

Iriondo, Alexander, y Premo, W.R., 2011, Las rocas cristalinas proterozoicas de Sonora y su importancia para la reconstrucción del margen continental SW de Laurentia—La pieza mexicana del rompecabezas de Rodinia, *in* Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 2, p. 25–55, 10 figs., 2 tablas.

Capítulo 2

LAS ROCAS CRISTALINAS PROTEROZOICAS DE SONORA Y SU IMPORTANCIA PARA LA RECONSTRUCCIÓN DEL MARGEN CONTINENTAL SW DE LAURENCIA—LA PIEZA MEXICANA DEL ROMPECABEZAS DE RODINIA

Alexander Iriondo¹ y Wayne R. Premo²

RESUMEN

Una nueva etapa de estudios geocronológicos, geoquímicos e isotópicos sobre el basamento cristalino proterozoico de Sonora, realizada en los últimos años, ha permitido establecer una hipótesis sobre la distribución de las provincias corticales paleoproterozoicas Mojave, Yavapai y Mazatzal en el NW de México. Esta nueva distribución de provincias ayuda a reconstruir con mayor precisión la geología del margen SW de Laurentia y establece una nueva plantilla geológica de este margen que podrá ser utilizada por investigadores de otros márgenes continentales para poner a prueba las ideas de reconstrucción existentes para el supercontinente Rodinia.

En este trabajo, además de presentar una visión general sobre el significado y evolución de estas provincias corticales paleoproterozoicas, también se introducen algunos conceptos geológicos novedosos para la geología de Sonora, como el de la existencia de un doblez oroclinal que denominamos “doblez oroclinal Caborca”. Este doblez podría haberse formado durante el proceso de colisión (amalgamación) de arcos de islas paleoproterozoicos (Yavapai y Mazatzal) contra una zona continental preexistente (provincia Mojave). También se introduce como concepto novedoso la existencia de una zona de debilidad cortical paleoproterozoica en dirección NW-SE, asociada espacialmente a las rocas de la provincia Yavapai mexicana, que pudo haber condicionado notablemente algunos eventos geológicos desde tiempos proterozoicos hasta el Cuaternario y que permite conciliar muchos aspectos de la geología de Sonora.

Palabras clave: Proterozoico, Sonora, Laurentia, Rodinia, México

ABSTRACT

In the past few years, a new phase of geochronological, geochemical, and isotopic studies in the Proterozoic crystalline basement rocks of Sonora has permitted to establish a new hypothesis for the distribution of Paleoproterozoic crustal provinces in NW Mexico (the Mexican Mojave, Yavapai, and Mazatzal provinces). These new ideas allow for a more precise geological constraint of the SW margin of Laurentia and, at the same time, permit

¹Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Querétaro, 76230, México

²U.S. Geological Survey, MS 963, Box 25046, Denver Federal Center, Denver, Colorado 80225, EUA

generating a new geological template of this continental margin for others to use in the testing of different ideas for the reconstruction of the Rodinia supercontinent.

This study, besides presenting an overview on the Paleoproterozoic basement provinces of SW Laurentia, introduces some new concepts for the Sonoran geology, like the “Caborca oroclinal bend”, where the crustal provinces in the USA bend sharply as they enter Mexico. This oroclinal bend could have resulted from the actual collision (amalgamation) of Paleoproterozoic island arcs (Yavapai and Mazatzal) against a preexisting continental crust (Mojave province). We also introduce the concept of a thin, NW-SE oriented, Paleoproterozoic crustal weakness zone along the Yavapai rocks in Sonora that could have influenced numerous geological events that occurred in NW Mexico from Proterozoic until Quaternary times as well as allowing to reconcile many aspects of the Sonoran geology.

Key words: Proterozoic, Sonora, Laurentia, Rodinia, Mexico.

1. INTRODUCCIÓN

Rocas de la ancestral América del Norte formaron parte de un paleocontinente conocido como Laurentia. Muchos autores proponen que inicialmente Laurentia formó el núcleo de un supercontinente conocido como Rodinia (del ruso: “tierra natal”) que se ensambló entre los 1,200 y 900 Ma a partir de fragmentos de corteza continental que fueron amalgamándose progresivamente por la actividad tectónica para formar el gigantesco continente (Li et al., 2008).

Conviene aclarar que el concepto del supercontinente proterozoico Rodinia es una hipótesis de trabajo muy especulativa derivada del estudio de los márgenes continentales de Laurentia (América del Norte), Australia y Antártida, entre otros. Estos márgenes se formaron como resultado de *rifting* continental durante el Neoproterozoico-Paleozoico temprano, y muestran similitudes geológicas que han desencadenado numerosos estudios geológicos y geofísicos para determinar posibles correlaciones entre sí.

La reconstrucción de Rodinia más influyente de los últimos tiempos ha sido la hipótesis “SWEAT—Southwest U.S.-East Antarctica” (Figura 1; Moores, 1991; Hoffman, 1991; Dalziel, 1991). En este modelo, el margen continental suroccidental de Laurentia se correlaciona con la Antártida, el oeste de Canadá con Australia, y la provincia Grenville de Texas con la zona este de Antártida. Nuevos estudios geológicos en estos márgenes continentales proponen que algunas de las correlaciones previas no son adecuadas y/o únicas entre dos de los márgenes continentales, y son utilizados en

una nueva hipótesis conocida como “AUSWUS—Australia-Southwest U.S.” (Brookfield, 1993; Karlstrom et al., 1999; Burrett y Berry, 2000), en la que Australia se encuentra adyacente al SW de Laurentia antes del *rifting* neoproterozoico (Figura 1). El alto grado especulativo de estas reconstrucciones, principalmente generado por la falta de conocimiento geológico de los diferentes márgenes continentales existentes (piezas del rompecabezas), permite proponer gran diversidad de hipótesis para estas reconstrucciones, como lo indican las conexiones propuestas más recientemente entre el margen occidental de Laurentia y Siberia (Conexión Siberiana de Sears y Price, 2000) o, incluso, la conexión de este margen de Laurentia con el sur de China (Li et al., 2002) como se muestra en la Figura 1.

El margen del SW de Laurentia, formado por *rifting* continental durante el Neoproterozoico-Paleozoico temprano, es lógicamente uno de los márgenes más importantes en las reconstrucciones de Rodinia por considerarse Laurentia la parte central del supercontinente Rodinia. Cualquier esfuerzo para reconstruir este margen SW de Laurentia requiere de una caracterización precisa de la naturaleza y tiempo de vulcanismo, plutonismo, metamorfismo y deformación de las rocas proterozoicas de esta región. Esto es precisamente lo que se ha estado realizando durante los últimos 40 años en la geología del SW de Estados Unidos, caracterizando el basamento proterozoico con numerosos estudios isotópico-químicos, geocronológicos y geofísicos que conjuntamente han permitido proponer la existencia de tres provincias corticales paleoproterozoicas (Mojave, Yavapai y Mazatzal) y sus fronteras geológicas (Figura 2).

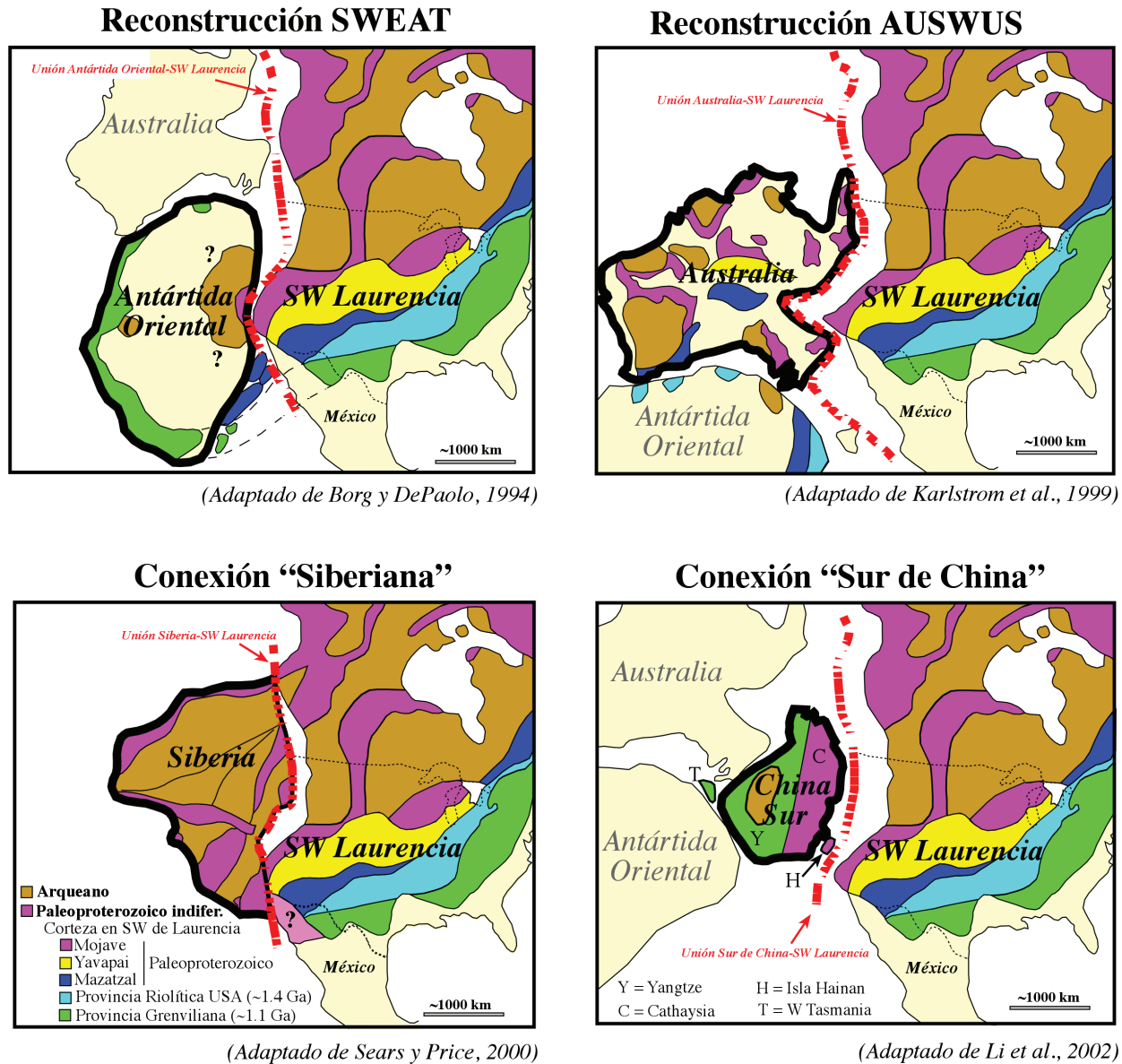


Figura 1. Reconstrucciones más influyentes del supercontinente Rodinia según diferentes autores. Las agrupaciones de provincias están basadas, entre otras características geológicas, en las edades modelo de Nd para rocas de las diferentes cortezas continentales. La morfología y distribución de provincias corticales del SW de Laurentia adaptada de Karlstrom et al. (1999).

El resultado de dicho esfuerzo ha permitido la obtención de una plantilla geológica del SW de Laurentia que se ha utilizado en las reconstrucciones anteriormente citadas para esta parte del supercontinente Rodinia (Figura 1). Una de las premisas más importantes de estas reconstrucciones de Rodinia es que el margen suroccidental de Laurentia está bien caracterizado geológicamente y que presenta una distribución muy peculiar de provincias paleoproterozoicas (Mojave,

Yavapai y Mazatzal) que sufrieron truncamiento por *rifting* continental en una dirección NW-SE, básicamente, perpendicular a la dirección estructural NE-SW del orógeno (Figura 1).

Sin embargo, esta premisa no está totalmente justificada, ya que la geología proterozoica del NW de México, en particular la de Sonora, no fue incorporada en la obtención de esta plantilla geológica (Figura 1), precisamente por la falta de conocimiento en

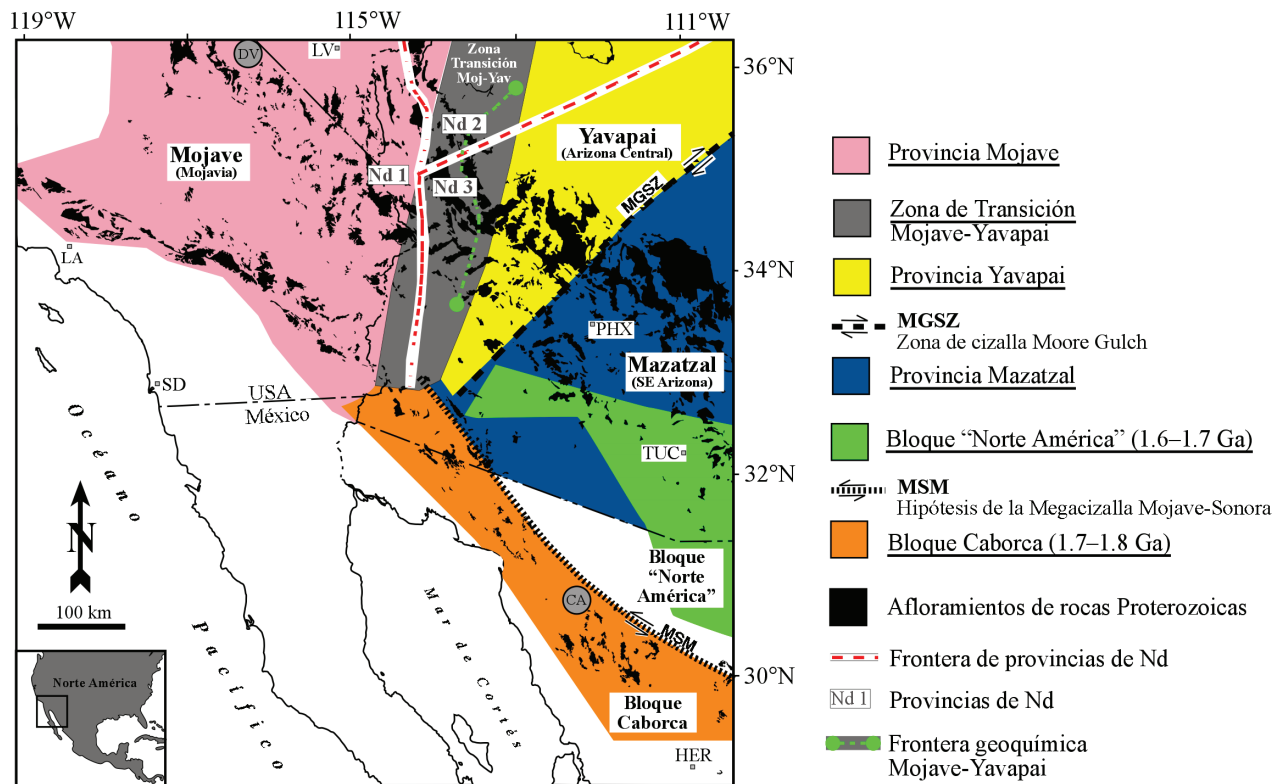


Figura 2. Distribución de las provincias (Mojave, Yavapai y Mazatzal) y bloques de basamento (Caborca y “Norteamérica”) paleoproterozoicos del SW de América del Norte (Laurencia). Ver Iriondo (2001) para explicación más detallada de las fuentes bibliográficas consultadas para crear este mapa de provincias paleoproterozoicas. La distribución de bloques de basamento en Sonora y la traza de la hipotética megacizalla Mojave-Sonora (MSM), a partir de Anderson y Silver (1981). Los círculos grises representan rocas paleozoicas de la región de Death Valley (DV) y rocas correlativas supuestamente desplazadas a lo largo de la MSM hasta la región de Caborca (CA) durante el Jurásico Tardío. Otras abreviaciones geográficas: HER—Hermosillo; LA—Los Ángeles; LV—Las Vegas; PHX—Phoenix; SD—San Diego; TUC—Tucson.

la región. Por otro lado, sí queda claro que el margen SW de Laurencia, incluyendo el NW de México, juega un papel muy importante en cualquiera de estas hipótesis de reconstrucción (Figura 1).

