journal of Paleontology* 22: 451-464.
- LOCHMAN, C. 1952. Trilobites. En: G.A. Cooper, A.R.V. Arellano, J.H. Johnson, V.J. Okulithc, A. Stoyanow y C. Lochman, eds. *Cambrian Stratigraphy*

- phy and Paleontology near Caborca, Northwestern Sonora, Mexico.* Smithsonian Miscellaneous Collections 119, 1: 60-61.
- LUCAS, S.G., B.S. KUES y C.M. GONZÁLEZ-LEÓN. 1995. Paleontology of the Upper Cretaceous Cabullona Group, Northeastern Sonora, Mexico. En: C. Jacques-Ayala, C.M. González-León y J. Roldán-Quintana, eds. *The Mesozoic of Sonora and Adjacent Areas*. Geological Society of America Special Paper 301: 143-165.
- LUCAS, S.G., G. MORGAN y C.M. GONZÁLEZ-LEÓN. 1997. *Rhynchotherium* (Mammalia, Proboscidea) de San José de Pimas, Sonora. *Geología del Noroeste* 2: 7-8.
- LUCAS, S.G. y C.M. GONZÁLEZ-LEÓN. 1996a. Dinosaurios del Cretácico Tardío del grupo Cabullona. *Geología del Noroeste* 1: 20-25.
- LUCAS, S.G. y C.M. GONZÁLEZ-LEÓN. 1996b. The Arizpe Mammoth, Pleistocene of Sonora, Mexico-Taxonomic Re-evaluation. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 13: 90-93.
- LUCAS, S.G. y C.M. GONZÁLEZ-LEÓN. 1997. *Cuvieronius* (Mammalia, Proboscidea) de Oquitoa, Sonora. *Geología del Noroeste* 2: 12-13.
- MCDOWELL, F., J. ROLDÁN-QUINTANA y R. AMAYA-MARTÍNEZ. 1997. Interrelationship of Sedimentary and Volcanic Deposits Associated with Tertiary Extension in Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 109: 1349-1360.
- MCMENAMIN, M.A.S. 1996. Ediacaran Biota from Sonora, Mexico. *Proceedings National Academy of Science* 93: 4990-4993.
- MCMENAMIN, M.A.S., ed. 2001. *Paleontology Sonora: Lipalian and Cambrian*. South Hadley, Massachusetts. Meanma Press, 192 p.
- MCMENAMIN, M.A.S., S.A. AWRAMIK y J.H. STEWART. 1983. Precambrian-Cambrian Transition Problem in Western North America. Parte II. Early Cambrian Skeletonized Fauna and Associated Fauna from Sonora, Mexico. *Geology* 11: 227-230.
- MCMENAMIN, M. y H. D'AMBROSIO. 1997. La biota Ediacara de Sonora. *Geología del Noroeste* 2: 15-16.
- MCRROBERTS, C.A. 1997. Late Triassic (Norian-Rhaetian) Bivalves from the Antimonio Formation, Northwestern Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 14: 167-177.
- MEAD, J.I., A. BAEZ, S.L. SWIFT, M.C. CARPENTER, M. HOLLENSHEAD, N.J. CZAPLEWSKI, D.W. STEADMAN, J. BRIGHT y J. ARROYO-CABRALES. 2006. Tropical Marsh and Savanna of the Late Pleistocene in Northeastern Sonora, Mexico. *The southwestern Naturalist* 51: 226-239.
- MEERT, J.G. y T.H. TORSVIK. 2003. The Making and Unmaking of a Supercontinent: Rodinia Revisited. *Tectonophysics* 375: 261-288.
- MONTANÉ-MARTÍ, J.C. 1987. El poblamiento temprano de Sonora: En: A. González-Jácome. *Orígenes del hombre americano*. Secretaría de Educación Pública, México, p. 83-116.
- MORA-ÁLVAREZ, G. y F.W. MCDOWELL. 2000. Miocene Volcanism during Late Subduction and Early Rifting in the Sierra Santa Ursula of Western Sonora, Mexico. En: H. Delgado-Granados, G. Aguirre-Díaz y J.M. Stock, eds. *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico*. Geological Society of America Special Paper 334: 123-141.
- NARBONNE, G.M. 2005. The Ediacara Biota: Neoproterozoic Origin of Animals and their Ecosystem. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33: 421-442.
- ORTLIEB, L. 1991. Quaternary Shorelines along the Northeastern Gulf of California; Geochronological Data and Neotectonic Implication. En: Pérez-Segura, E. Jacques-Ayala, C., eds. *Studies of Sonoran Geology*. Geological Society of America Special Paper 254: 95-120.
- OSKIN, M. y J. STOCK. 2003. Pacific-North America Plate Motion and Opening of the Upper Delfin Basin, Northern Gulf of California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*: 115: 1173-1190.
- PACHECO, M., A. MARTÍN-BARAJAS, W. ELDERS, J.M. ESPINOSA-CARDEÑA, J. HELENES y A. SEGURA. 2006. Stratigraphy and Structure of the Altar Basin of NW Sonora: Implications for the History of the Colorado River delta and Salton through. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 23: 1-22.
- PAGE, W.R., A.G. HARRIS, F.G. POOLE y J. REPETSKIC. 2003. Reinterpretation of the Stratigraphy and Structure of the Rancho Las Norias Area, Central Sonora, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences* 16: 523-540.
- PAZ-MORENO, F.A. 1985. Composición y origen de los basaltos (Malpais) Plio-Cuaternarios de Moctezuma, Sonora, México. Universidad de Sonora. *Boletín del Departamento de Geología* 2: 9-15.
- PAZ-MORENO, F.A., A. DEMANT, J.J. COCHEMÉ, J. DOSTAL y R. MONTIGNY. 2003. The Quaternary Moctezuma Volcanic Field: A Tholeiitic to Alkali Basaltic Episode in the Central Sonoran Basin and Ran-

- ge Province, Mexico. En: S.E. Johnson, S.R. Pater-son, J.M. Fletcher, G.H. Girty, D.L. Kimbrough y A. Martín-Barajas, eds. *Tectonic evolution of north-western Mexico and the southwestern USA*. Geological Society of America Special Paper 374: 439-455.
- PEIFFER-RANGIN, F., A. ECHÁVARRI-PÉREZ, G. SALAS-PÍZA y C. RANGIN. 1980. Sur la présence de l'Ordovicien á graptolites dans le nord-ouest de Mexique. París. *C.R. Academy of Science*, series D, 290: 13-16.
- POOLE, F.G., R. AMAYA-MARTÍNEZ y W.R. PAGE. 2000. Silurian and Devonian Carbonate-Shelf Rocks and Lower Jurassic Sequence near Rancho Placeritos, West-Central Sonora: Field Guide for Field Trip 2. IV Simposio sobre la Geología del Noroeste de México y Áreas Adyacentes (6-8 de marzo, 2000), Hermosillo, Sonora, 24 p.
- POOLE, F.G., W.J. PERRY, R.J. MADRID y R. AMAYA MARTÍNEZ. 2005. Tectonic Synthesis of the Ouachita-Marathon-Sonora Orogenic Margin of Southern Laurentia: Stratigraphic and Structural Implications for Timing of Deformational Events and Plate Tectonic Model. En T.H. Anderson, J.A. Nourse, J.W. McKee y M.B. Steiner, eds., *The Mojave-Sonora Megashear Hypothesis: Development, Assessment, and Alternatives*. Geological Society of America Special Paper 393: 543-596.
- RAISZ, E. 1964. The Landforms of Mexico. Office of Naval Research Geography Branch, Cambridge, Ma., 2a. ed., escala 1:4 000 000.
- RANGIN, C. 1986. Contribution a l'étude géologique du system Cordilléraín Mésozoïque du nord-ouest du Mexique. Société Géologique France. *Mémoire 148*: 136 p.
- REID, J. y S. WHITTLESEY. 1997. *The Archaeology of Ancient Arizona*. The University of Arizona Press, 297 p.
- ROLDÁN QUINTANA, J. 1991. Geology and Geochemical Composition of the Jaralito and Aconchi Batholiths in East-Central Sonora, Mexico. En: E. Pérez-Segura y C. Jacques-Ayala, eds. *Studies of Sonoran Geology*. Geological Society of America Special Paper 254: 69-80.
- SÁNCHEZ, M.G. 2001. A Synopsis of Paleo-Indian Archaeology in Mexico. *Kiva* 67: 119-136.
- SCOTSESE, C.R. 2002. Paleomap Project (<http://www.scotese.com/earth.htm>).
- SHAW, C.A., F.W. CROXEN III y D.R. SUSSMAN. 2005. El Golfo de Santa Clara, Sonora, México. Society of Vertebrate Paleontology 65th Annual Meeting, Field Guide, núm. 5, 35 p.
- SHAW, C.A. y H.G. McDONALD. 1987. First Record of Giant Anteater (*Xenarthra*, Myrmecophagidae) in North America. *Science* 238: 186-188.
- SOUR-TOVAR, F., J.W. HAGADORN y T. HUITRÓN-RUBIO. 2007. Ediacara and Cambrian Index Fossils from Sonora, Mexico. *Paleontology* 50, parte 1: 169-175.
- STANLEY, G.D., C.M. GONZÁLEZ-LEÓN, M.R. SANDY, B. SENOWBARI-DARYAN, P. DOYLE, M. TAMURA y D.H. ERWIN. 1994. Upper Triassic Invertebrates from the Antimonio Formation, Sonora, Mexico. *Journal of Paleontology Memoir* 36, 4: 33 p.
- STEWART, J.H., M.A.S. McMENAMIN y J.M. MORALES-RAMÍREZ. 1984. Upper Proterozoic and Cambrian Rocks in the Caborca Region, Sonora, Mexico. Physical Stratigraphy, Biostratigraphy, Paleocurrent Studies, and Regional Relations. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1309, 36 p.
- STEWART, J.H., R. AMAYA-MARTÍNEZ y A.R. PALMER. 2002. Neoproterozoic and Cambrian Strata of Sonora, Mexico: Rodinian Supercontinent to Laurentian Cordilleran Margin. En A. Barth, ed., *Contribution to Crustal Evolution of the Southwestern United States*. Geological Society of America Special Paper 365: 5-48.
- STEWART, J.H. y J. ROLDÁN-QUINTANA. 1994. Map Showing Late Cenozoic Extensional Tilt Patterns and Associated Structures in Sonora and Adjacent Areas, Mexico: *U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF 2238*.
- SUTER, M. 2001. The Historical Seismicity of Northeastern Sonora and Northwestern Chihuahua, Mexico (28-32°N, 106-111°W) *Journal of South American Earth Sciences* 14: 521-532.
- SUTER, M. 2006. Contemporary Studies of the 3 May 1887 Mw 7.5 Sonora, Mexico (Basin and Range Province) Earthquake. *Seismological Research Letters* 77, 2: 134-147.
- SUTER, M. 2007. The First Geologic Map of Sonora. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, t. LIX, 1: 1-7.
- SUTER, M. y J. CONTRERAS. 2002. Active Tectonics of Northeastern Sonora, Mexico (Southern Basin and Range Province) and the 3 May 1887 Mw=7.4 Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* 92: 581-589.
- TALIAFERRO, N.L. 1933. An Occurrence of Upper Cretaceous Sediments in Northern Sonora, Mexico. *Journal of Geology* 41: 12-37.
- TAYLOR, D.G., J. GUEx y M. RAKUS. 2001. Hettangian and Sinemurian Ammonoid Zonation for the West-