En este trabajo presentamos una visión general sobre el significado de las provincias paleoproterozoicas del margen SW de Laurencia (Mojave, Yavapai y Mazatzal) y el estado del conocimiento geológico del basamento proterozoico de Sonora, que incluye estudios analíticos de geocronología U-Pb, geoquímica de elementos mayores y traza e isótopos radiogénicos como trazadores. Estos avances de conocimiento en Sonora nos han permitido proponer, de forma tentativa, una nueva distribución de basamentos paleoproterozoicos para todo el margen SW de Laurencia mejorando sustancialmente el conocimiento de

nuestra pieza mexicana del rompecabezas de Rodinia. También introducimos algunos conceptos geológicos novedosos como el de la existencia de un doblez oro-clinal, que denominamos “doblezo oro-clinal Caborca”, y la existencia de una zona de debilidad cortical paleoproterozoica asociada espacialmente a las rocas de la provincia Yavapai presentes en Sonora, concepto que permite conciliar muchos aspectos de la geología del NW de México desde tiempos proterozoicos hasta el Cuaternario.

2. LA NUEVA DIVISIÓN DEL TIEMPO PRECÁMBRICO Y DEL EÓN PROTEROZOICO (IUGS)

La Subcomisión de Estratigrafía Precámbrica de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS)

acordó formalmente cambiar la subdivisión y nomenclatura del Precámbrico y su eón Proterozoico y sugirió su aplicación inmediata a nivel internacional (Plumb, 1991; Robb et al., 2004). Según la IUGS, la escala de tiempo precámbrica debe dividirse de acuerdo con la subdivisión cronométrica ilustrada en la **Figura 3**, en la que los límites temporales fueron seleccionados para delimitar los principales ciclos sedimentarios, orogénicos y de magmatismo a nivel global.

De acuerdo con este nuevo esquema, el Precámbrico debe dividirse en los eones Arqueano y Proterozoico y el límite entre ellos se establece en los 2,500 Ma. El eón Proterozoico, a su vez, se subdivide en tres eras, el Paleoproterozoico, el Mesoproterozoico y el Neoproterozoico y éstos deben de tener límites a los 2,500, 1,600, 1,000 Ma y en la base del Cámbrico, a los 542 Ma. Las subdivisiones de estas eras en diferentes periodos también se muestran en la **Figura 3**.

3. DISTRIBUCIÓN DE ROCAS PROTEROZOICAS Y SUS PROVINCIAS EN EL SW DE EUA

Éste es un apartado descriptivo sobre las rocas que forman las provincias corticales paleoproterozoicas (Estateriano; ~1.8–1.6 Ga) Mojave, Yavapai y Mazatzal del SW de Estados Unidos (**Figura 2**) y se basa en la compilación presentada por Iriondo (2001). También, se incluye una tabla sumario (Tabla 1) con algunas de las características más importantes de cada una de las antedichas provincias. Para información más actualizada sobre la geología proterozoica del SW de Estados Unidos se refiere al lector a referencias bibliográficas presentes en las revistas científicas sobre geología.

3.1 PROVINCIA MOJAVE

La provincia paleoproterozoica Mojave se encuentra al sur de Nevada, SE de California y SW de Arizo-

		EON	ERA	PERIODO	EDAD
PRECÁMBRICO (PE)	Proterozoico (PR)	Neoproterozoico (NP)		Ediacariano (NP ₃)	542 Ma
				Criogeniano (NP ₂)	630
				Tonianio (NP ₁)	850
		Mesoproterozoico (MP)		Esteniano (MP ₃)	1000 Ma
				Ectasiano (MP ₂)	1200
				Calimmiano (MP ₁)	1400
		Paleoproterozoico (PP)		Estateriano (PP ₄)	1600 Ma
				Orosiriano (PP ₃)	1800
				Riaciano (PP ₂)	2050
			Sideriano (PP ₁)	2300	
	Arqueano (AR)		Neoarqueano (NA)	2500 Ma	
			Mesoarqueano (MA)	2800 Ma	
			Paleoarqueano (PA)	3200 Ma	
			Eoarqueano (EA)	3600 Ma	
				Sin subdivisión en periodos	

Figura 3. Subdivisión cronométrica del tiempo Precámbrico y de los eones Proterozoico y Arqueano aceptada por la IUGS (Plumb, 1991; Robb et al., 2004).

Tabla 1. Características geológicas generales de rocas ígneas paleoproterozoicas de las provincias corticales del SW de América del Norte.

CARACTERÍSTICA GEOOLÓGICA	PROVINCIA MOJAVE	ZONA DE TRANSICIÓN MOJAVE-YAVAPAI	PROVINCIA YAVAPAI	PROVINCIA MAZATZAL
EDAD DE MAGMATISMO (GEOCRONOLOGÍA U-Pb ZIRCONES)				
<ul style="list-style-type: none"> • Magmatismo paleoproterozoico • Granitoides y rocas volcánicas • Magmatismo mesoproterozoico • Rocas plutónicas (granitos) • Rocas plutónicas y volcánicas 	1,809-1,635 Ma	1,740-1,620 Ma	1,840-1,662 Ma	1,751-1,625 Ma
TIPOS DE ROCAS PLUTÓNICAS	Monzogranito, sienogranito, granodiorita y diorita	Granodiorita, cuarzozononita y granito	Cuarzodiorita, tonalita, granito y granodiorita	Granodiorita, granito y diorita
DEFORMACIÓN				
• OROGENIA	Orogenia Ivampah (ca. 1.70 Ga)	Orogenia Ivampah (Yavapai)	Orogenia Yavapai (ca. 1.70 Ga) correlacionable con la orogenia Ivampah en la provincia Mojave	Orogenia Mazatzal (1.675-1.625 Ga)
• ESTILO DE DEFORMACIÓN	Foliaciones verticales y plegamientos de dirección NE	Foliaciones subverticales con dirección NE	Foliaciones subverticales con dirección NE	Foliaciones subverticales con dirección NE
• FORMACIÓN DE GRANITOIDES	Granitos pre-, sin- y postorogénicos	Granitos pre-, sin- y postorogénicos	Granitos pre-, sin- y postorogénicos	Granitos pre-, sin- y postorogénicos
EDAD DE ZIRCONES ENCONTRADOS EN ROCAS METASEDIMENTARIAS ENCAJONANTES DE LOS GRANITOIDES	2.7-1.8 Ga	(no hay datos)	1.75-1.71 Ga	1.8-1.65 Ga
GRADO METAMÓRFICO DE ROCAS SUPRACORTICALES ENCAJONANTES DE LOS GRANITOIDES	Anfibolita-alto a granulita	Esquistos verdes a bajo-med. anfibolita	Esquistos verdes a bajo-med. anfibolita	Esquistos verdes
GEOQUÍMICA DE GRANITOIDES PALEOPROTEROZOICOS				
• Elementos mayores				
• Serie geoquímica	Calcicalcina alto- a ultra-K	Calcicalcina alto-K	Calcicalcina	Calcicalcina
• Fe/Mg	Alto	Alto	Bajo	Bajo
• K ₂ O en granitos pre- y sinorogénicos	Muy alto (> 5.0 wt. %)	Muy alto (> 5.0 wt. %)	Bajo	Bajo
• Elementos traza y tierras raras (REE)				
• Rb, Ba, Y, Th y REE	Muy enriquecido	Enriquecido	Empobrecido	Empobrecido
• Nb-Y diagrama de discriminación		Granitos de "intraplaca" y de "arco volcánico"	Granitos de "arco volcánico"	Granitos de "arco volcánico"
ISÓTOPOS RADIOGÉNICOS DE GRANITOIDES PALEOPROTEROZOICOS				
• Isótopos de Pb				
• U/Pb	Bajo	Alto	Alto	Alto
• Th/U	Alto (> 4)	Medio (~4)	Bajo (~2)	Medio (~4)
• Th/Pb	Alto	Medio	Bajo	Medio
• Isótopos de Nd				
• εNd a ~1.75 Ga	(de -3 a +1) (de -5.5 a -1.4) en Death Valley	Muy variable entre provincias Mojave y Yavapai	(de +3.5 a +4.7) (de +0.8 a +3.0) en el Gran Cañón	(+5) derivado principalmente del manto paleoproterozoico
• Edad modelo de Nd (T _{DM})	2.3-2.0 Ga hasta 2.6 Ga en Death Valley	Muy variable entre provincias Mojave y Yavapai	1.85-1.60 Ga Gran Cañón	1.8-1.7 Ga
• Provincia de Nd	Provincia Nd 1	Provincia Nd 1, 2 & 3	Provincia Nd 2 & 3	Provincia Nd 3

na (Figura 2; Tabla 1), y está compuesta por rocas de cubierta metasedimentaria de alto grado metamórfico derivadas de materiales con componentes neoarqueano-paleoproterozoicos (~2.7–1.8 Ga).

Estas rocas metasedimentarias fueron intrusivadas por numerosas rocas plutónicas del Paleoproterozoico (1.81–1.63 Ga; Figura 4) que más tarde fueron deformadas y metamorfoseadas a los ~1.70 Ga durante la orogenia Ivanpah (Young et al., 1989; Wooden y Miller, 1990; Wooden et al., 1994). Esta orogenia deformó rocas produciendo pliegues con ejes verticalizados con vergencia estructural NE y una foliación subvertical de intensidad variable con orientación NE (Karlstrom y Bowring, 1991). Anderson y colaborado-

res (1993) y Bender (1994) destacan que la mayoría de los intrusivos pre- y sinorogénicos de la provincia Mojave son monzogranitos y, en menor medida, sienogranitos, granodioritas y dioritas. Estos autores también destacan que los intrusivos presentan relaciones altas de Fe/Mg, valores elevados de K_2O , y están enriquecidos en elementos LILE (Rb, Ba, Y, Th) y tierras raras (REE). También mencionan que para los diagramas de discriminación de ambiente tectónico de formación de granitos, de acuerdo con la clasificación de Pearce y colaboradores (1984), la mayoría de los granitos paleoproterozoicos de la provincia Mojave presentan composiciones que caen en el campo de granitos intraplaca.

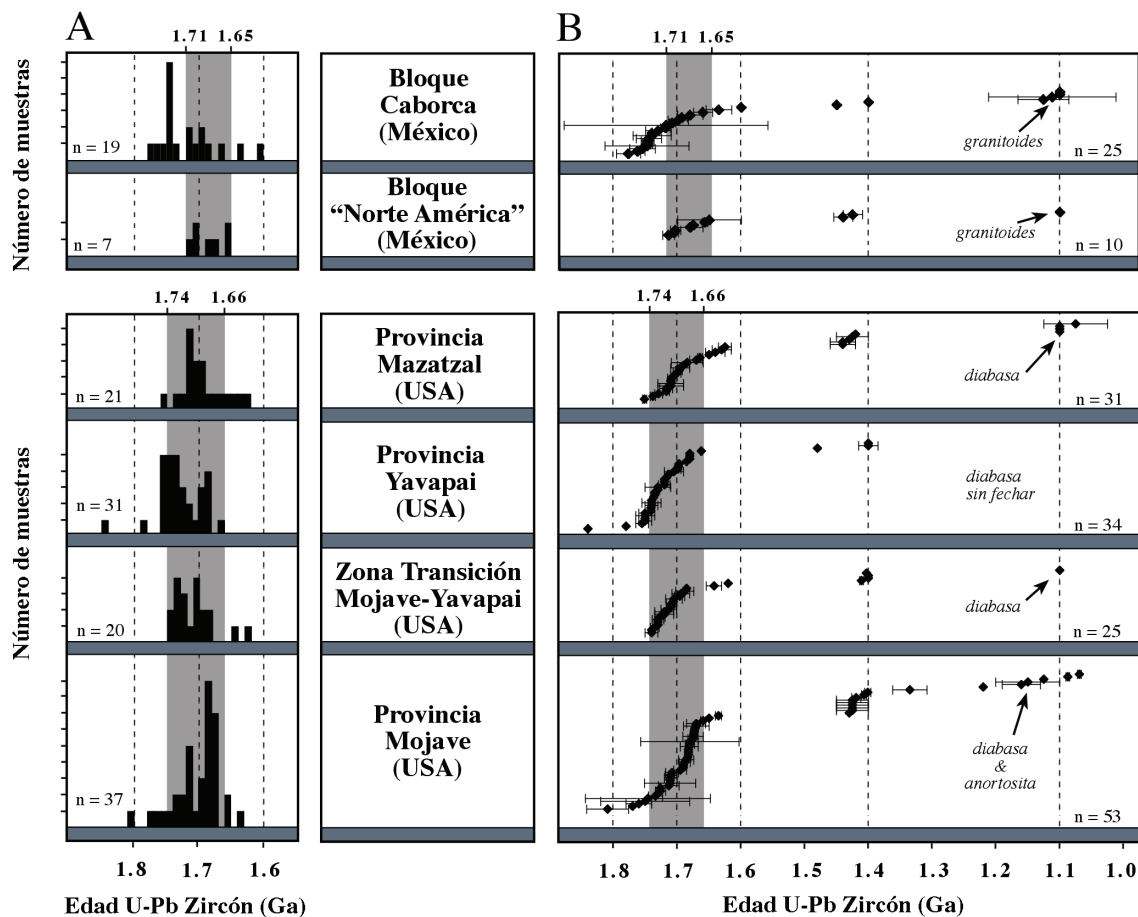


Figura 4. Magmatismo proterozoico en el SW de Laurentia. (A) Histograma de edades U-Pb en zircons de rocas ígneas paleoproterozoicas. La escala vertical muestra el número de muestras en intervalos de 10 Ma. (B) Edades de U-Pb en zircons de rocas ígneas paleoproterozoicas y mesoproterozoicas. Los puntos de edad están separados en la vertical para efectos de claridad en el gráfico. Las barras de error mostradas están al nivel de 95% de confianza. Las bandas verticales en color gris muestran el solapamiento en edades de magmatismo. Los gráficos para los bloques Caborca y "Norteamérica" contienen las edades reportadas por Iriondo et al. (2004) para la zona de Quitovac, además de las edades U-Pb publicadas para rocas ígneas del SW de América del Norte hasta aproximadamente el año 2000. La base de datos de edades U-Pb de zircons para realizar estos gráficos se encuentra en Iriondo (2001).

Los valores iniciales de ϵNd calculados para rocas plutónicas de la provincia Mojave, también conocida como Mojavia o provincia Nd1 (Figura 2), oscilan entre -3 y +1 a edades de 1.8–1.7 Ga, y son considerados muy bajos para lo que se esperaría teniendo en cuenta que el manto paleoproterozoico a los ~1.7 Ga tendría valores de ~+6 (DePaolo, 1981; Nelson y DePaolo, 1984; Bennett y DePaolo, 1987). Estos estudios de ϵNd son utilizados para calcular edades modelo de Nd de manto empobrecido (T_{DM}) entre 2.3 y 2.0 Ga, que son mucho más viejas que las edades de cristalización (1.81–1.63 Ga) obtenidas por geocronología U-Pb en zircones para las mismas rocas (Bennett y DePaolo, 1987).

Wooden y colaboradores (1994) reportan edades de U-Pb, SHRIMP en zircones (2.7–1.8 Ga), de rocas supracorticales de la provincia Mojave que son mucho más viejas que las edades comúnmente encontradas en esta provincia para rocas plutónicas y que interpretan como zircones detríticos o núcleos heredados. Bennett y DePaolo (1987) también sugieren que los valores isotópicos de Nd para las rocas de esta provincia indican que las rocas graníticas, de ~1.7 Ga, representan mezclas de manto juvenil y componentes corticales importantes (incluso hasta 20%) de corteza arqueana de la provincia Wyoming. Sin embargo, estudios realizados en rocas paleoproterozoicas de la región de Death Valley en California por Rämö y Calzia (1998) indican que este componente neoarqueano, introducido como componente detrítico en los magmas, pudiera llegar a alcanzar hasta el 30–40% y significaría que las edades modelo de Nd para la provincia Mojave tendrían que ser extendidas hasta los 2.6 Ga, correspondiendo a valores de ϵNd de hasta -6 para rocas con edades de cristalización de ~1.7 Ga.

La corteza de la provincia Mojave tiene unos valores isotópicos iniciales de Pb radiogénico con composiciones bajas en U/Pb y mucho más altas en Th/Pb; las relaciones Th/U calculadas para la provincia Mojave son superiores a las medias de valores de corteza continental de alrededor de 3.8 (Wooden y Miller, 1990; Wooden y DeWitt, 1991; Wooden, 1997). Los estudios de Pb y Nd en rocas plutónicas de la provincia Mojave sugieren una contribución significativa de materiales de corteza neoarqueana y paleoproterozoica (Sideriano).

3.2 PROVINCIA YAVAPAI

La provincia paleoproterozoica Yavapai (Figura 2) está compuesta por rocas supracorticales de edades 1.75–1.71 Ga con grado metamórfico de moderado a alto que fueron intrusionadas por rocas plutónicas de composición máfica a intermedia y con edades de cristalización de 1.84–1.66 Ga (Figura 4; Tabla 1). Estas rocas sufrieron deformación penetrativa alrededor de los ~1.70 Ga durante la orogenia Yavapai (Karlstrom et al., 1987; Karlstrom y Bowring, 1988; Williams, 1991). Esta orogenia se correlaciona en el tiempo con la orogenia Ivanpah propuesta en la provincia Mojave, y está caracterizada en Arizona por foliación subvertical de dirección NE que pudieran representar la acreción/colisión de la provincia Yavapai, mejor dicho del arco de islas Yavapai, al continente norteamericano (e. g., Karlstrom y Bowring, 1991, 1993).

Los estudios geoquímicos de Anderson y colaboradores (1993) y Bender (1994) indican que la mayor parte de las rocas plutónicas pre- y sinorogénicas del oeste de Arizona (provincia Yavapai) tienen una composición calcialcalina e incluyen litologías como cuarzodiorita, tonalita y granodiorita. Estos autores también indican que las rocas plutónicas de la provincia Yavapai, contemporáneas con rocas de la provincia Mojave, presentan valores mucho menores de las relaciones Fe/Mg, menor concentración de K_2O y no son tan enriquecidas en elementos LILE (Rb, Ba, Y, Th) y tierras raras (REE) como las de la provincia Mojave. Bender (1994) muestra que las rocas plutónicas de la provincia Yavapai presentan composiciones que caen en el campo de granitos de arco volcánico según la clasificación de Pearce y colaboradores (1984).

Las rocas plutónicas de la provincia Yavapai tienen edades de cristalización de 1.85–1.60 Ga con edades modelo de Nd muy similares a sus edades de cristalización (Wooden y DeWitt, 1991) y valores iniciales de ϵNd entre +3.5 y +4.7, que son más cercanos a los valores estimados para el manto paleoproterozoico (+6) a edades de ~1.7 Ga (DePaolo, 1981; Nelson y DePaolo, 1984; Bennett y DePaolo, 1987). Sin embargo, existen algunas muestras ígneas aisladas en el Gran Cañón del Colorado en el norte de Arizona que presentan valores iniciales de ϵNd entre +0.8 y +3.0 y

edades modelo de Nd entre 1.95 y 1.85 Ga, que quizá indiquen una pequeña influencia de corteza neoarqueana para rocas de esta región de la provincia Yavapai (Wooden y Miller, 1990).

La geocronología de U-Pb en zircones del plutón Elves Chasm del Upper Granite Gorge del Gran Cañón por Hawkins y colaboradores (1996) proporcionó una edad de cristalización de 1,840 Ma corroborando la hipótesis de que las edades de cristalización en esta parte de la provincia Yavapai son muy cercanas a las edades modelo de Nd para las mismas rocas.

La provincia paleoproterozoica Yavapai se correlaciona espacialmente con la provincia de Pb de Arizona central definida por Wooden y colaboradores (1988) y Wooden y DeWitt (1991). Estos autores identifican que las rocas de esta provincia tienen relaciones isotópicas de $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ sistemáticamente superiores a las observadas para la relación $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Esto sugiere que estas rocas paleoproterozoicas de la provincia Yavapai tienen una composición isotópica inicial de Pb más baja que la que presentan las rocas de la provincia Mojave (Wooden y Miller, 1990; Wooden y DeWitt, 1991). Esta composición inicial de Pb es muy similar a la que presentan rocas generadas a partir de fuentes de manto oceánico, pero con valores de U/Pb algo superiores y valores Th/Pb menores; las relaciones Th/U, alrededor de 2, son más bajas que la media para la corteza continental (3.8) determinadas por Stacey y Kramers (1975) en su modelo de evolución del Pb (Wooden, 1997).

3.3 PROVINCIA MAZATZAL

La provincia paleoproterozoica Mazatzal del sur de Arizona (Figura 2; Tabla 1) está compuesta por rocas supracorticales de bajo grado metamórfico e intrusiones hipabisales (1.75–1.62 Ga; Figura 4) con características isotópicas juveniles (empobrecidos); estas rocas fueron deformadas durante la orogenia Mazatzal entre 1.67–1.62 Ga (Karlstrom et al., 1987; Karlstrom y Bowring, 1988; Conway y Silver, 1989). Esta orogenia está caracterizada por fábricas de deformación variable subverticales de orientación NE y se piensa que representen la colisión de un arco de islas (arco Mazatzal) de orientación NE respecto al continente, justo al sureste del arco de islas Yavapai que ya colisionó

anteriormente contra el continente durante la orogenia Yavapai (Karlstrom y Bowring, 1991).

Las rocas plutónicas paleoproterozoicas de la provincia Mazatzal presentan edades modelo de Nd (1.8–1.7 Ga) que son básicamente las mismas que las edades de cristalización obtenidas utilizando geocronología U-Pb en zircones. Los valores iniciales de ϵNd son siempre positivos ($\sim+5$) y muy similares a los valores estimados para el manto paleoproterozoico (+6) a edades de ~ 1.7 Ga (DePaolo, 1981; Nelson y DePaolo, 1984; Bennett y DePaolo, 1987).

La provincia Mazatzal se correlaciona espacialmente con la provincia de Pb del SE de Arizona definida por Wooden y colaboradores (1988) y Wooden y DeWitt (1991). Las rocas plutónicas de esta provincia tienen básicamente la misma composición isotópica inicial de Pb que las rocas de la provincia Yavapai, pudiendo indicar que las rocas de ambas provincias se formaron a partir de fuentes magmáticas juveniles similares. Sin embargo, las relaciones isotópicas de Th/U (~ 4) calculadas para las rocas de la provincia Mazatzal indican mayor empobrecimiento que las de la provincia Yavapai y se acercan más a los valores establecidos por Stacey y Kramers (1975) de aproximadamente 3.8 de su modelo de evolución del Pb. Esto significaría que existen algunas diferencias fundamentales en los procesos de formación de corteza continental para ambas provincias (Wooden, 1997).

En contraste, las rocas de la provincia Mojave presentan mayor cantidad de Pb radiogénico inicial que las de las provincias Mazatzal y Yavapai, además de valores inferiores de U/Pb, mayores de Th/Pb y mucho mayores de Th/U (4–15) que los establecidos en el modelo de evolución del Pb de Stacey y Kramers (1975) para la corteza continental (Wooden y Miller, 1990; Wooden y DeWitt, 1991; Wooden, 1997).

A pesar de que la mayoría de las rocas ígneas expuestas en las provincias Yavapai y Mazatzal tienen las mismas edades de cristalización que las rocas de la provincia Mojave (Figura 4), los estudios isotópicos de Pb y Nd sugieren que las rocas de las provincias Yavapai y Mazatzal no presentan mayor participación de material cortical neoarqueano. Los isótopos sugieren que estas provincias están compuestas de material juvenil similar al que se presenta en ambientes de arco de islas con magmas derivados de una fuente mantélica parecida

al MORB actual pero algo empobrecido en LREE (Bennett y DePaolo, 1987; Wooden y DeWitt, 1991).

3.4 FRONTERAS/LÍMITES GEOLÓGICOS DE PROVINCIAS PALEOPROTEROZOICAS DEL SW DE EUA

El entendimiento de la naturaleza de las fronteras geológicas que separan las provincias corticales paleoproterozoicas del SW de América del Norte es particularmente importante para reconstruir la evolución tectónica de la región. Las fronteras propuestas para estas provincias son aún tema de controversia y se han definido principalmente por sus características estructurales, isotópicas y geoquímicas (Figura 2).

Bennett y DePaolo (1987) dividen el SW de Estados Unidos en tres provincias paleoproterozoicas utilizando valores isotópicos de Nd (Figura 2). La provincia Nd1, que corresponde a la provincia Mojave, también conocida como Mojavia, se encuentra en el SE de California (Figura 2) y consiste en una corteza proterozoica con las edades modelo de Nd más antiguas ($T_{DM} = 2.3-2.0$ Ga) y con los valores de ϵNd iniciales más negativos (-3 a +1). La provincia Nd2 se encuentra principalmente en Utah y Colorado (Figura 2) y representa una corteza con edades modelo de Nd de $T_{DM} = 2.0-1.8$ Ga y valores de ϵNd iniciales entre +0.8 y +4.7. Esta provincia incluye basamento paleoproterozoico tanto de la provincia Mojave como de la Yavapai. La provincia de Nd3 contiene rocas con las edades modelo de Nd más jóvenes de la región ($T_{DM} = 1.8-1.7$ Ga) y los valores de ϵNd iniciales más positivos (+5) de todas las provincias. Las rocas de esta provincia de Nd se encuentran en Nuevo México y casi todo el sur de Arizona y forman parte del basamento de las provincias Yavapai y Mazatzal (Figura 2). Bennett y DePaolo (1987) también proponen que la provincia Mojave, según su modelo de provincias de Nd, ha podido ser desplazada hacia el sur más de 400 km a lo largo de una falla lateral izquierda de dirección norte y que ha supuesto la yuxtaposición de la provincia Mojave contra la provincia Yavapai.

A pesar de estos estudios isotópicos, la naturaleza geológica de la frontera o fronteras entre las provincias Mojave y Yavapai parece difícil de definir, pero sí queda claro que no se trata de una fronte-

ra estructural sencilla como lo proponían inicialmente Bennett y DePaolo (1987). De hecho, la combinación de los estudios estructurales y de isótopos de Nd y Pb para las rocas paleoproterozoicas de esta región sugieren que la frontera es más bien gradual o transicional abarcando una zona de más de 75 km de ancho a lo largo de la frontera entre los estados de California y Arizona (Figura 2; Wooden y Miller, 1990; Wooden y DeWitt, 1991; Albin et al., 1991; Duebendorfer et al., 1998). Las rocas ígneas presentes en esta zona de transición (edades U-Pb de 1.74–1.62 Ga; Figuras 2 y 4) y las rocas de cuenca sedimentaria asociadas presentan composiciones isotópicas de Pb dominadas por la influencia de la provincia Mojave y con proporciones variables de Pb asociadas a la provincia Yavapai (Wooden y DeWitt, 1991). Bryant y colaboradores (1994) y Wooden y colaboradores (1994) sugieren, con base en isótopos de Pb en rocas graníticas paleoproterozoicas, que el límite oriental de esta zona de transición representa una corteza asociada a la provincia Yavapai. Sin embargo, el límite de Nd propuesto por Bennett y DePaolo (1987) corresponde aproximadamente con el borde oeste de esta zona de transición.

El grado metamórfico observado en las rocas de la parte norte de la zona de transición Mojave-Yavapai es generalmente más elevado (anfíbolita superior a granulita) que el presente en las rocas de la región norte de la provincia Yavapai (esquistos verdes a anfíbolita medio). Estas rocas de alto grado metamórfico se parecen más a las presentes en la provincia Mojave (Duebendorfer et al., 1996; Jones, 1998). Sin embargo, estos autores mencionan que la deformación de las rocas de la zona de transición presenta un estilo estructural similar al que se encuentra en la provincia Yavapai.