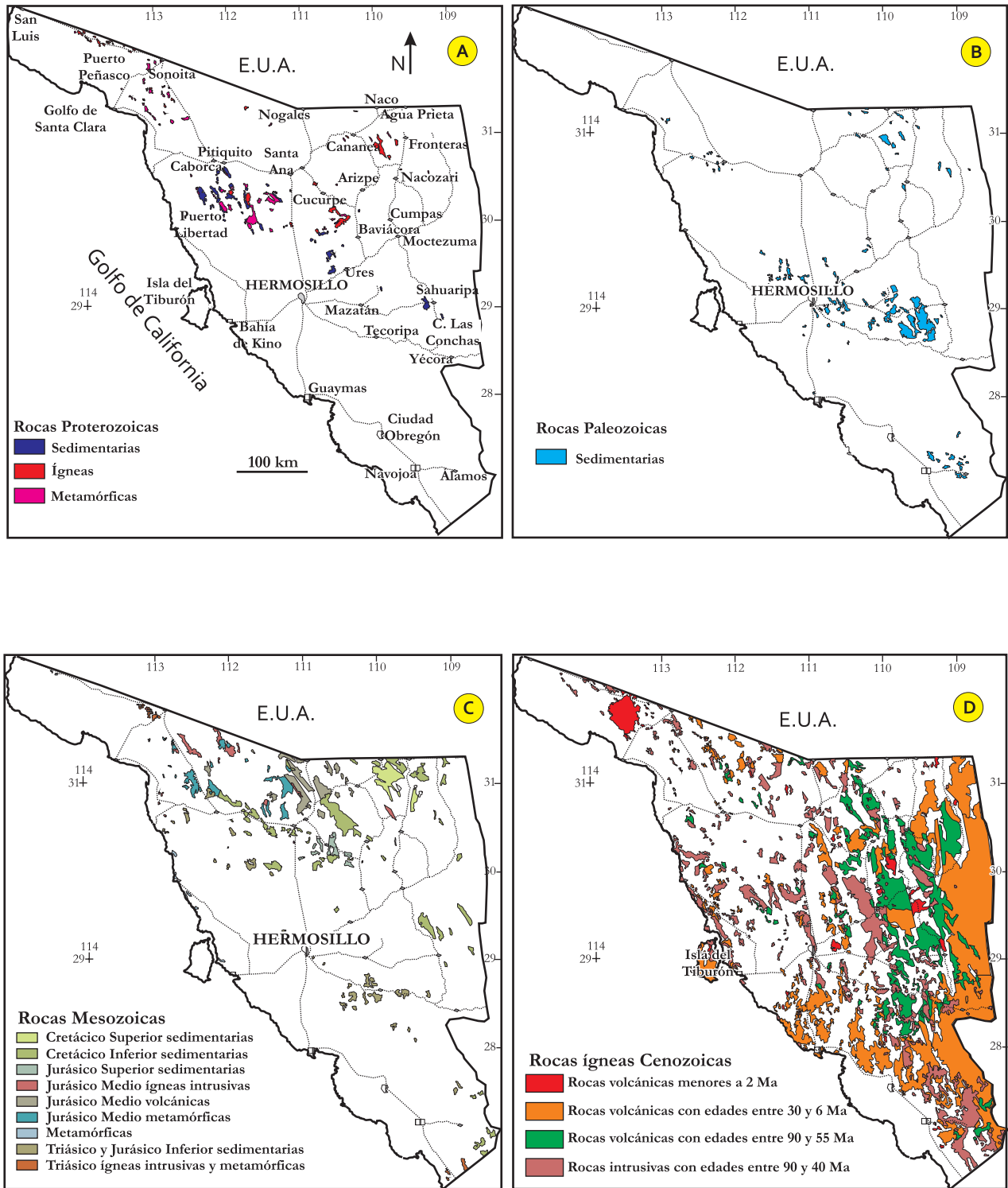
- ern Cordillera of North America. *Bulletin de Géologie Lausanne*: 350: 381-421.
- VALENCIA-MORENO, M., A. IRIONDO y C.M. GONZÁLEZ-LEÓN. 2006a. Temporal Constraints on the Eastward Migration of the Late Cretaceous-Early Tertiary Magmatic arc of NW Mexico Based on New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Hornblende Geochronology of Granitic Rocks: *Journal of South American Earth Sciences* 22: 22-38.
- VALENCIA-MORENO, M., L. OCHOA-LANDÍN, B. NOGUEZ-ALCÁNTARA, J. RUIZ y E. PÉREZ-SEGURA. 2006b. Características metalogénicas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, t. LVIII, 1: 1-26.
- VALENTINE, W.G. 1936. Geology of the Cananea Mountains, Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 47: 53-86.
- VAN DEVENDER, T.R., A. M. REA y M.L. SMITH. 1985. The Sangamon Interglacial Vertebrate Fauna from Rancho la Brisca, Sonora, Mexico. *Transactions of the San Diego Society of Natural History* 21: 23-55.
- VEGA-GRANILLO, R. y E. ARAUX-SÁNCHEZ. 1987. Estratigrafía del Paleozoico en el área del rancho Las Norias, Sonora Central. Universidad de Sonora. *Boletín del Departamento de Geología* 4: 41-50.
- VILLASEÑOR, A.B., C.M. GONZÁLEZ-LEÓN, T.F. LAWTON y M. ABERHAN. 2005. Upper Jurassic Ammonites and Bivalves from the Cucurpe Formation, Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 22: 65-87.
- WEBER, R. 1995. A New Species of *Scoresbya* Harris and *Sonoraphyllum* gen. nov. (Plantae *Incertae sedis*) from the Late Triassic of Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 12: 68-93.
- WEBER, R. 1997. How Old is the Triassic Flora of Sonora and Tamaulipas and News on Leonardian Floras in Puebla and Hidalgo, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 14: 225-243.
- WEBER, R., A. ZAMBRANO-GARCÍA y F. AMOZURRUTIA-SILVA. 1980. Nuevas contribuciones al conocimiento de la tafoflora de la formación Santa Clara (Triásico Tardío) de Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista* 4: 125-137.
- WEBER, R., S. CEVALLOS-FERRIZ, A. LÓPEZ-CORTÉS, A. OLEA-FRANCO y S. SINGER-SOCHET. 1979. Los estromatolitos del Precámbrico Tardío de los alrededores de Caborca, Estado de Sonora. Parte I. Reconstrucción de *Jacutophyton* Shapovalova e interpretación paleoecológica preliminar. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. *Revista* 3: 9-24.
- WEBER, R. y G. ZAMUDIO-VARELA. 1995. *Laurozamites*, a New Genus and Species of Bennettitalean Leaves from the Late Triassic of North America. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 12: 68-93.
- WEBER, R. y S. CEVALLOS-FERRIZ. 1980. El significado bioestratigráfico de los estromatolitos del Precámbrico sedimentario de la región de Caborca, Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. *Revista* 4: 104-110.
- WILSON, I.F. y V.S. ROCHA. 1949. Coal Deposits of the Santa Clara District Near Tonichi, Sonora, Mexico. *United States Geological Survey Bulletin* 962-A: 1-80.
- WINKER, C.D. y S. KIDWELL. 1986. Paleocurrent Evidence for Lateral Displacement of the Pliocene Colorado River Delta by the San Andreas Fault System, Southeastern California. *Geology* 14: 788-791.
- ZHAO, G., M. SUN, S.A. WILDE y Z. LI. 2004. A Paleoproterozoic Supercontinent: Assembly, Growth and Breakup. *Earth-Science Reviews* 67: 91-123.