Otra propuesta sobre la naturaleza de esta zona de transición Mojave-Yavapai está basada en estudios geoquímicos de rocas plutónicas paleoproterozoicas pre- y sintectónicas (Anderson et al., 1993; Bender, 1994). Estos autores proponen una frontera composicional (Figura 2) entre las provincias Mojave y Yavapai al observar que los intrusivos de la provincia Mojave tienen una composición ultra-potásica en comparación con la composición calcálcica de las rocas de la provincia Yavapai. También destacan que las rocas plutónicas de la provincia Mojave están más enriquecidas

en Rb, Ba, Y, Th y REE que las de la provincia Yavapai. En los diagramas de discriminación de ambiente tectónico de formación de granitos de Pearce y colaboradores (1984), las rocas de la provincia Mojave caen en el campo de intraplaca mientras que los granitoides de la misma edad en la provincia Yavapai caen, en casi todos los casos, en el campo de arco volcánico.

La frontera entre las provincias Yavapai y Mazatzal en Arizona central no es menos debatida, pero parece estar representada por una banda de gran deformación que corresponde con una zona de cizalla subvertical de dirección NE conocida como Moore Gulch (MGSZ; Figura 2; Karlstrom y Daniel, 1993; Karlstrom y Humphreys, 1998). Esta falla separa un bloque SE hundido (bloque Mazatzal) de otro NW (bloque Ash Creek) y presenta una componente de falla de rumbo derecho similar a otras fallas menores presentes en la región, como son las zonas de cizalla Slate Creek y Chaparral (Bergh y Karlstrom, 1992). Esta frontera tectónica coincide aproximadamente con la frontera geocronológica propuesta por Silver (1965, 1967, 1969) y Silver y colaboradores (1977, 1986) con base en geocronología U-Pb de zircones de rocas ígneas. Sin embargo, esta frontera parece definir una zona transicional de más de 300 km de ancho en la parte norte de Nuevo México y al sur de Colorado, indicando que la frontera Yavapai-Mazatzal varía en su naturaleza a lo largo de su traza (Shaw y Karlstrom, 1999).

3.5 MAGMATISMO MESOPROTEROZOICO (~1.4 Ga y ~1.1 Ga) EN EL SW DE AMÉRICA DEL NORTE

El magmatismo mesoproterozoico en el SW de América del Norte se inició aproximadamente 200 Ma después de la acreción y estabilización de la litosfera continental juvenil que generó la amalgama de las provincias paleoproterozoicas Mojave, Yavapai y Mazatzal. Este período de magmatismo mesoproterozoico es parte de un gran episodio de actividad ígnea que se extiende hacia el NE a lo largo de América del Norte, a través del sur de Groenlandia hasta llegar al Escudo Báltico (Anderson, 1983) y sirvió para estabilizar el continente.

Este magmatismo en el SW de América del Norte se puede subdividir en dos episodios principales. Un pulso inicial de composición granítica, muy

voluminoso, de edad 1.48–1.40 Ga y otro más joven, de menor envergadura, con granitos y rocas volcánicas máficas de edad 1.22–1.07 Ga (Tabla 1). Los granitos de ambos pulsos magmáticos se han considerado como pulsos magmáticos anorogénicos o de tipo A por su carácter intracratónico y por la ausencia aparente de deformación y metamorfismo, además de por sus características geoquímicas (Anderson, 1983; Anderson y Bender, 1989). Sin embargo, un creciente número de estudios de este magmatismo en el SW de América del Norte sugiere que muchos de los intrusivos de ~1.4 Ga están de hecho deformados y metamorfoseados (Vernon, 1987; Thompson et al., 1991; Nyman et al., 1994; Duebendorfer y Christensen, 1995) y su encuadre tectónico parece ser más coherente con un ambiente compresional o transtensional de margen continental (Nyman y Karlstrom, 1997; Nyman et al., 1994; Kirby et al., 1995) que de ambientes extensionales quizá relacionados con la ruptura del supercontinente Rodinia (Anderson, 1983; Hoffman, 1989; Windley, 1993; Anderson y Morrison, 1999).

Los intrusivos de ~1.4 Ga de Arizona central se concentran a lo largo de dos cinturones que pudieran reflejar zonas de debilidad asociadas a fronteras paleoproterozoicas a escala cortical relacionadas con los límites de provincias Mazatzal-Yavapai y Mojave-Yavapai (Nyman et al., 1994). Estos autores también destacan que estas zonas o cinturones están separados por corteza proterozoica que contiene pocos intrusivos de ~1.4 Ga. Las características petroquímicas de estas rocas graníticas varían de metalumínicos en la provincia Mojave a peralumínicos en el SE de Arizona (Anderson y Bender, 1989). Los granitoides metalumínicos (monzogranitos hasta sienogranitos y cuarzo-monzodioritas) contienen biotita + esfena (titanita) + fluorita; la ocurrencia de hornblenda es característica de los miembros menos silícicos.

En el sur de Arizona, los granitos peralumínicos son de biotita y de dos micas y generalmente no presentan fluorita y tienen monacita accesoria y presentan relaciones medias de A/CNK de 1.06 ± 0.05 . Estos intrusivos están empobrecidos en la mayoría de los LILE (Rb, Ba, Y, Th) y en elementos de tierras raras (REE) cuando los comparamos con los intrusivos metalumínicos contemporáneos de la provincia Mojave.

También, tienen relaciones Fe/Mg más bajas, menos K₂O, y generalmente concentraciones más bajas en Y y Nb, por lo que en alguna ocasión estas rocas caen en el campo de arco volcánico de ambiente de generación de granitos según la clasificación de Pearce et al. (1984). Los intrusivos de ~1.4 Ga de la provincia Mojave presentan valores mucho más elevados en Y y Nb, y caen siempre en el campo de granitos intraplaca para el mismo tipo de clasificación de granitos.

Con base en los estudios geoquímicos, y a pesar de las diferencias en edad y encuadre tectónico, los intrusivos de ~1.4 Ga de la provincia Mojave son básicamente indistinguibles de los granitos paleoproterozoicos de esa misma provincia, indicando que los magmas que generaron ambos pulsos graníticos proterozoicos se generaron de una fuente común o muy similar (Anderson et al., 1993). La composición isotópica de los granitos de ~1.4 Ga en la provincia Mojave presentan valores ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr iniciales de bajos a moderados, bajos en ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd iniciales, y altos en ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb indicando que fueron derivados, en parte, por componentes de fusión parcial de una corteza inferior y/o mezcla de una corteza y manto (Anderson, 1983; Farmer y DePaolo, 1984; Bennett y DePaolo, 1987; Wooden y Miller, 1990; Wooden y DeWitt, 1991). Las provincias paleoproterozoicas generadas a partir de arcos de islas juveniles (origen mantélico; e. g., Yavapai y Mazatzal) acrecionados al continente proporcionaron un protolito muy fértil para la generación, por fusión parcial, de los magmas precursores de los intrusivos mesoproterozoicos (~1.4 Ga) del SW de América del Norte.

El pulso magmático de ~1.1 Ga en el SW de América del Norte es menos entendido, pero se cree que esté asociado a un período de *rifting* continental incipiente que no prosperó en la ruptura y separación continental (supercontinente Rodinia). Además de este régimen extensional asociado al *rifting* fallido, se especula con la idea de que hay una tectónica compresional en la región asociada a la orogenia Grenvilliana (Karlstrom y Humphreys, 1998). En todo Arizona, son muy comunes los enjambres de diques y sills de diabasa (Silver, 1960; Hammond, 1986), siendo más abundantes y voluminosos a lo largo de las fronteras Mojave-Yavapai y Yavapai-Mazatzal en Arizona. Las diabasas aparecen asociadas espacialmente con

los granitos de ~1.4 Ga, sugiriendo que los magmas basálticos ascendieron a través de los mismos conductos y/o discontinuidades corticales empleadas por los granitoides más antiguos (Karlstrom y Humphreys, 1998). Los granitoides de edades ~1.1 Ga se emplazaron en Pikes Peak, Colorado, el bloque Caborca en el norte de Sonora (granitos Aibó que se discutirán a continuación), el oeste de Texas y en el levantamiento Llano en Texas central, que aparentemente comparten algunas características comunes con los granitos “anorogénicos” de ~1.4 Ga (Frost y Frost, 1997; Smith et al., 1997, 1999; Mosher, 1998; Bickford et al., 2000; Li et al., 2007) además de que, en todos los casos, existen las diabasas de ~1.1 Ga (Hammond, 1986; Heaman y Grotzinger, 1992). Las diabasas tienen una composición transicional de toleítica a alcalina, similar a las rocas basálticas asociadas a otras provincias proterozoicas de tipo anorogénico en el mundo (Hammond, 1986). Por último, cabe destacar la presencia de cuerpos anortosíticos en la región de las Montañas de San Gabriel, en el sur de California, que han sido fechados por U-Pb en zircones en una edad de ~1.19 Ga (Carter y Silver, 1972; Barth et al., 1995).

Después del magmatismo mesoproterozoico, el basamento proterozoico del SW de América del Norte sufrió numerosos eventos de rift continental desde los ~1.1 Ga hasta 0.6 Ga (Stewart, 1972; Bond et al., 1985) que culminaron con la separación continental de América del Norte (Laurencia) de otros fragmentos continentales adyacentes (e. g., Australia, Antártida, Siberia, etc.). Esta separación significó el establecimiento del margen continental pasivo del SW de Laurencia (Karlstrom y Humphreys, 1998) que, básicamente, perduró hasta el Pérmico-Triásico, cuando se estableció el margen continental activo con el inicio del magmatismo asociado a la subducción de la placa oceánica Farallón.

4. CARACTERIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LAS ROCAS PROTEROZOICAS EN SONORA

En este apartado presentamos el conocimiento actual sobre la geología proterozoica de Sonora que ha ido avanzando según los tiempos y que dividimos en dos etapas de conocimiento; una primera etapa en la que se

presentan algunos aspectos de los estudios originales en Sonora y una segunda etapa de conocimiento en la que se realizan estudios analíticos modernos de forma sistemática, incluyendo geocronología U-Pb en zircones (ocasionalmente Ar-Ar), geoquímica de elementos mayores y traza e isótopos radiogénicos como trazadores (Pb-Pb, Rb-Sr y Sm-Nd).

4.1 TRABAJOS ORIGINALES SOBRE EL BASAMENTO PROTEROZOICO DE SONORA: ETAPA I

Hasta hace muy pocos años, la información geológica sobre el basamento proterozoico que aflora en el norte de Sonora consistía únicamente en descripciones estratigráficas y litológicas puntuales (Cooper y Arellano, 1946; Merriam, 1972; Merriam y Eells, 1978). Los primeros estudios geocronológicos sobre el basamento de Sonora fueron realizados por Damon et al. (1961, 1962) utilizando técnicas geocronológicas de K-Ar y

Rb-Sr que les permitieron proponer que el basamento proterozoico del SW de los Estados Unidos podría extenderse hacia Sonora. Trabajo de campo subsecuente y geocronología de U-Pb en zircones en rocas magmáticas de la región (Anderson y Silver, 1977a, b, 1978, 1979, 1981; posteriormente detallados en Anderson y Silver, 2005) identificaron basamento cristalino proterozoico con edades desde el Paleoproterozoico (~1.8–1.6 Ga) hasta el Mesoproterozoico (~1.4 y ~1.1 Ga).

Como lo reportan Anderson y Silver (2005), estos trabajos iniciales realizados en Sonora en los años 70 permitieron proponer una distribución de basamentos cristalinos y su correlación con las provincias paleoproterozoicas Yavapai y Mazatzal (Figura 5B), conceptos de provincias que ya se manejaban desde los años 60 para rocas de Arizona (Figura 5A). A estos autores les sorprendió enormemente el doblez hacia el SE que adquirirían las rocas de la provincia Yavapai al adentrarse hacia México (ver palabras textuales en

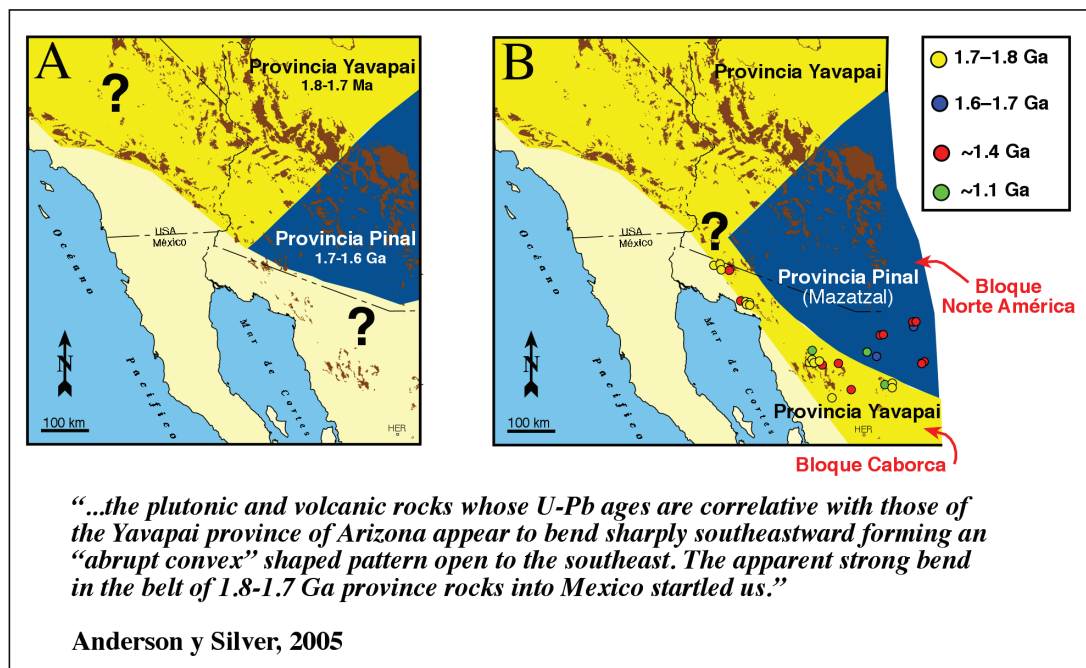


Figura 5. Mapas del SW de América del Norte que muestran la distribución de basamentos proterozoicos. (A) Ideas originales de finales de los años 60 sobre la distribución de basamentos paleoproterozoicos para el SW de Estados Unidos basados en diferencias de edades U-Pb de cristalización de rocas ígneas (adaptado de Anderson y Silver, 2005). (B) Ideas de Anderson y Silver de principios de los años 70 después de realizar estudios geológicos y geocronológicos en Sonora (adaptado de Anderson y Silver, 2005). Las manchas oscuras representan afloramientos de rocas proterozoicas en el SW de América del Norte (adaptado de Iriondo et al., 2004). Los círculos de colores representan las localidades de muestras fechadas por U-Pb reportadas por Anderson y Silver (1981) y publicadas después por Anderson y Silver (2005). Ver texto para explicación de la cita de Anderson y Silver en inglés.

inglés en la Figura 5). Sin embargo, y a pesar de que era un concepto provocador e interesante (Figura 6B), ese doblez brusco nunca fue empleado para explicar dicha distribución de los basamentos que implicaría autoctonía del basamento Yavapai presente en Sonora, sino que se prefirió introducir el concepto de bloques de basamento cristalino desplazados a lo largo de una megacizalla jurásica para explicar dicha distribución (Figura 6A).

Esta estructura hipotética es conocida como la megacizalla Mojave-Sonora (MSM en la Figura 2; Silver y Anderson, 1974, 1983; Anderson y Silver, 1978, 1979); consiste en una falla de desgarre de sen-

tido izquierdo y dirección NW activa en el Jurásico Tardío y con un desplazamiento estimado de 700 a 800 km (Anderson y Schmidt, 1983). Según estos autores, la hipotética megacizalla divide Sonora en dos bloques de basamento cristalino con diferentes edades U-Pb de cristalización (Figura 2). El bloque al SW de la megacizalla se conoce como el bloque Caborca (1.7–1.8 Ga) y se compone de rocas volcánicas, granitos y pegmatitas, mientras que el bloque “Norteamérica” (1.6–1.7 Ga), al NE de la falla, se compone de rocas metasedimentarias y granitos (Silver y Anderson, 1974, 1983; Anderson y Silver, 1978, 1979). Anderson y Silver (1981), basándose en observaciones de campo y limitada geocronología, proponen que el bloque “Norteamérica” podría correlacionarse con litologías de la provincia Mazatzal, mientras que la restauración de los 700–800 km de desplazamiento izquierdo de la MSM, yuxtapondría el bloque Caborca al basamento de la provincia Mojave, más específicamente correlacionándose con el basamento de la región de Death Valley en California (Figura 2). En apoyo a esta interpretación, Stewart (1988) sugiere que las rocas de cubierta neoproterozoicas y paleozoicas en la región de Death Valley son correlacionables con rocas de edad similar en el área de Caborca en el NW de Sonora (Figura 2; círculos en color gris). De ser cierto, esto sugeriría que las rocas paleoproterozoicas del bloque Caborca tendrían la misma edad, geoquímica e isótopos radiogénicos que las rocas de la región de Death Valley asociadas a la provincia Mojave. Conviene aclarar que el concepto de provincia Mojave (Mojavia) se acuñó a mediados de los años 80 y que no se manejó en los años 60 y 70 cuando se pensaba que sólo la provincia Yavapai existía al oeste de la provincia Mazatzal.

Los detalles sobre la hipotética megacizalla Mojave-Sonora van más allá de los objetivos de este artículo y remitimos al lector a la síntesis presentada por Molina-Garza e Iriando (2005) y también al volumen especial sobre la megacizalla publicado en el 2005 por la Sociedad Geológica de América (Special Paper 393). Estas dos referencias bibliográficas contienen el estado actual del conocimiento sobre la megacizalla y se recomiendan al lector para formar su propia opinión crítica al respecto de esta controversial e influyente hipótesis.

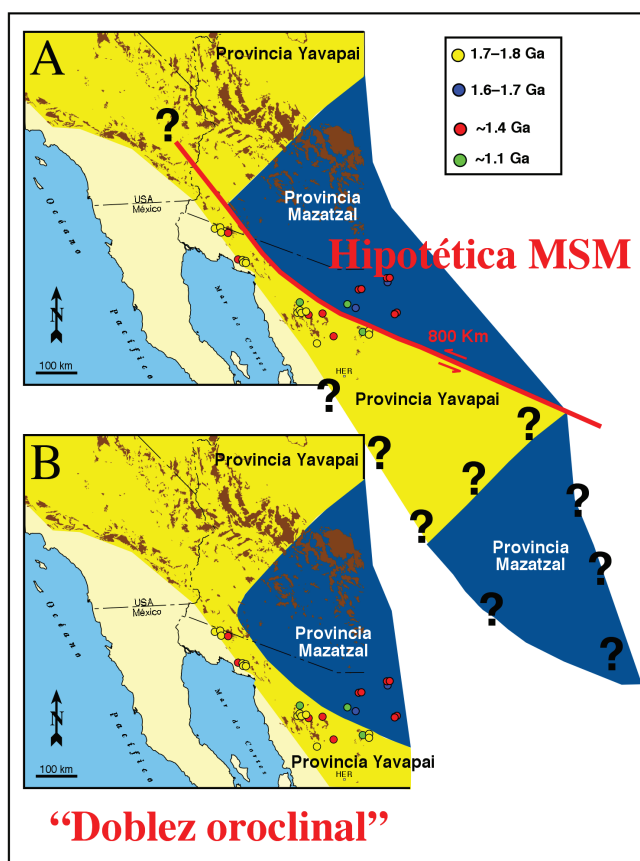


Figura 6. Explicaciones para la propuesta de distribución de basamento paleoproterozoico presentada en la Figura 5B. (A) Basamentos truncados a lo largo de una falla jurásica de rumbo izquierdo (sinistra) con desplazamientos de hasta 800 km. Básicamente, ésta es la idea original de la hipotética megacizalla Mojave-Sonora. (B) Doblez oroclinal de provincias de basamento paleoproterozoicas (Iriando, 2005) resultado de la colisión de arcos volcánicos en tiempos proterozoicos.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE ROCAS PALEOPROTEROZOICAS DE SONORA Y SU CORRELACIÓN CON LAS ROCAS DE LAS PROVINCIAS DEL SW DE ESTADOS UNIDOS: ETAPA II (ESTUDIOS MODERNOS)

4.2.1 El Paleoproterozoico de la zona de Quitovac: La semilla de los estudios modernos

El primer ejemplo de estudios multidisciplinarios en rocas paleoproterozoicas de Sonora es el trabajo realizado en la zona de Quitovac en el NW de Sonora (Figura 7B) por Iriondo (2001) e Iriondo y colaboradores (2004), que consideramos la semilla de los estudios modernos. Estos autores identificaron, con base en estudios geocronológicos, geoquímicos e isotópicos (Tabla 2), la presencia de dos bloques diferentes de rocas paleoproterozoicas que coinciden espacialmente con los bloques Caborca y “Norteamérica” propuestos para la zona. Sin embargo, los estudios de geocronología U-Pb en zircones para estas rocas sugieren que existe demasiado solapamiento entre las edades del bloque Caborca (1.7–1.69 Ga) y las del bloque “Norteamérica” (1.71–1.66 Ga) como para poder diferenciarlos única y exclusivamente basándonos en sus edades.

La combinación de estos datos geocronológicos de Quitovac con los datos existentes en la literatura para las rocas proterozoicas de Sonora, permitieron a Iriondo y colaboradores (2004) corroborar las ideas iniciales de Damon y colaboradores (1961, 1962) de que las rocas proterozoicas de Sonora eran la mera continuación de las existentes en Arizona y California. En este sentido, cabe destacar que en Sonora se identificaron los mismos pulsos magmáticos presentes en el basamento del SW de Estados Unidos (Figura 4; Iriondo et al., 2004).

Lo que verdaderamente permitió a Iriondo y colaboradores (2004) la distinción de estos bloques paleoproterozoicos de Quitovac, una vez establecida su edad paleoproterozoica por geocronología U-Pb, fueron los estudios de isótopos de Sm-Nd y la geoquímica de elementos mayores y traza en las rocas ígneas de ambos bloques corticales. Los granitoides del bloque “Norteamérica” están caracterizados por tener unos valores empobrecidos de ϵNd entre +3.4 y +3.9 y edades modelo de $\text{Nd } T_{\text{DM}}$ jóvenes, entre 1.80–1.74 Ga, y

tienen valores más bajos de K, Y, Rb, Ba, Th, REE, y relaciones Fe/Mg menores que los valores de las rocas del bloque Caborca. Por otro lado, los granitos del bloque Caborca se caracterizan por valores no tan empobrecidos de ϵNd entre +0.6 y +2.6 y edades modelo de $\text{Nd } T_{\text{DM}}$ ligeramente más viejas, entre 2.07–1.88 Ga, que las de las rocas del bloque “Norteamérica”.

A pesar de estas diferencias, los granitoides de ambos bloques corticales en Quitovac presentan características de rocas calcialcalinas formadas en ambientes de arco de islas. Iriondo y colaboradores (2004) proponen que las rocas del bloque Caborca en Quitovac presentan una afinidad con las rocas de la provincia Yavapai o con las de la zona de transición Mojave-Yavapai, mientras que las rocas del bloque “Norteamérica” en Quitovac tienen características similares a las de la provincia Mazatzal presentes en gran parte de Arizona.

4.2.2 Otros estudios modernos sobre rocas paleoproterozoicas de Sonora

Las localidades donde se ha realizado estudios modernos en rocas paleoproterozoicas de Sonora están presentadas en los mapas de la Figura 7. Cabe destacar que no hay total homogeneidad en el tipo de estudios realizados para estas rocas, pero que en todos los casos existen edades U-Pb en zircones para demostrar que las rocas son de hecho proterozoicas; muchas de ellas tienen estudios de Sm-Nd en roca total. Los estudios geoquímicos son más limitados, pero hay la suficiente información para corroborar las conclusiones de los estudios de isotopía de Sm-Nd que permiten sugerir a qué provincia cortical pertenecen las rocas bajo estudio.

Uno de los primeros estudios realizados, alejados de la zona de Quitovac, es el del área de El Crestón en la región de Opodepe en Sonora central (Valenzuela-Navarro et al., 2003, 2005). Para la unidad granítica El Crestón se ha reportado una edad U-Pb en zircones de $1,730 \pm 9$ Ma y un valor inicial de ϵNd de +3.1 (Valenzuela-Navarro et al., 2003) considerándose como parte del bloque Caborca (basamento con características tipo Yavapai). Una roca más joven de la misma zona tiene una edad de $1,673 \pm 6$ Ma con un valor ϵNd de -0.07 y su correspondiente edad modelo de $\text{Nd } T_{\text{DM}}$ de 2.06 Ga

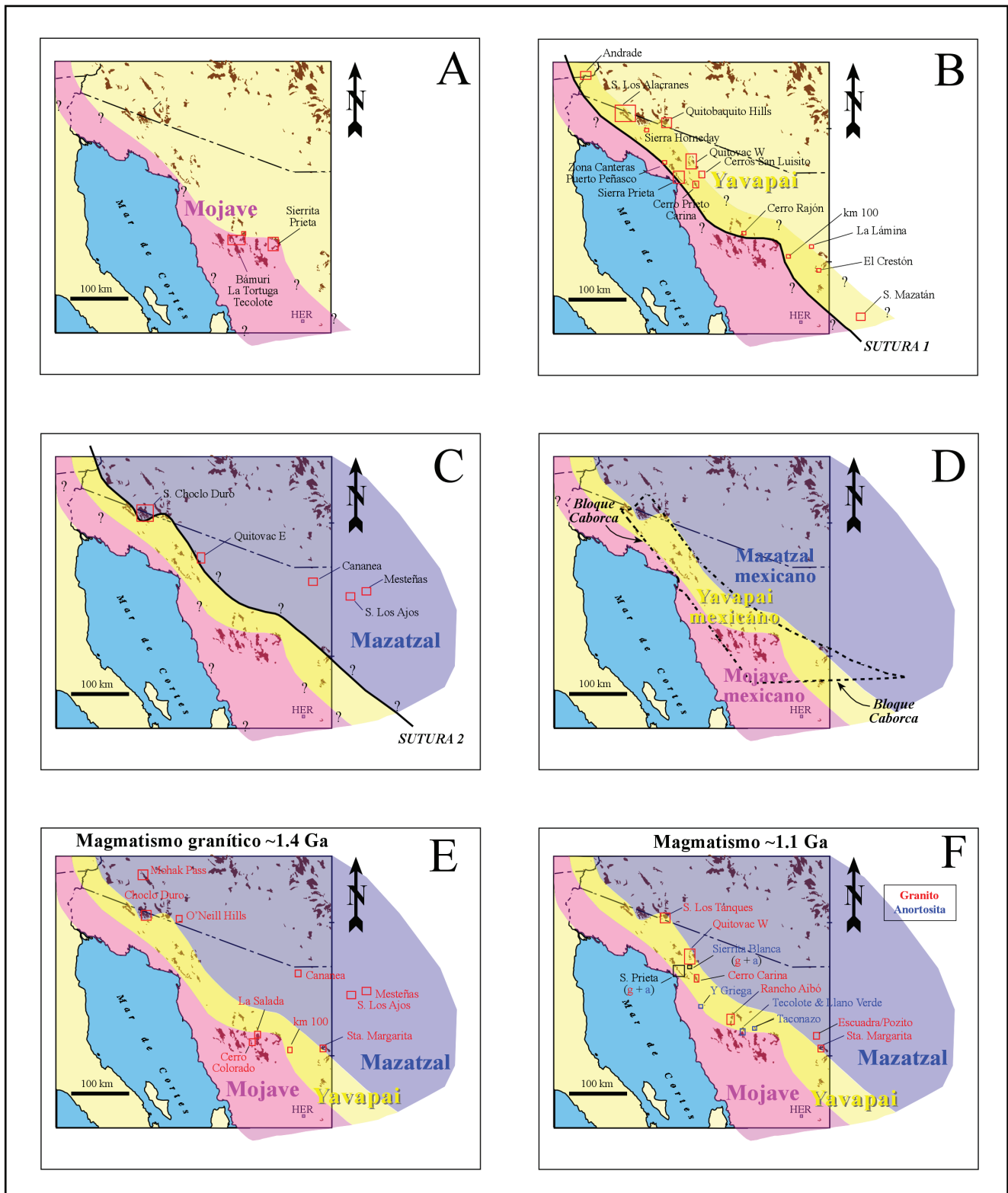


Figura 7. Mapas del NW de México con la propuesta de distribución de provincias paleoproterozoicas y subsecuente magmatismo mesoproterozoico a partir de estudios modernos de geocronología, geoquímica e isótopos realizados en rocas de diferentes localidades de Sonora. Ver texto para discusión.

Tabla 2. Características geológicas generales de granitoides proterozoicos de Quitovac, NW de Sonora, México.