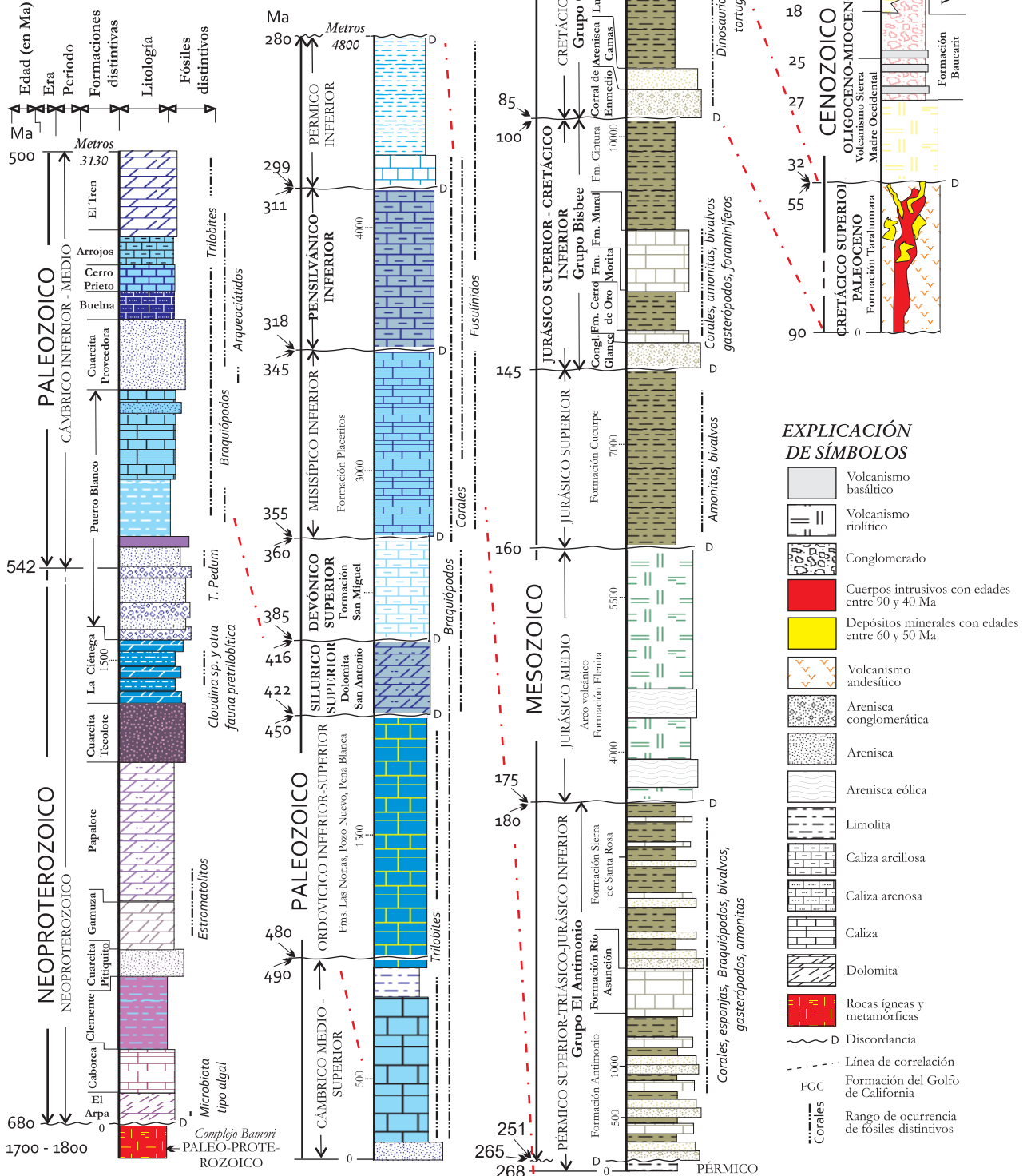


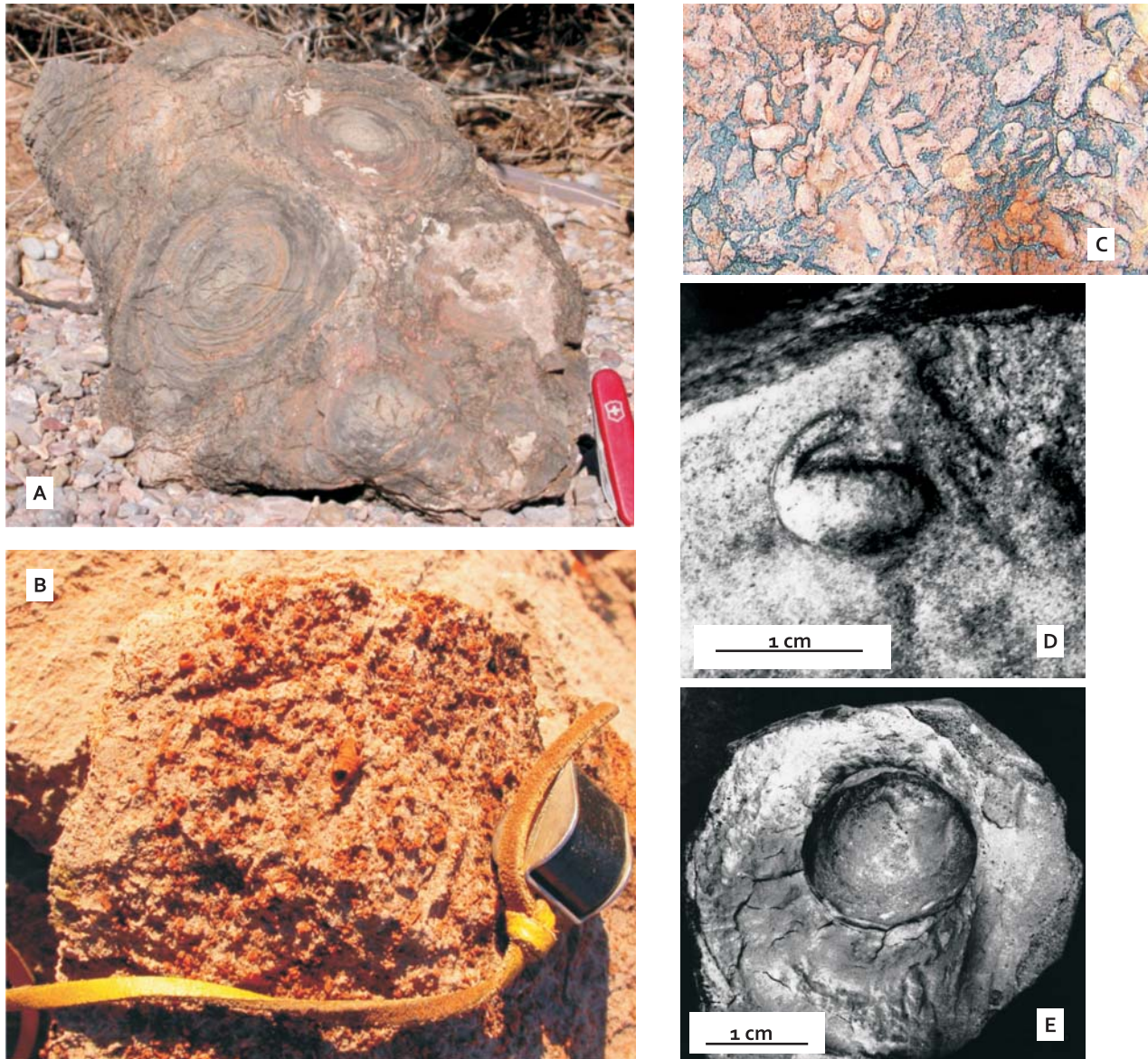
**Figura 1.** Mapas paleogeográficos que muestran el movimiento y configuración de las masas continentales, así como la ubicación de Sonora durante diferentes épocas de la historia de la Tierra. **A)** Supercontinente Columbia entre los aproximadamente 1800 y 1300 Ma (de acuerdo a Zhao *et al.*, 2004). **B)** Supercontinente Rodinia hacia aproximadamente 1100 Ma (de acuerdo a Meert y Torsvik, 2003). **C)** Configuración continental hacia finales de la Era Neoproterozoica y principios de la Paleozoica. **D)** Diferenciación de los supercontinentes Laurentia y Gondwana a principios de la Era Paleozoica (C y D, según Hoffman, 1991). **E)** El supercontinente Pangea a principios del Período Jurásico en la Era Mesozoica y, **F)** su disgregación en el Jurásico Tardío que dio origen a los nuevos supercontinentes Laurentia y Gondwana (E y F, según Scotese, 2002).