Característica geológica	Bloque “Norteamérica”	Bloque Caborca	Grenvilliano de Caborca
Edad del magmatismo (Edades U-Pb de cristalización de zircones)			
• Paleoproterozoico	1,714-1,657 Ma	1,777-1,693 Ma	1,126-1,112 Ma
• Mesoproterozoico granitos de ~1.4 Ga	Alejado de Quitovac	Alejado de Quitovac	N.A.*
Tipo de roca plutónica	Granito calcialcalino y cuarzomonzodiorita	Granito calcialcalino y de dos micas	Granito alcalino
Isótopos radiogénicos de Nd			
• ϵ_{Nd} a T = edad de cristalización	+3.4 to +3.9	+0.6 to +2.6	-4.0 to -1.4
• Edades modelo de Nd (T_{DM})	1,800-1,740 Ma	2,070-1,880 Ma	1,770-1,720 Ma
• Isocrona de Nd en roca total	1,663 \pm 36 Ma ($\epsilon_{Nd} \sim +2.5$)	1,715 \pm 94 Ma ($\epsilon_{Nd} \sim +1.2$)	N.D. †
• Provincia de Nd	Provincia Nd 3	Provincia de Nd 2	N.A.*
Geoquímica			
• Elementos mayores			
Serie geoquímica	Calcialcalina	Calcialcalina alta-K	Calcialcalina alta-K
K ₂ O (%)	0.6-2.1	4.1-5.9	4.7
CaO (%)	2.53-4.17	0.99-1.53	2.01-2.18
Na ₂ O (%)	4.1-4.5	3.1-3.8	3.4-3.6
A/CNK	Metaluminoso-peraluminoso	Peraluminoso	Metaluminoso-peraluminoso
Fe/Mg	0.72-0.82	0.85-0.89	0.83-0.88
• Elementos traza y REE			
Diagrama Nb-Y	Granitos de “arco volcánico”	Granitos de “arco volcánico”	Granitos “intraplaca” y de “arco volcánico”
Y (ppm)	11	35	54
Rb (ppm)	74	137	222
Ba (ppm)	590	1042	1279
Th (ppm)	4	12	23
Σ REE (ppm)	23-97	122-188	200-262 (Aibó = 423)
(La/Yb) _N	10.7-49.1	4.2-12.0	6.4-15.3
Comparable a provincia cortical del SW de EUA	“Mazatzal”	“Yavapai”	N.A.*

* N.A. = no aplica.

† N.D. = no hay datos.

(M. Valencia-Moreno, comunicación personal). Otra muestra cercana a El Crestón, en la localidad de Banámichi, tiene una edad de $1,723 \pm 7$ Ma con un valor de ϵNd de +0.50 y su correspondiente edad modelo de $\text{Nd } T_{\text{DM}}$ de 2.00 Ga (Valencia-Moreno, comunicación personal). Todas estas ocurrencias de rocas ígneas paleoproterozoicas tienen unas características que consideramos corresponderían a corteza tipo Yavapai.

Estudios de Nourse y colaboradores (2005) en la región del Pinacate-Cabeza Prieta (Sierra Los Alacranes y Sierra Choclo Duro; Figura 7B), al igual que Iriondo y colaboradores (2004) en la región de Quitovac, propusieron dos tipos bien diferenciados de rocas paleoproterozoicas utilizando estudios geocronológicos e isotópicos de Sm-Nd. En general, las rocas de esta región tienen edades U-Pb en zircones entre 1,696 y 1,725 Ma con valores iniciales de ϵNd entre +2 y +4 y con edades modelo $\text{Nd } T_{\text{DM}}$ entre 1.65 y 1.8 Ga. De acuerdo con las edades y firmas isotópicas de Nd, las rocas más orientales en esa región se relacionan con las de la provincia Mazatzal, mientras que las más occidentales lo están con las de la provincia Yavapai de Arizona. Muy cerca de esta región se realizaron estudios geológicos en la Sierra Hornaday y se obtuvieron edades de rocas gnéissicas de entre 1,643–1,651 Ma (Espinoza et al., 2005). Justo al sur de Sierra Hornaday, en el Cerro El Águila, también se obtuvo una edad del granito del mismo nombre en $1,697 \pm 12$ Ma (Premo et al., 2003). En la zona de Andrade Quarry (Pilot Knob), justo en la intersección entre los estados de California, Arizona y Baja California, se obtuvo una edad de $1,672 \pm 11$ Ma para una roca gnéissica (Premo et al., 2003). Por último, en la zona de Quitobaquito Hills, dentro del Organ Pipe National Monument en Arizona, se fechó una roca gnéissica de $1,749 \pm 23$ Ma (Premo et al., 2003).

Amato y colaboradores (2008) reportan rocas paleoproterozoicas similares a las de la provincia Yavapai en la región del Rancho La Lámina, cerca de Cucurpe, aproximadamente a 40 km al norte de la postulada megacizalla Mojave-Sonora en el norte-centro de Sonora. Los granitoides paleoproterozoicos en esta localidad tienen edades U-Pb en zircones de 1,763, 1,738 y 1,737 Ma con valores iniciales de ϵNd de +0.5, +1.4 y -4.3, respectivamente, y edades modelo de $\text{Nd } T_{\text{DM}}$ entre 2.07–2.74 Ga.

Otros trabajos más recientes de caracterización temporal, geoquímica e isotópica del basamento paleoproterozoico del NW de Sonora incluyen los realizados en Sierra Prieta y Cerro Prieto-Carina (Izaguirre-Pompa e Iriondo, 2007; Izaguirre et al., 2008; Izaguirre-Pompa, 2009), los de Cerros San Luisito (Gutiérrez-Coronado et al., 2008) y los de Zona Canteras-Puerto Peñasco (Arvizu-Gutiérrez, 2008; Arvizu et al., 2009) (Figura 2) sugiriendo la existencia de basamento tipo Yavapai para todas estas áreas. Para la región de Cerro Prieto-Carina, las rocas alcanzan edades U-Pb en zircones entre 1,682 y 1,687 Ma con valores de ϵNd entre +0.52 y +1.7 y edades modelo $\text{Nd } T_{\text{DM}}$ entre 1.80 y 1.91 Ga, mientras que para la región de Cerros San Luisito, la edad de las rocas varía entre los 1,676–1,712 Ma, las cuales muestran valores iniciales de ϵNd de +1.13 a +2.87 con correspondientes edades modelo $\text{Nd } T_{\text{DM}}$ entre 1.76–1.91 Ga. Por último, gneises bandeados de la zona Canteras-Puerto Peñasco tienen edades de $1,764 \pm 3$ Ma y $1,725 \pm 3$ Ma con valores de ϵNd de +0.66 y -0.57 con edades modelo $\text{Nd } T_{\text{DM}}$ entre 1.97 y 2.02 Ga, respectivamente (Arvizu et al., 2009).

En el Cerro Rajón, al este del Rancho Bámuri, se encuentra un intrusivo con una edad U-Pb de $1,703 \pm 12$ Ma (Premo et al., 2003), que inicialmente fue reportada como una roca mesoproterozoica (~1.4 Ga) basándose en extrapolaciones por su textura de grandes fenocristales de feldespato potásico (Stewart et al., 1984). Farmer y colaboradores (2005) también fecharon esta unidad granítica en $1,699 \pm 2$ Ma y determinaron valores ϵNd de +0.17 y edades modelo de $\text{Nd } T_{\text{DM}}$ de 1.93 Ga, que nosotros clasificamos como perteneciente a la suite de rocas Yavapai de Sonora. Una muestra de granito recolectada en el km 100 de la carretera estatal 15 de Sonora ha arrojado una edad de U-Pb de ~1.72 Ga (S. Herrera-Urbina, comunicación personal). También está reportada la presencia de basamento paleoproterozoico en la Sierra Mazatán, donde se obtuvo edades de U-Pb en rocas graníticas de ~1.68 Ga (R. Vega-Granillo, comunicación personal). Los trabajos geológicos combinados con geocronología e isótopos radiogénicos de Sm-Nd realizados en la región del Rancho Bámuri, Cerros El Tecolote y La Tortuga, al sur de Caborca (Figura 7A; Premo et al., 2003; Castiñeiras et al., 2004a, b, 2005a; Dórame-Navarro et

al., 2004; Dórame-Navarro e Iriondo, 2005; Farmer et al., 2005; Silver y Anderson, 2005) señalan que las rocas presentes en esas regiones se correlacionan con las de la provincia Mojave del SE de California y NW de Arizona (Figura 2). Las edades U-Pb de cristalización en zircones varían de 1,765–1,780 Ma con valores iniciales de ϵNd entre +0.5 y -5.0. Por otro lado, las rocas de basamento paleoproterozoico de la Sierrita Prieta, al oeste de Benjamín Hill, también presentan características similares a las rocas de la provincia Mojave, proponiendo de igual manera la continuación de esta provincia hacia el NW de México (Herrera-Urbina et al., 2005; Soto-Verdugo, 2006). Estas rocas tienen edades U-Pb en zircones un poco más jóvenes que las de la región del Rancho Bámuri, entre 1,727–1,733 Ma, y presentan valores iniciales de ϵNd entre -1.1 y -0.5 con correspondientes edades modelo Nd T_{DM} entre 2.0 y 2.1 Ga (Soto-Verdugo, 2006).

Por último, hay que mencionar que todos los datos isotópicos de Nd de rocas ígneas paleoproterozoicas de Sonora, mencionados anteriormente, combinados con las edades de U-Pb en zircones, han permitido generar un gráfico de evolución de Nd (Figura 8) que, combinado con otras características geológicas y geoquímicas, permite clasificar estas rocas paleoproterozoicas de Sonora en diferentes provincias corticales (Mojave, Yavapai y Mazatzal).

4.2.3 Magmatismo mesoproterozoico en Sonora (pulsos ~ 1.4 Ga y ~ 1.1 Ga)

El pulso granítico mesoproterozoico de ~ 1.4 Ga presente en Sonora sirvió para estabilizar el orógeno al permitir el sellado (cosido) de las suturas formadas por la colisión de arcos de islas paleoproterozoicos acrecionados que, en sí, tendrían la tendencia a la ruptura por *rifting* continental durante los periodos de extensión cortical. Los primeros fechamientos de este pulso granítico anorogénico (granitos tipo A) en Sonora fueron realizados en el granito Cananea con una edad U-Pb en zircones de $1,440 \pm 15$ Ma (Anderson y Silver, 1977a). Más recientemente, estos mismos datos geocronológicos han sido recalculados por Anderson y Silver (2005) y la nueva edad para el granito Cananea según estos autores es de $1,427 \pm$

100 Ma. Nuevos fechamientos U-Pb en zircones de esta unidad granítica por Noguez-Alcántara (2008) sugieren edades de $1,411 \pm 9$ Ma y $1,407 \pm 9$ Ma para muestras del granito Cananea con grano grueso y fino, respectivamente. En la zona de Cerros Las Mesteñas y Sierra Los Ajos en el NE de Sonora, Herrera-López y colaboradores (2005) reportan una edad U-Pb en zircones de ~ 1.44 Ga para el granito Mesteñas. Otros granitos de esta edad también ocurren en las localidades de Cuaquiarachi, Pulpito y Valdeza (Anderson y Silver, 2005).

Otras ocurrencias de estos granitos son las fechadas por Nourse y colaboradores (2005) en la zona NW del Pinacate: $1,432 \pm 6$ Ma (Choclo Duro). Los granitos Mohak Pass y O'Neill Hills, que se localizan cerca del Pinacate (Figura 7E), también tienen estas edades de ~ 1.4 Ga (J. Nourse, comunicación personal). Una muestra de granito recolectada en el km 100 de la carretera estatal 15 de Sonora, que intrusión a la muestra paleoproterozoica antes discutida, ha arrojado una edad de U-Pb de ~ 1.4 Ga (Castiñeiras et al., 2005b), mientras que granitos de edades similares han sido también fechados en la zona del Cerro Colorado (Anderson y Silver, 2005; A. Iriondo, datos no publicados) y La Salada (J. Nourse, comunicación personal). En la zona de Tuape, en el Rancho Santa Margarita, se fechó un canto rodado de granito (gravas monolíticas) con una edad de U-Pb de $1,411 \pm 8$ Ma (A. Iriondo, datos no publicados).

El otro evento magmático mesoproterozoico en Sonora de edad ~ 1.1 Ga es el representado por lo que conocemos como granitos Aibó y las anortositas El Tecolote. El granito Aibó, que recibe su nombre por el rancho del mismo nombre, localizado al SSW de Caborca, ocasionalmente presenta una textura micrográfica (Anderson et al., 1979). Este granito del Rancho Aibó ha sido fechado por diferentes autores en $1,100 \pm 10$ Ma por Anderson y colaboradores (1979), en $1,079 \pm 18$ Ma por Iriondo y colaboradores (2003), en $1,075 \pm 1$ Ma por Farmer y colaboradores (2005) y, por último, en $1,091 \pm 54$ Ma por Anderson y Silver (2005).