**Figura 2.** Mapas geológicos que muestran las rocas de los diferentes Eras y Períodos que afloran en Sonora. **A)** Distribución de las rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias del Proterozoico. **B)** Distribución de las rocas Paleozoicas. **C)** Distribución de las rocas metamórficas, volcánicas, ígneas intrusivas y sedimentarias del Mesozoico. **D)** Distribución de las rocas ígneas intrusivas y volcánicas del Cretácico Superior y Cenozoico. Las figuras no muestran las rocas sedimentarias Cenozoicas de edad Mioceno al Cuaternario que forman el relleno de los valles de Sonora (Geología tomada de González-León *et al.*, 2006. Se muestran localidades mencionadas en el texto).

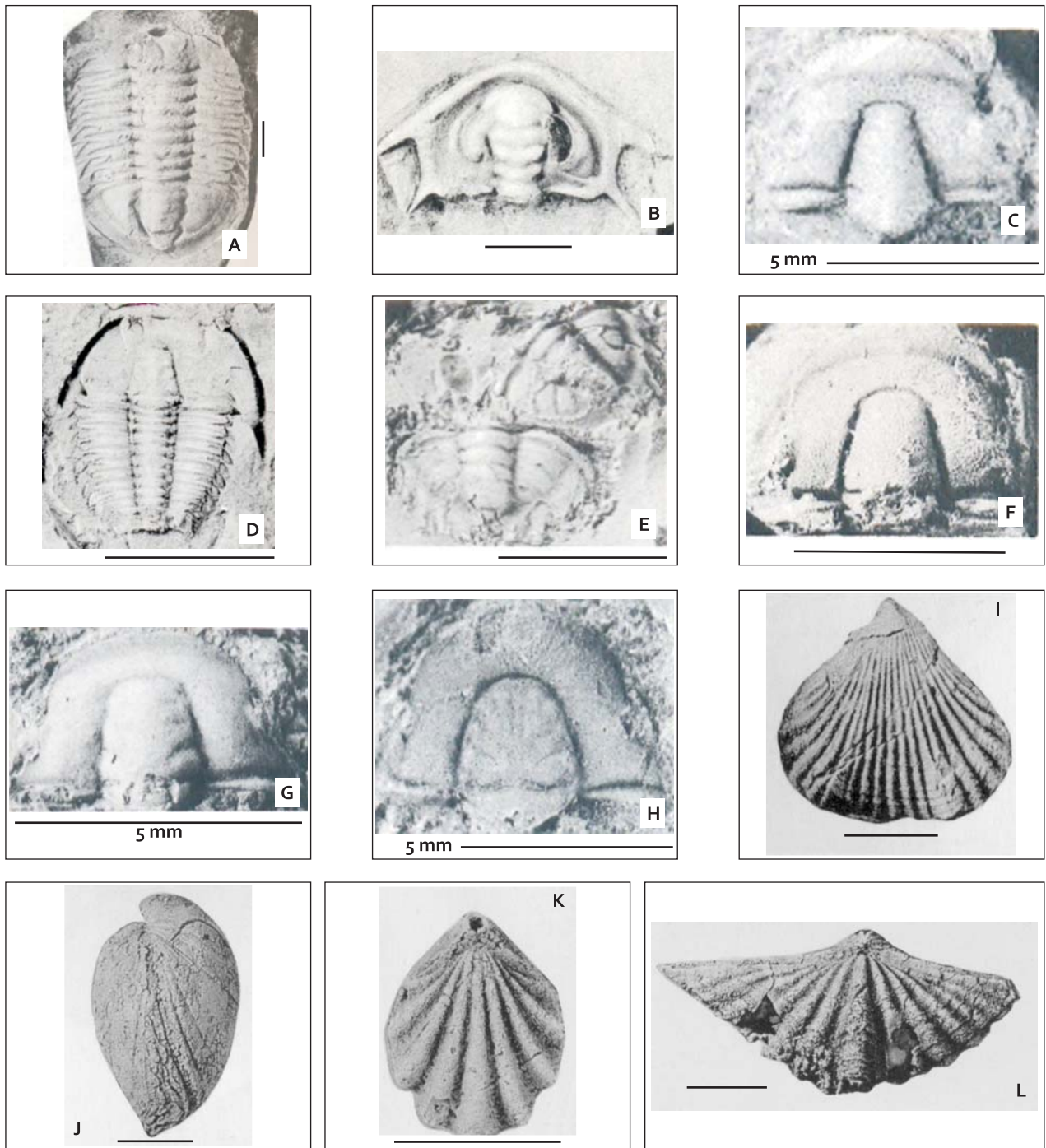




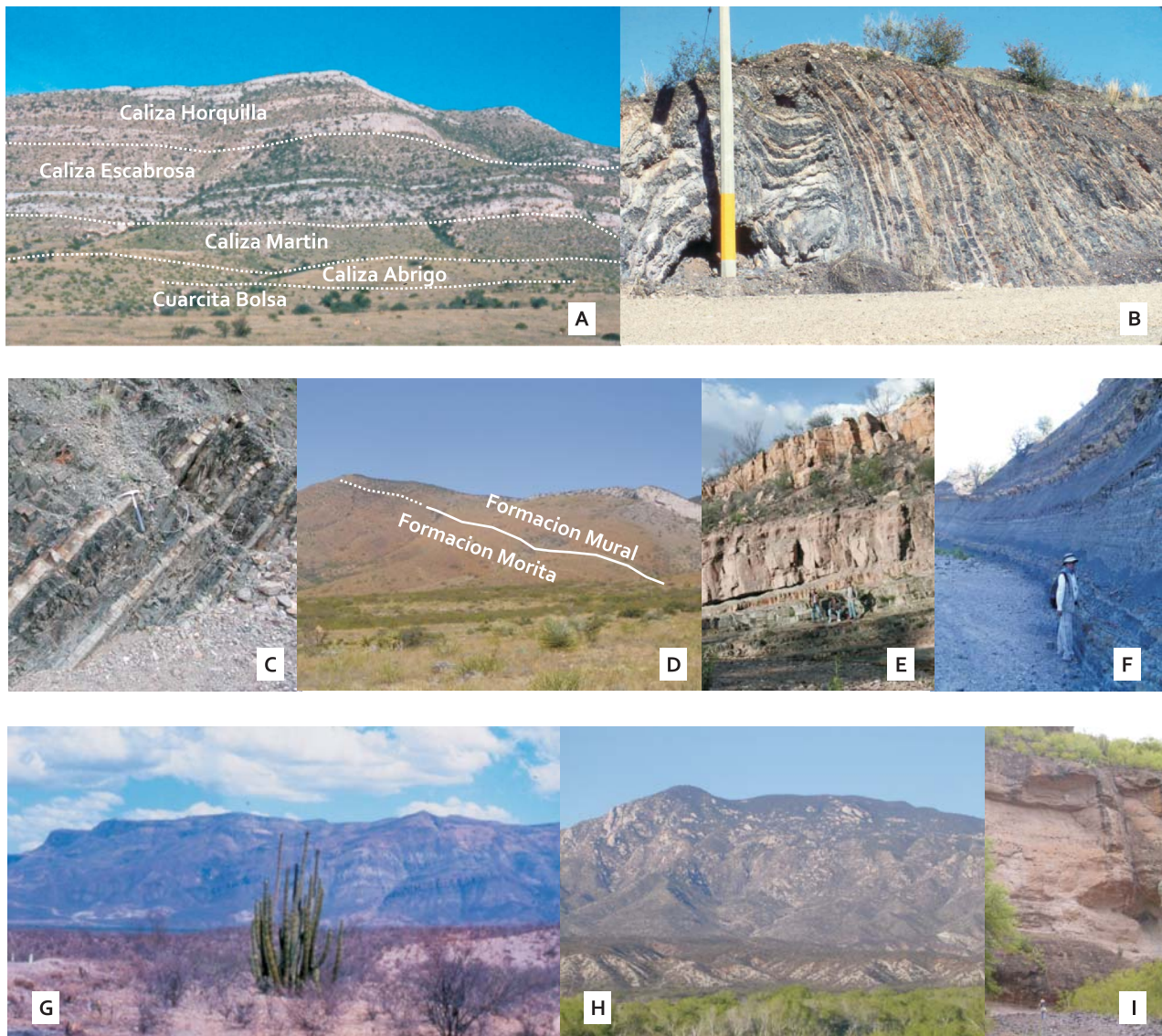
**Figura 4.** Fósiles marinos de las rocas Neoproterozoicas de Sonora. **A)** Estromatolitos del género *Conophyton*(?) de la Formación Gamuza de los cerros al sur de Pitiquito, Sonora. **B)** Tubos del fósil *Cloudina* sp. Grant 1990 en capas de dolomita arenosa de la Formación La Ciénega, en los cerros La Ciénega (localizados al sur de Pitiquito). **C)** Fósil *Treptichnus pedum* Jensen y Grant 1992 que marca el inicio del Cámbrico y que ocurre en la Formación Puerto Blanco, en cerros La Ciénega (el tamaño de esta muestra es aproximadamente de dos centímetros de largo). **D)** *Sekwia* Hofmann 1981 de la Formación Clemente en Cerros Rajón, sur de Pitiquito, Sonora. **E)** *Evandavia aureola* McMenamin 2001 (Fotos A y B cortesía del Dr. James W. Hagadorn, Ahmrest College, MA. Fotografía «C» cortesía del Dr. Francisco Sour Tovar, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Fotos D y E cortesía del Dr. Mark McMenamin, Mount Holyoke College, Massachussets).

**Figura 3 (página anterior).** Columna estratigráfica representativa que indica la edad, formaciones distintivas y espesor máximo de las rocas que componen la corteza continental de Sonora. Indica las rocas del Paleoproterozoico (1 700-1 800 Ma) al Reciente e incluye a las metamórficas, ígneas intrusivas, volcánicas y sedimentarias. No se incluyen las rocas Neoproterozoicas de los grupos Las Víboras, El Águila y Las Bolas que, en conjunto, tienen un espesor de ~5.6 km. Es una columna compuesta que también muestra algunos de los principales grupos fósiles de organismos que vivieron en cada uno de los períodos geológicos, los eventos de mineralización y la formación del Golfo de California (FGC). En este trabajo se usa la escala del tiempo geológico de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS, 2006).



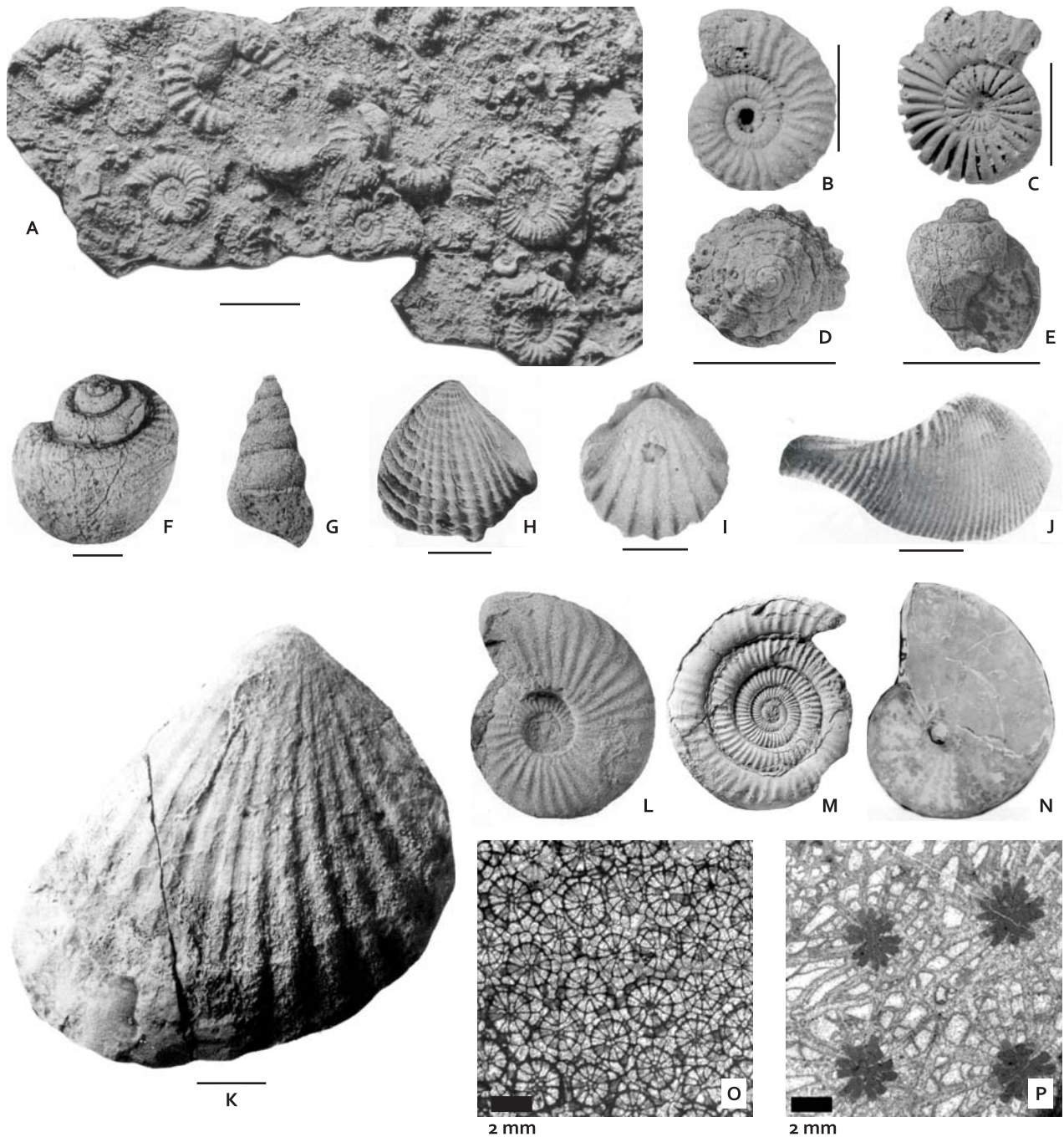


**Figura 5.** Trilobites y braquiópodos de las rocas paleozoicas de Sonora. A-H, Trilobites cámbricos de los cerros Proveedora, Caborca (tomadas de Lochman, 1952): **A)** *Sonoraspis torresi* (Stoyanow) Lochman, 1952. **B)** Vista dorsal de un cefalón de *Wanzeria mexicana prima* Lochman 1952. **C)** Cranidio de *Sombrella mexicana* Lochman 1952. **D)** Cefalón y tórax casi completos de *Inglefieldia imperfecta* Lochman 1952. **E)** Vista dorsal de dos pigidios de *Kootenia exilaxata* Deiss 1939. **F)** Vista dorsal del cranidio de *Alokistocarella mexicana* Lochman 1952. **G)** Vista dorsal de cranidio de *Arellanella caborcana* Lochman 1952. **H)** Cranidio de *Mexicella mexicana* Lochman 1952. I-L, braquiópodos pérmicos de la Formación Monos, parte norte de la Sierra del Álamo, Caborca (tomados de Cooper, 1952): **I)** *Uncinunellina? pulcra* Cooper 1953. **J)** *Composita grandis* Cooper 1953. **K)** *Hustedia meekana* Shumard 1909. **L)** *Spiriferellina sonorensis* Cooper 1953. Las barras de escala son de 1 cm de largo, excepto donde se indica otra medida. Fotos cortesía del Smithsonian Institution (enero 8 de 2009).



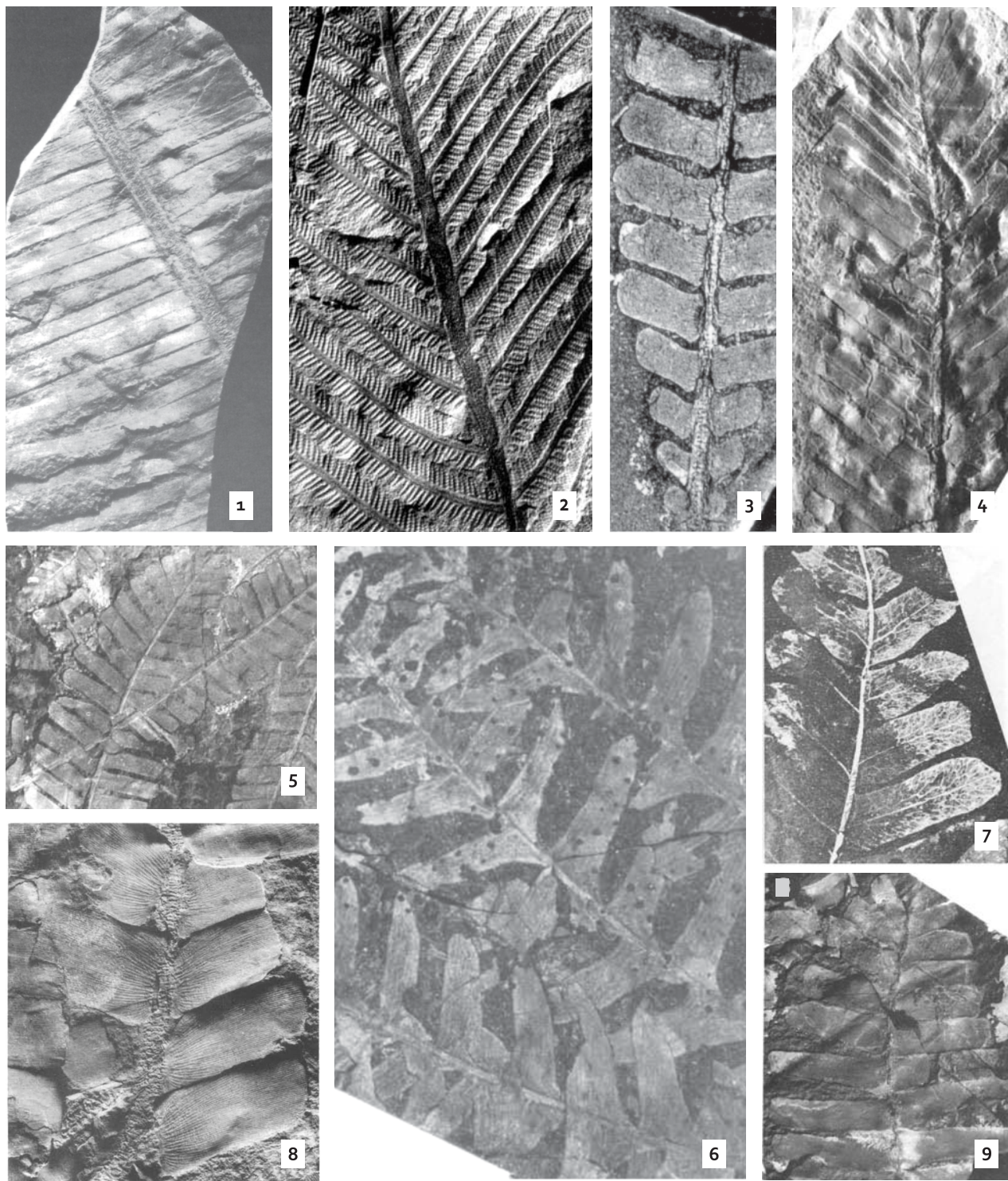
**Figura 6.** Afloramientos de rocas. **A)** Secuencia de rocas Paleozoicas del cerro Caloso de la sierra del Tule (25 km al norte de Cananea), noreste de Sonora. Afloran las formaciones Cuarcita Bolsa y Caliza Abrigo del Cámbrico, la Caliza Martin del Devónico, la Caliza Escabrosa del Misisípico y la Caliza Horquilla del Pensilvánico. **B)** Lutitas, limolitas y pedernal con barita de las rocas sedimentarias de cuenca marina profunda de la formación El Yaqui, centro de Sonora (localidad de mina Barita de Sonora; fotografía cortesía del Dr. F.G. Poole). **C)** Secuencia de lutitas y areniscas formadas en mar profundo de la Formación Cucurpe (Jurásico Superior) en el rancho San Francisco del Rincón, región de Cucurpe. **D)** Formaciones Morita y Mural inclinadas hacia el norte en la Sierra San José, Naco. **E)** Capas de arenisca y limolita de origen fluvial de la formación Arenisca Camas del Grupo Cabullona, región de Naco-Cananea. **F)** Lutitas negras de origen lacustre de la formación Lutita Packard (Grupo Cabullona, Cretácico Tardío) en la región de Naco-Cananea. **G)** Gruesa secuencia de rocas volcánicas del Oligoceno que forman la parte inferior de la Sierra Madre Occidental al oriente de Huásabas (fotografía cortesía del Dr. Jaime Roldán Quintana, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México). **H)** Intrusivo granítico del Paleoceno (Cenozoico temprano) que forma la sierra de Aconchi al poniente del poblado de ese mismo nombre. **I)** Conglomerados y areniscas de la formación Báucarit en el arroyo El Toro Muerto, valle del río Sonora en Arizpe.