Otras ocurrencias de granitos Aibó en Sonora (Figura 7F) incluyen las localidades de Quitovac donde se encuentra el granito Bustamante (Iriondo, 2001; Iriondo et al., 2004), Sierra Los Tanques (Irion-

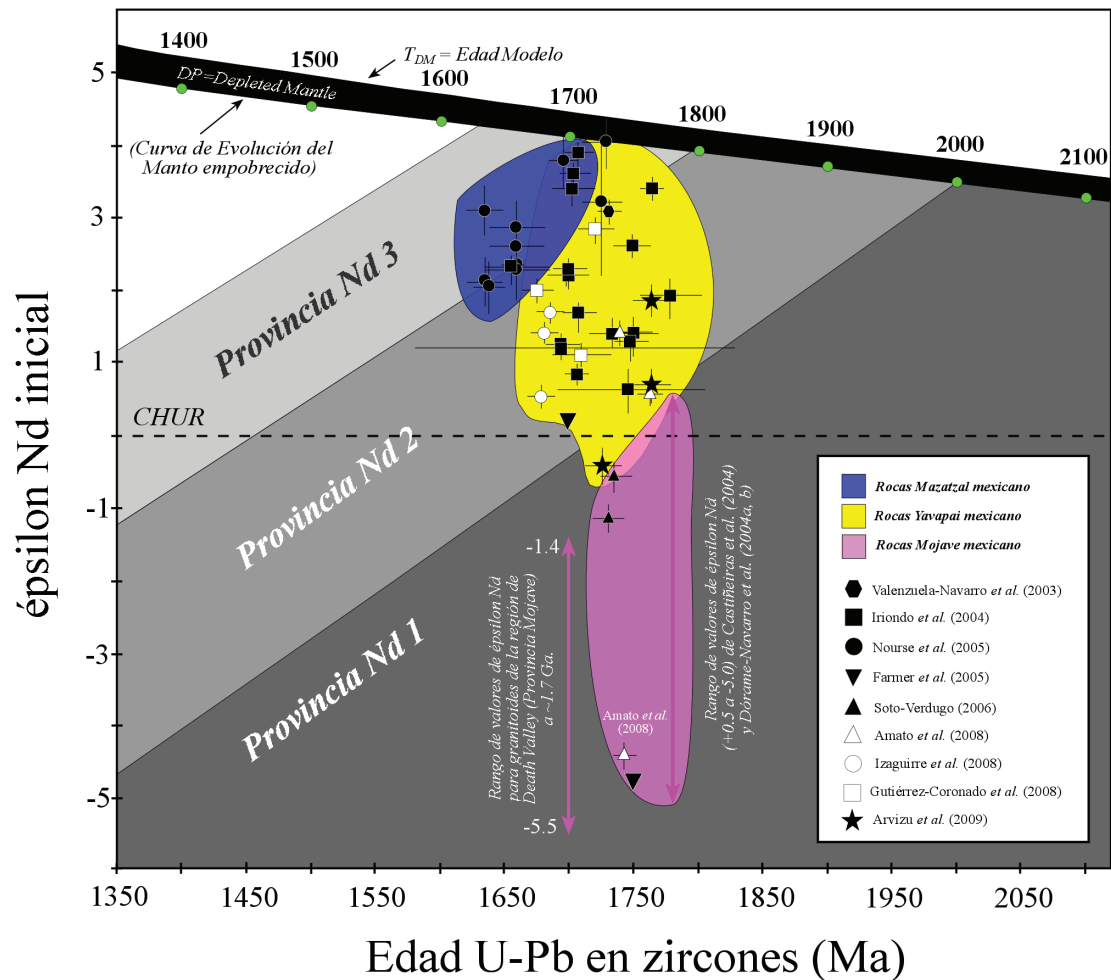


Figura 8. Diagrama de evolución del Nd (valores iniciales de ϵNd vs. edad U-Pb de cristalización) para rocas ígneas paleoproterozoicas del basamento del NW de Sonora en diferentes regiones bajo estudio (figura modificada de Arvizu et al., 2009). Datos de Valenzuela-Navarro et al., 2003 para El Crestón; Iriondo et al., 2004 para Quitovac; Castiñeiras et al., 2004a, b, y Farmer et al., 2005 para la región del Rancho Bámuri; Dórame-Navarro et al., 2004 para la zona El Tecolote; Nourse et al., 2005 para Pinacate-Cabeza Prieta; Soto-Verdugo, 2006 para Sierrita Prieta; Amato et al., 2008 para La Lámina; Gutiérrez-Coronado et al., 2008 para Cerros San Luisito; Izaguirre et al., 2008 para Cerro Prieto-Carina; Arvizu et al., 2009 para Zona Canteras-Puerto Peñasco). En tonos de gris, campos para las provincias de Nd según Bennett y DePaolo (1987). Curva de evolución del manto empobrecido a partir de DePaolo (1981). Rango de valores iniciales de ϵNd a ~ 1.7 Ga para granitoides de la región de Death Valley (Provincia Mojave) según Rämö y Calzia (1998).

do et al., 2008), granito Murrieta en la Sierrita Blanca (Enriquez-Castillo, 2008; Enriquez-Castillo et al., 2009), Cerro Prieto-Carina (Izaguirre et al., 2008), Sierra Prieta (Izaguirre-Pompa e Iriondo, 2007), Santa Margarita (Anderson et al., 1984; Anderson y Silver, 2005), y por último, en la zona de Cucurpe donde encontramos el granito Escuadra, también conocido como granito Pozito (Anderson y Silver, 2005; Amato et al., 2005).

Las anortositas mesoproterozoicas (~ 1.1 Ga) El Tecolote, presentes en la mitad norte de Sonora (Figura 7F), fueron descritas inicialmente por Merriam (1972) y posteriormente caracterizadas petrográficamente y geoquímicamente por Koehnken (1976). Pero no fue hasta que Espinoza y colaboradores (2003) fecharan por U-Pb en zircones ($1,095 \pm 28$ Ma) la ocurrencia anortositica en la región de El Tecolote, justo al oeste del Rancho Bámuri, cuando se supo su relación tem-

poral con los granitos Aibó. De esta manera, éste es un magmatismo bipolar (granito-anortosita) y sabemos, por relaciones de campo, que las anortositas son más tardías que los granitos, ya que éstas claramente intrusionan a los granitos como se ejemplifica en la zona de Sierrita Blanca (Enríquez-Castillo, 2008) y Sierra Prieta (Izaguirre-Pompa e Iriondo, 2007). Estas unidades de granitos y anortositas en la Sierra Prieta intrusionan a una secuencia metasedimentaria compuesta principalmente por cuarcitas que, por acotamiento geocronológico, se estima tengan una edad de ~1.2 Ga, que representa la edad de depósito de los sedimentos (Izaguirre-Pompa e Iriondo, 2007). Otras ocurrencias de anortositas en Sonora (Figura 7F) incluyen Llano Verde, El Taconazo, La Y Griega y están descritas en Campillo-Castelo (2008).

Anderson y Silver (1997) proponen que existe una relación espacial de los granitos Aibó con encajonantes paleoproterozoicos del bloque Caborca. Nosotros vamos más lejos y proponemos, de forma más específica, que tanto los granitos Aibó como las anortositas El Tecolote se asocian espacialmente con las rocas de la provincia Yavapai de Sonora (Figura 7F). Como lo explicaremos más adelante, las rocas de la provincia Yavapai de Sonora representan una zona de debilidad cortical que permitió y/o facilitó el ascenso de estos magmas mesoproterozoicos hasta niveles más superficiales.

Todas estas edades de U-Pb en zircones, reportadas para rocas del basamento proterozoico de Sonora, servirán, entre otras muchas cosas, para desarrollar un marco de referencia para los estudios de proveniencia sedimentaria a partir de geocronología U-Pb de zircones detríticos. Estos estudios permitirán proponer ambientes paleogeográficos de la región desde el Neoproterozoico-Paleozoico (Gehrels et al., 1995; Gehrels y Stewart, 1998; Stewart et al., 2001, 2002; Farmer et al., 2001, 2005) hasta el Mesozoico y el Terciario (Gehrels y Stewart, 1998; González-León et al., 2005; Jacques-Ayala et al., 2005, 2009).

5. EL BLOQUE CABORCA: VARIAS CORTEZAS PALEOPROTEROZOICAS

Como discutimos anteriormente, el concepto de bloques de basamento cristalino en Sonora (Figura 2; blo-

ques Caborca y “Norteamérica”), establecidos inicialmente a partir de diferencias de edades de cristalización U-Pb en zircones, no es justificado por el solapamiento existente en las edades U-Pb de las rocas de ambos bloques entre 1.71–1.65 Ga (Figura 4). Como ya lo adelantaron Iriondo y Premo (2003), el bloque Caborca, que fue presentado inicialmente por Anderson y Silver en los años 70 y detallado más tarde por Anderson y Silver (2005), está compuesto por diferentes estilos de basamento que son correlacionables mediante estudios geológicos, geoquímicos e isotópicos, con los de las provincias del SW de Laurencia.

En particular, vemos que, en mayor medida, este bloque Caborca está compuesto por corteza Yavapai y Mojave (Figura 7D) y, en menor medida, por corteza con características Mazatzal. Por esta razón sugerimos que el concepto de bloque Caborca, como lo establecieron originalmente Anderson y Silver, desaparezca por su difícil justificación geológica. En sustitución, proponemos el empleo de los términos Yavapai mexicano, Mojave mexicano y Mazatzal mexicano para referirnos a las rocas paleoproterozoicas presentes en Sonora. Esta sugerencia permitirá comunicarnos de forma más efectiva con nuestros colegas de Estados Unidos, además de permitir reflexiones geológicas de mayor envergadura como lo serían las reconstrucciones del supercontinente Rodinia (Figura 1).

La combinación de todos estos estudios del basamento de Sonora también nos ha permitido extender hacia México los límites de las provincias isotópicas de Nd (Figura 9) propuestas para el basamento del SW de Estados Unidos por Bennett y DePaolo (1987). A partir de estudios de Sm-Nd en rocas de Sonora marcamos el límite entre las provincias Mojave y Yavapai mexicanas como el límite que separaría la provincia Nd1 de la provincia Nd2. La provincia Nd3 estaría representada por las rocas del Mazatzal mexicano. Estas diferencias de basamentos paleoproterozoicos de Sonora también quedan bien ilustradas mediante el diagrama de evolución de Nd que grafica los valores de ϵ_{Nd} inicial vs. la edad de cristalización obtenida por geocronología U-Pb en zircones (Figura 8). En este gráfico, adaptado de Arvizu et al. (2009), observamos agrupaciones correspondientes a las tres provincias paleoproterozoicas presentes en Sonora. Las muestras que consideramos

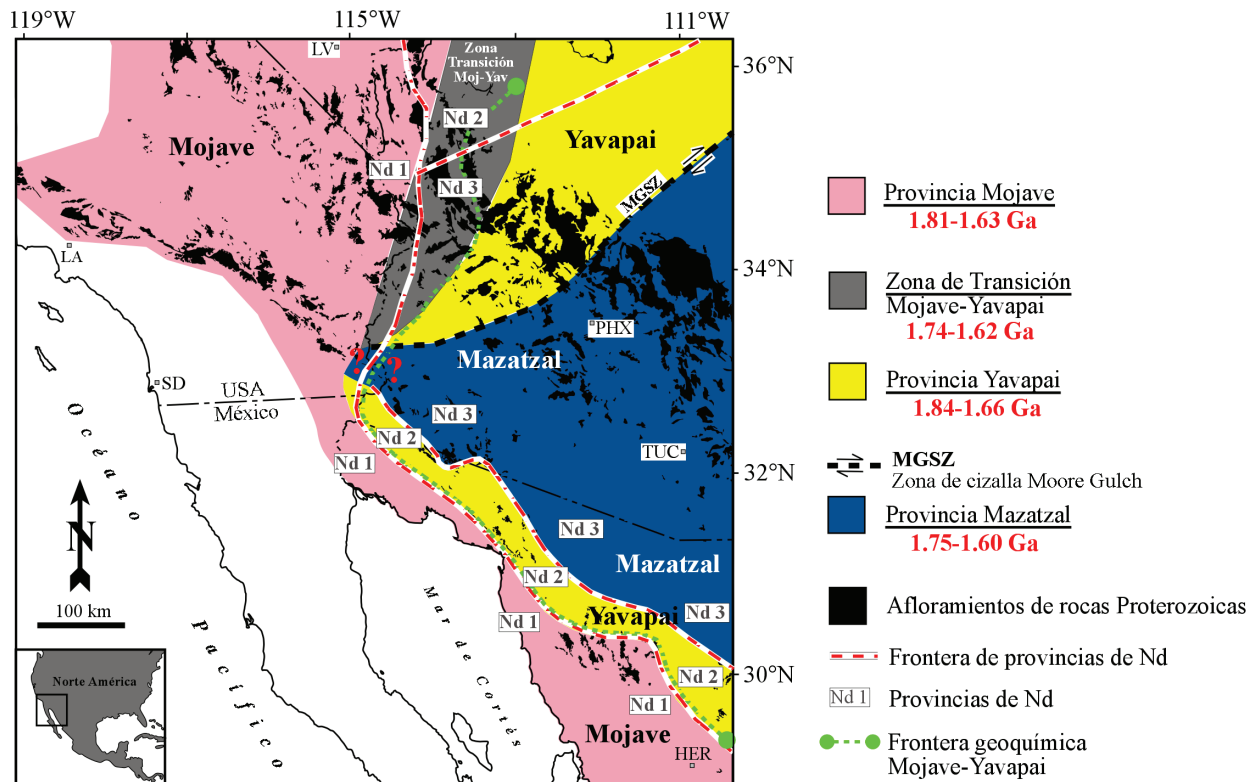


Figura 9. Distribución tentativa de las provincias paleoproterozoicas Mojave, Yavapai y Mazatzal en el SW de Laurentia, incluyendo los afloramientos del NW de México. El rango de edades de cristalización para cada una de las provincias está basado en la recopilación de edades mostrado en la Figura 4. También se presenta, de forma tentativa, la extensión de la traza de fronteras de Nd y de las series geoquímicas al internarse hacia México.

comparten características geoquímicas e isotópicas con las rocas de la provincia Mazatzal se agrupan básicamente en el campo de la provincia Nd3 (Figura 8). Las muestras con características Yavapai se agrupan claramente en el campo de la provincia Nd2, mientras que las de características similares a las de las rocas presentes en la provincia Mojave se agrupan en el campo asociado a la provincia Nd1.

También extendemos hacia México la frontera composicional geoquímica de rocas plutónicas paleoproterozoicas (Figura 9) establecida por Anderson et al. (1993) y Bender (1994). Trazamos esta frontera justo en la zona de contacto (sutura) entre las provincias Mojave y Yavapai mexicanas (Figura 7B). Los granitos paleoproterozoicos de la provincia Yavapai mexicana son calcialcalinos formados en un ambiente de arco volcánico, mientras que los de la provincia Mojave mexicana se asocian a granitos más enriquecidos y formados en ambientes de intraplaca.

6. LA ZONA DE DEBILIDAD CORTICAL YAVAPAI

Iriondo (2005, 2007) sugiere que la agrupación de rocas paleoproterozoicas con características Yavapai en Sonora, que mantienen una dirección estructural predominantemente NW-SE (Figura 9), han podido actuar como una zona de debilidad cortical desde el Paleoproterozoico que pudo haber condicionado notablemente los eventos geológicos subsecuentes presentes en Sonora como lo son (1) el alineamiento NW-SE de granitos y anortositas mesoproterozoicas (~1.1 Ga); (2) la orientación del *rifting* continental durante la ruptura del supercontinente Rodinia; (3) la ubicación preferencial para el emplazamiento del magmatismo y la formación de cuencas sedimentarias mesozoicas; (4) la zona de despegue de cabalgaduras laramídicas; (5) la canalización de fluidos metamórficos para la formación del cinturón de Au orogénico laramídico; (6) la ubicación preferencial para el magmatismo terciario, principal-

mente vulcanismo; (7) la orientación de la extensión que formó las grandes fallas normales de tipo *metamorphic core complex* y *basin and range* que, en algunos casos, pudieran ser el resultado de la reactivación de estructuras previas, más antiguas, y que controlan la topografía actual de la región; (8) la orientación de la apertura (*rifting*) del Golfo de California; y, quizá, (9) la presencia de magmatismo máfico cuaternario (e. g., Campo volcánico Pinacate).

Esta zona de debilidad cortical representa un concepto novedoso y conciliador para explicar algunos aspectos de la evolución geológica de Sonora y podrá fácilmente someterse al escrutinio por parte de la comunidad científica.