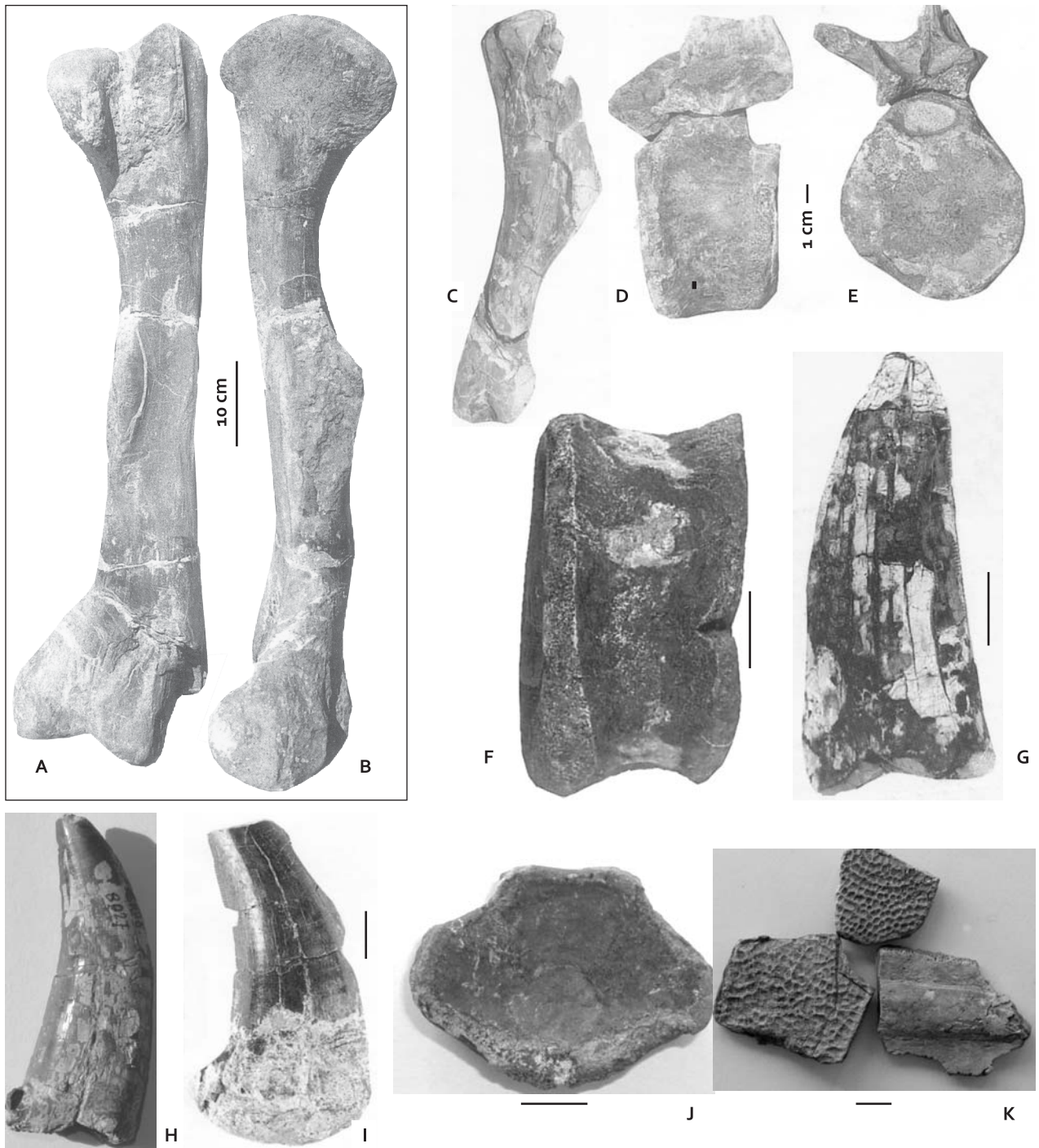


**Figura 7.** Fósiles marinos Mesozoicos de Sonora. A-K fósiles del Triásico Tardío de las formaciones Antimonio y Río Asunción, sierra del Álamo (localizada a 45 km al poniente de Caborca): **A)** Muestra de roca con amonitas de los géneros *Traskites*, *Clionites* y *Simpolycyclus*. **B y C)** Amonitas *Clionites fairbanksi* Hyatt y Smith 1905 y *Simpolycyclus nodifer* Hyatt y Smith 1905, respectivamente (A-C, tomadas de Estep *et al.*, 1997). **D-G,** gasterópodos: **D)** *Eucycloscala subbisertus* Münster 1841. **E y F)** *Omphalotychia* sp. **G)** *Promathilda* sp. **H-K,** bivalvos: **H)** *Myophorogonia salasi* Alencáster 1961, **I)** *Propeamussium* cf. *Schafhaeutli*. **J)** *Xiaoschuiculana tozeri*. **K)** *Mysidioptera mexicana* (D-H, tomados de Stanley *et al.*, 1994, con permiso de The Paleontological Society; I-J, tomados de McRoberts, 1997; K, tomado de Damborenea y González-León, 1997); L-M, amonitas jurásicas de la Formación Sierra de Santa Rosa, Sierra del Álamo, tomadas de Taylor *et al.*, 2001: **L)** *Badouxia mexicana* Taylor, Guex y Rakus 2001 (diámetro 4.9 cm). **M)** *Epophioceras wendelli* Taylor, Guex y Rakus 2001 (diámetro 11.44 cm). **N)** Amonita del Cretácico Inferior, Cerro Las Conchas, *Engonoceras* sp. (6 cm de diámetro). **O y P),** microfotografía de corales coloniales *Keriophyllia roniewiczze* y *Preverastrea* sp., respectivamente (cortesía del Dr. Hannes Löser). Las barras de escala miden un centímetro de largo, excepto en O y P.



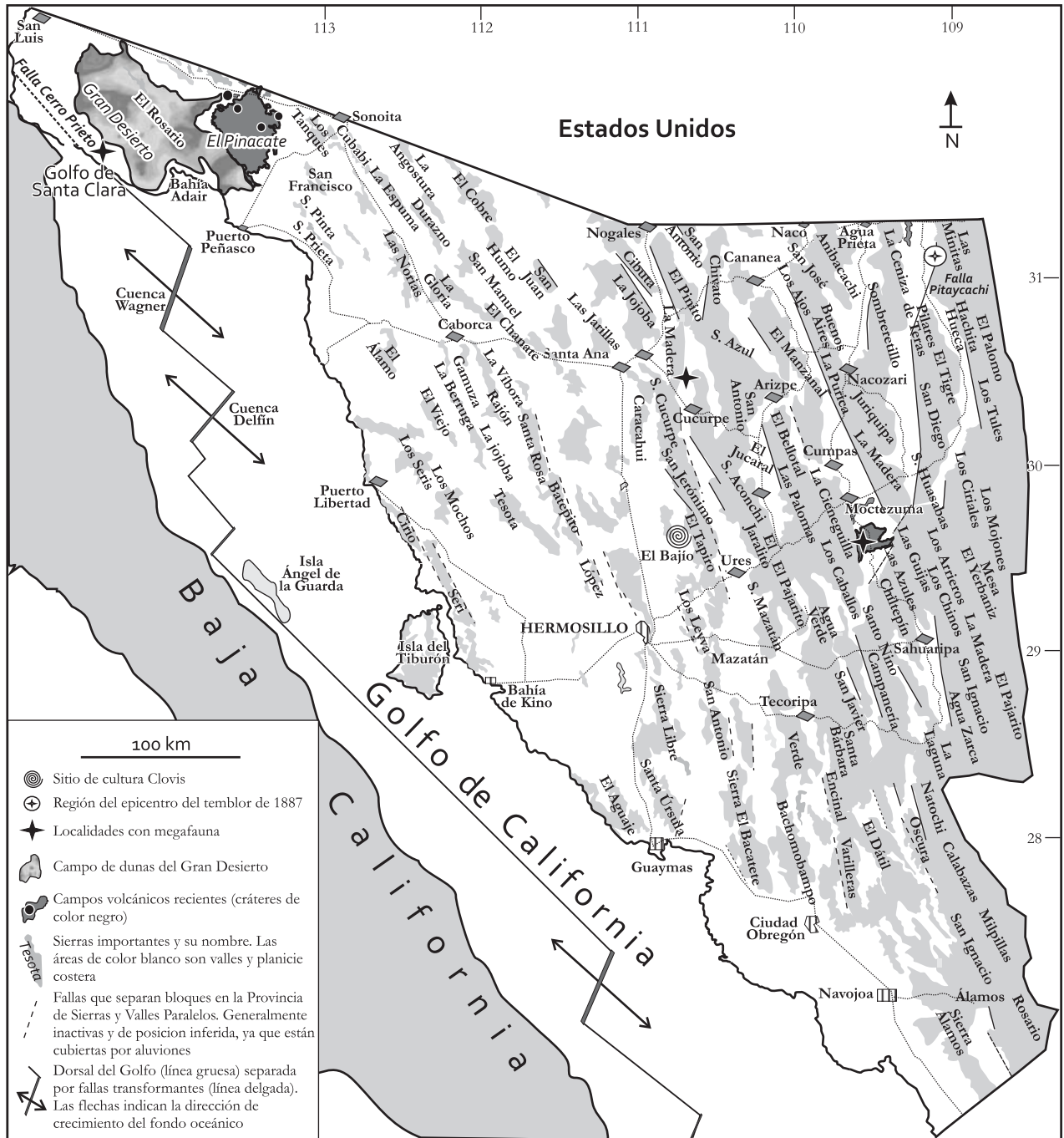


**Figura 8.** Plantas fósiles de la Formación Santa Clara del Grupo Barranca (Triásico Superior), centro de Sonora. **1)** *Ctenophyllum braunianum* Weber 1997. **2)** *Asterothea santaclarae* Weber 1997. **3)** *Laurozamites* ex. gr. *fragilis* (Newberry) Weber y Zamudio-Varela, 1995. **4)** *Laurozamites pima* Weber y Zamudio-Varela 1995. **5)** *Laurozamites fragilis* (Newberry) Weber y Zamudio-Varela, 1995. **6)** *Scoresbya pinnata* Weber 1995. **7)** *Cynepteris* Ash 1970. **8 y 9)** *Laurozamites yaqui* Weber y Zamudio-Varela 1995 (ilustraciones tomadas de Weber, 1995, 1997; Weber *et al.*, 1980 y de Weber y Zamudio-Varela, 1995. Los especímenes se muestran a su tamaño natural aproximado).



**Figura 9.** Vertebrados fósiles del Cretácico Tardío del Grupo Cabullona (véase figura 3). **A)** Vista media de fémur izquierdo de dinosaurio hadrosaurio de la formación Corral de Enmedio. **B)** Vista posterior del mismo ejemplar (tomado de Lucas y González-León, 1996a). **C)** Húmero izquierdo de hadrosaurio de la formación Arenisca Camas. **D** y **E**, parte central de una vértebra de hadrosaurio de la Formación Lomas Coloradas; **D)** vista lateral y **E)** vista posterior. **F)** Parte central de vértebra de dinosaurio ceratópido de la formación Lomas Coloradas (vista lateral). **G-I)** Dientes de carnosauros de las formaciones Corral de Enmedio (**H**) y Lomas Coloradas (**G-I**). **J)** Vértebra de pez de la formación Corral de Enmedio. **K)** Fragmentos de caparazón de tortuga de la formación Corral de Enmedio. Las barras de escala miden 1 cm de largo, excepto en figura A.



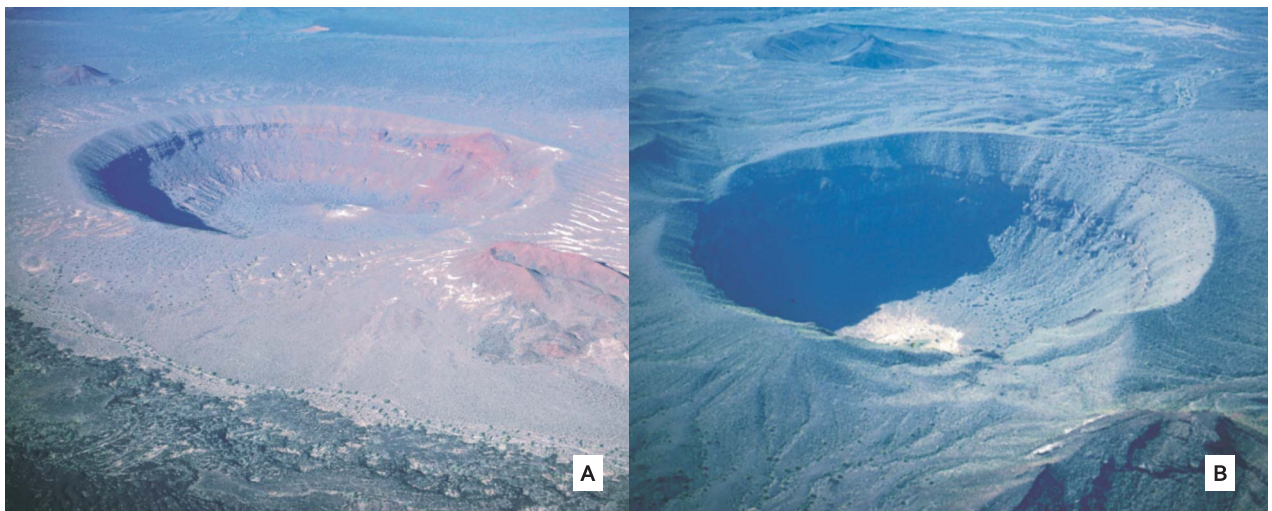


**Figura 10.** Mapa de Sonora mostrando las principales sierras y valles con sus nombres, los campos con volcanismo reciente, las fallas Pitáyachi y Cerro Prieto, el campo de dunas de arena del Gran Desierto, las localidades más importantes con megafauna del Pleistoceno, las fallas (inferidas con raya discontinua) que produjeron la Provincia de Sierras y Valles paralelos, la dorsal y fallas transformantes asociadas que ocurren en el fondo del Golfo de California y los asentamientos clovis importantes.



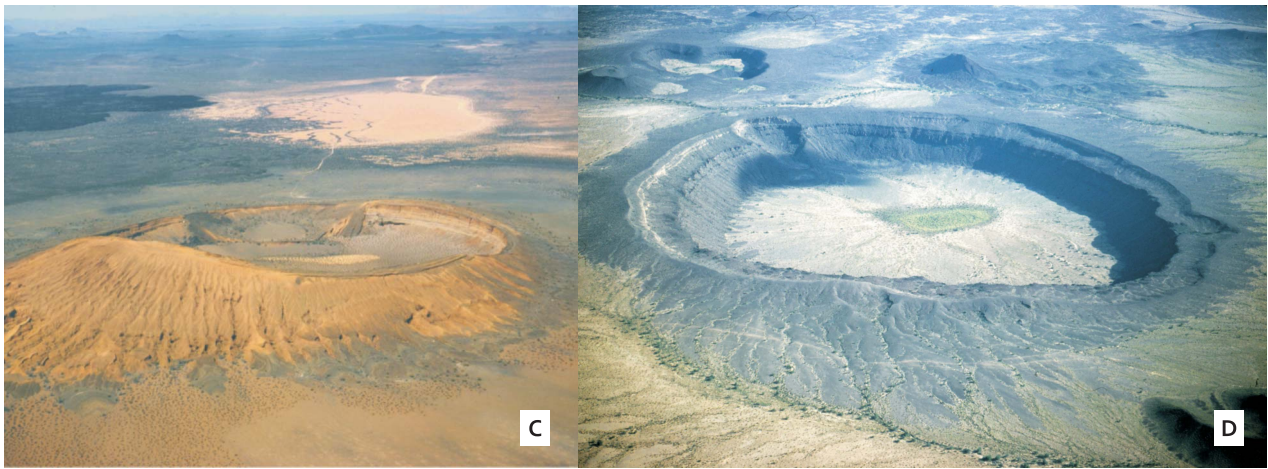


**Figura 11.** A) Terraza marina de ~100 000 años con elevación de aproximadamente 5 m sobre el nivel marino actual en Punta Chueca. B) Detalle de las conchas de bivalvos y gasterópodos bien preservados que componen dicha terraza. C) Imagen tomada de Google Earth; cubre la parte noroccidental del Gran Desierto donde se observan las dunas de formas crecienta orientadas longitudinalmente en dirección noroeste-sureste; en el noreste de la fotografía se observa la sierra Rosario (para localización de esta área véase figura 10).

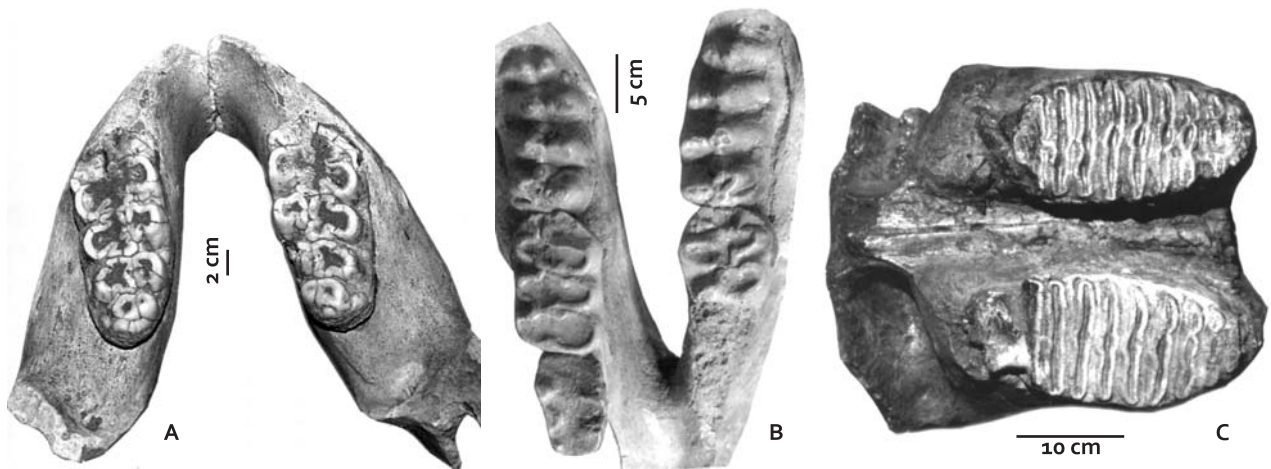


**Figura 12.** Cráteres más importantes del campo volcánico El Pinacate. A) Cráter Elegante, mide 1 600 m de diámetro y 244 de profundidad. B) Cráter Sykes, mide 1 km de diámetro y 177 m de profundidad.

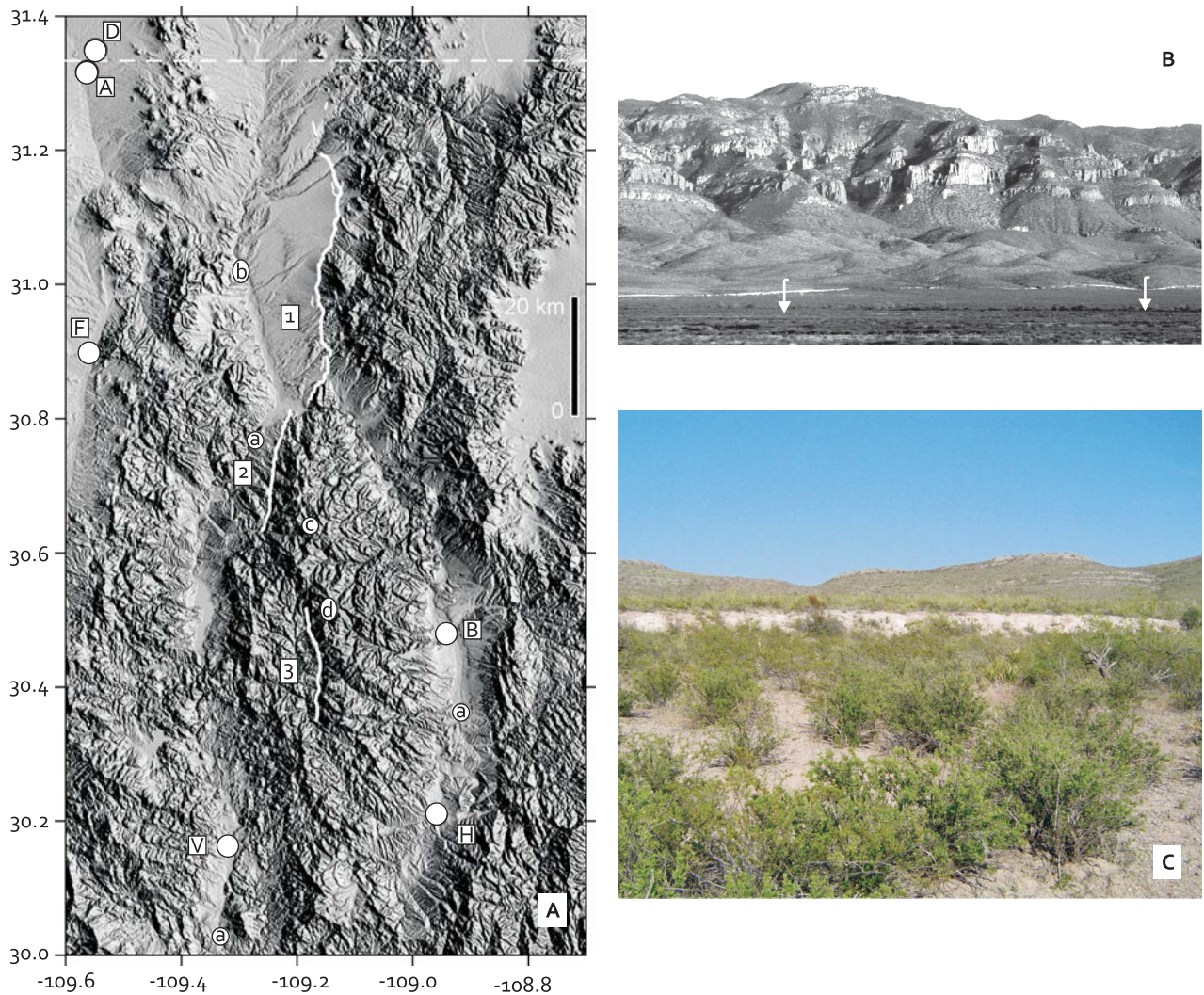




**Figura 12 (concluye).** C) Cráter Colorado y al fondo una colada de lava. D) Cráter McDougal, tiene ~1 600 m de diámetro y 130 de profundidad; al fondo se observa el cráter Molina (fotos cortesía del Dr. Jim Gutman, Wesleyan University, Connecticut).



**Figura 13.** Proboscidos fósiles de Sonora. **A)** Mandíbula inferior de *Cuvieronius* sp. de la región de Oquitoa, Sonora (tomada de Lucas y González-León, 1997). Espécimen en exhibición en el Museo de la Universidad de Sonora. *Cuvieronius* fue el proboscido más común durante el Pleistoceno en Norteamérica. **B)** Mandíbula inferior del proboscido *Rhynchotherium browni* (Osborn, 1936) (tomada de Lucas *et al.*, 1997) del Plioceno de San José de Pimas, descubierto en 1911 por Barnum Brown y actualmente resguardado en el Museo de Historia Natural de Nueva York con el número de colección AMNH15550. *Rhynchotherium* fue un proboscido común en Norteamérica durante el Mioceno tardío y el Plioceno tardío, entre ~7 y 2.2 Ma. **C)** Mandíbula superior (paladar) con dentadura de *Mammuthus imperator* Leidy 1858 (tomada de Lucas y González-León, 1996b). Los mamuts emigraron de Asia a Norteamérica entre 1.8 a 1.6 Ma. Ejemplar encontrado en 1929 en la región de Arizpe y actualmente resguardado en el Museo de Historia Natural de Nueva York.



**Figura 14.** Falla Pitáycachi, también llamada falla Batepito. **A)** Modelo de elevación digital de la parte noreste de Sonora que muestra la traza (línea blanca) de la ruptura de la falla Pitáycachi que causó el temblor de 1887; 1, segmento de la falla Pitáycachi y su continuación con 2, el segmento de la falla Teras; 3, segmento de la falla Otates. A: Agua Prieta, B: Bavispe, D: Douglas, F: Fronteras, H: Huachineras, V: Villa Hidalgo; a: Río Bavispe, b: Río San Bernardino fluyendo hacia el sur a lo largo del valle del mismo nombre, c: Sierra El Tigre, d: Sierra Pilares de Teras; la línea discontinua indica el límite entre México y Estados Unidos. (fotografía cortesía del Dr. Max Suter, modificada de Suter y Contreras, 2002). **B)** Superficie de ruptura de la falla Pitáycachi (de color blanco indicada por la flecha) ubicada en el margen oriental del valle San Bernardino (fotografía tomada desde el valle, viendo hacia el oriente). La sierra al fondo expone las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental en posición horizontal y los cañones El Capadero (izquierda) y Pitáycachi (derecha) (fotografía cortesía del Dr. Max Suter). **C)** Detalle del escarpe o salto de la falla Pitáycachi (de aproximadamente 4 m de alto) en localidad ubicada a 1 km al sur del rancho El Álamo. Al fondo se observan calizas de la Formación Mural del Cretácico Inferior en el cerro Caloso.