7. MODELO TECTÓNICO DE AMALGAMA DE ARCOS DE ISLAS: FORMACIÓN DE LAS PROVINCIAS PALEOPROTEROZOICAS DEL SW DE LAURENCIA

Para explicar cómo se formaron las provincias corticales del SW de Laurencia (Figura 9; Mojave, Yavapai y Mazatzal) existe un modelo tectónico basado en la amalgama de arcos de islas a una zona continental (Whitmeyer y Karlstrom, 2007). Esta zona continental consta de un núcleo neoarqueano (Provincias Superior y Wyoming) y una zona externa hacia el sur, compuesta por la provincia paleoproterozoica Mojave (Figura 10A). Aún no existe consenso sobre lo que representaría la provincia Mojave a nivel de ambiente tectónico en el Paleoproterozoico, pero se piensa que esta provincia tuvo que estar relativamente cerca de la provincia Wyoming por la contaminación cortical neoarqueana que presentan las rocas paleoproterozoicas de esa provincia. Esta contaminación se manifiesta en las elevadas edades modelo de Nd y ocasionalmente como núcleos heredados de zircón en rocas ígneas y/o también como zircones detríticos en secuencias metasedimentarias.

Presentamos un modelo de acreción de arcos de islas equivalente pero muy esquematizado para visualizar esta evolución y desarrollo de las provincias corticales presentes en la parte SW de Laurencia, incluyendo las rocas paleoproterozoicas de Sonora (Figura 10). En primer lugar, el cierre del océano existente entre la zona continental (combinación de provincias Mojave

y Wyoming) y el arco de islas Yavapai, y su pequeño arco subordinado que llamamos arco Caborca (Figura 10A), produce la primera colisión arco-continente en la región (Sutura 1; Figura 7B). Esta colisión lleva implícita una intensa deformación que se conoce como la orogenia Yavapai (~1.70 Ga). Una vez suturado el arco al continente, estas rocas pasan a formar parte de lo que llamamos la provincia Yavapai (Figura 7B). Las rocas del arco Caborca presentan características Yavapai pero quizá representen miembros más evolucionados; aparentemente los cambios de composición a lo largo de los arcos de islas son comunes. Subsecuentemente, el océano existente entre la provincia Yavapai y el arco de islas Mazatzal también se va cerrando hasta que se produce otra colisión arco-continente (Sutura 2; Figura 7C) que permite la amalgama del arco Mazatzal para formar la provincia Mazatzal, evento que lleva asociada una deformación denominada como orogenia Mazatzal (~1.67–1.63 Ga).

Este modelo de acreción-amalgama de arcos de islas paleoproterozoicos (~1.8–1.6 Ga) es visto por algunos autores como inadecuado, incompleto o incluso simplista (Hill y Bickford, 2001; Duebendorfer et al., 2006; Bickford y Hill, 2007; Bickford et al., 2008). Estos autores consideran que pudieran existir otros mecanismos para la formación de corteza continental además de la acreción de arcos de islas. Los procesos de generación de corteza continental bajo ambientes extensionales como, por ejemplo, en cuencas de *rift* intracontinental, que agregarían nueva corteza sobre la corteza preexistente más vieja para formar estos basamentos, serían uno de estos mecanismos. Lógicamente, estas ideas tendrán que tenerse en cuenta para explicar la formación de uno de los orógenos más importantes del mundo, el SW de Laurencia.

8. EL DOBLEZ OROCLINAL CABORCA: UNA ALTERNATIVA A LA MSM EN SONORA

La nueva distribución de provincias paleoproterozoicas en el NW de México (Figura 9) presentada en este artículo, a partir de ideas de Iriondo (2005, 2007), permite observar una orientación geológica preferencial NW-SE del orógeno paleoproterozoico en Sonora, que contrasta bruscamente con la orientación general

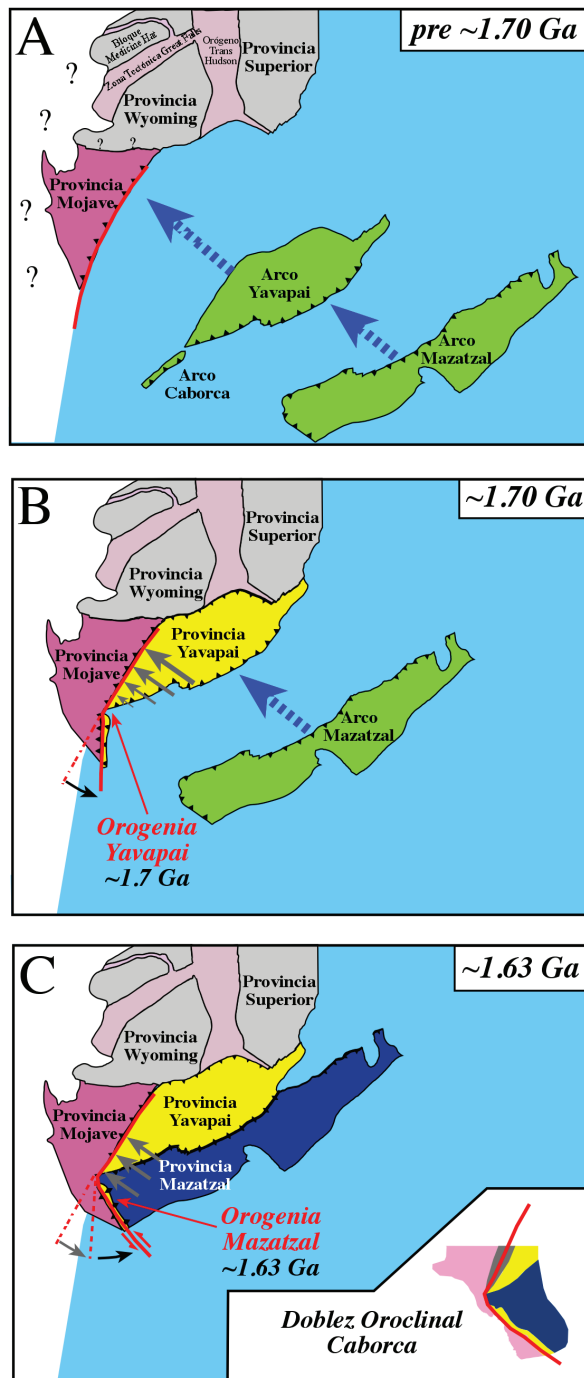


Figura 10. Propuesta esquematizada de la evolución tectónica donde se muestra la amalgama de arcos volcánicos al continente (arcos Yavapai-Caborca y Mazatzal) para llegar a la distribución tentativa de provincias corticales paleoproterozoicas propuesta en la Figura 9. Esta propuesta también ilustra, por efecto de colisión arco-continente, un posible proceso para explicar la formación del doblez oroclinal Caborca que se discute en el texto. Polígonos del gráfico basados en comunicación escrita de K.E. Karlstrom (2005) y en Whitmeyer y Karlstrom (2007).

NE-SW mostrada por las rocas de las provincias paleoproterozoicas del SW de Estados Unidos (Figuras 1 y 9). Iriando (op. cit.) utiliza este hecho para proponer una hipótesis que sugiere la existencia de un doblez oroclinal abrupto en la parte mexicana del SW de Laurentia que llama el “doble oroclinal Caborca”. Este doblez podría resultar de la colisión, quizá con carácter oblicuo, de los arcos volcánicos de islas Yavapai y Mazatzal contra una corteza preexistente con características Mojave (Figuras 10B y C). También cabe destacar que el arco Yavapai presenta una gran diferencia de masa a lo largo del mismo produciéndose un adelgazamiento significativo en su parte más suroccidental, lo que podría hacer que el empuje durante la colisión arco-continente fuera algo menor que en su parte SW, facilitando el doblez de las rocas de la provincia Yavapai mexicana (Figura 10B). La siguiente colisión del arco Mazatzal podría haber magnificado la curvatura del orógeno adquirida durante la primera colisión (Figura 10C).

Este doblez oroclinal Caborca representaría una solución alternativa al concepto de la megacizalla Mojave-Sonora para explicar la ocurrencia de basamento paleoproterozoico tipo Yavapai en el NW de México (Figura 6). En esta nueva alternativa, las rocas de basamento Yavapai y Mojave en Sonora (antiguo bloque Caborca) serían autóctonas con respecto al basamento Mazatzal y, por lo tanto, no requerirían de los desplazamientos de cientos de kilómetros a lo largo de la hipotética megacizalla. Es importante destacar que nosotros llegamos a esta idea del doblez oroclinal Caborca de forma totalmente independiente del concepto de doblez discurrido en los años 70 (Figuras 5 y 6) y posteriormente presentado por Anderson y Silver (2005).

Lógicamente, más trabajo geológico y geofísico en estas rocas proterozoicas del SW de Laurentia, incluyendo las rocas de Sonora, será necesario para esclarecer ésta y otras muchas ideas existentes en la actualidad sobre la formación y evolución de las rocas proterozoicas, las más antiguas de México.

9. CONCLUSIONES

Una nueva etapa de estudios geocronológicos, geoquímicos e isotópicos del basamento cristalino proterozoi-

co de Sonora, realizada en los últimos años, ha permitido establecer una hipótesis sobre la distribución de provincias paleoproterozoicas en el NW de México y su relación con las provincias existentes en el SW de Estados Unidos. Más específicamente, en Sonora tenemos por lo menos tres tipos de basamento paleoproterozoico correspondientes a las provincias Mojave, Yavapai y Mazatzal que, a partir de ahora, recomendamos nombrarlas añadiendo la palabra “mexicano” (e. g., Yavapai mexicano, etc.) para dejar claro que nos referimos a rocas paleoproterozoicas de la parte mexicana del margen SW de Laurencia.

Proponemos que el concepto de bloque Caborca debe desaparecer ya que este bloque no consta de un basamento homogéneo como se pensaba inicialmente, sino que contiene rocas relacionadas tanto con la provincia Mojave como con la Yavapai e, incluso, pero en menor medida, con la provincia Mazatzal. A pesar de esto, pensamos que el nombre Caborca tiene una connotación geográfica y geológica muy importante y que sería conveniente salvarlo utilizándolo para denotar el doblez que adquieren las provincias paleoproterozoicas al adentrarse hacia Sonora—el doblez oroclinal Caborca.

También proponemos la existencia de una zona de debilidad cortical paleoproterozoica en Sonora, asociada espacialmente a las rocas de la provincia Yavapai, que pudo haber condicionado notablemente algunos eventos geológicos desde tiempos proterozoicos hasta el Cuaternario y que permite conciliar muchos aspectos de la geología del NW de México.

Por último, cabe destacar que estos avances del conocimiento sobre el basamento proterozoico del NW de México permiten proponer una plantilla geológica del margen continental del SW de Laurencia muy concreta que podrá ser utilizada por investigadores de otros continentes (márgenes) interesados en reconstruir el gran rompecabezas del supercontinente Rodinia. Nosotros no favorecemos alguna de las reconstrucciones propuestas hasta la fecha, por lo que esperamos que la presente contribución despierte el interés de nuevas generaciones de geólogos mexicanos por participar en futuros estudios del Proterozoico del NW de México.

10. AGRADECIMIENTOS

Muchas de las ideas presentadas en este artículo han sido forjadas a lo largo de muchos años de trabajo y, sin duda, son el resultado de numerosas conversaciones con colegas y amigos que trabajan en la geología del SW de América del Norte y que enumeramos de forma parcial a continuación. Iriondo agradece al Gobierno Vasco de España por otorgarle una beca doctoral (University of Colorado at Boulder) y otra postdoctoral (U.S. Geological Survey) para realizar estudios sobre el basamento proterozoico en el NW de Sonora. Queremos agradecer a los proyectos PAPIIT/UNAM (clave IN113906-3) y CONACYT (clave CB52163) otorgados a Iriondo por el apoyo brindado para realizar estos estudios de basamento. Habría que destacar la ayuda incondicional de numerosos investigadores del U.S. Geological Survey que han permitido el uso de sus laboratorios para realizar determinaciones analíticas de rocas sonorenses. Las empresas Hecla Mining Company y Minera Peñoles ayudaron económica y logísticamente para el desarrollo de las campañas de campo. Algunas de las personas a quienes quisiéramos agradecer son Francisco Paz, Saúl Herrera, Lupe Espinosa y Ricardo Vega de la Universidad de Sonora en Hermosillo; Martín Valencia, Thierry Calmus, César Jacques y José Luis Rodríguez de la Estación Regional del Noroeste de la Universidad Nacional Autónoma de México en Hermosillo; Benito Noguez de Servicios Industriales Peñoles; Pedro Herrera del CESUES de Hermosillo; Bill Atkinson, Lang Farmer y Pedro Castiñeiras de la University of Colorado at Boulder; Doug Morton, Mick Kunk, Jim Budahn, Dan Miggins, Leonid Neymack, Heather Lowers, Ric Page, Barney Poole, John Aleinikoff, Paul Sims, Dave Siems (fallecido), Ed DeWitt y Joe Wooden del U.S. Geological Survey; Jon Nourse del California State Polytechnic University, Pomona; Karl Karlstrom de la University of New Mexico, Albuquerque; Ernie Duebendorfer de la Northern Arizona University, Flagstaff; Tim Lawton y Jeff Amato de la New Mexico State University, Las Cruces; Tom Anderson y Chris Connors de la University of Pittsburgh; Andy Barth de la Indiana University, Purdue; Koldo Martínez de la Universidad del País Vasco en Bilbao; Roberto Molina, Aldo Izaguirre, Harim Arvizu, Mónica

Enríquez y Miguel Dórame, del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México en Querétaro. También agradecemos a la familia Vásquez de Sonoyta por su amabilidad hospedando a Iriondo en su hotel durante numerosas visitas al campo en la zona de Quitovac. Por último, Iriondo quisiera agradecer a Paul Damon (fallecido), de la University of Arizona, Tucson, por su entusiasmo contagioso hacia la geocronología y por sus consejos para seguir trabajando en la problemática geológica de Sonora donde él invirtió parte de su gran intelecto. Gracias también a Saúl Herrera Urbina y Thierry Calmus por las correcciones y sugerencias realizadas a nuestro manuscrito que han permitido mejorarlo sustancialmente.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albin, A.A.; Shastri, L.L.; Bowring, S.A.; y Karlstrom, K.E., 1991, Geologic and geochronologic data from the Gneiss Canyon shear zone of NW Arizona—timing and development of orthogonal fabrics: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 23, p. 1 (resumen).
- Amato, J.; Lawton, T.; Leggett, W.; Mauel, D.; González-León, C.M.; Heizler, M.; y Farmer, G.L., 2008, Caborcan Proterozoic basement in The Rancho La Lamina region, Sonora, Mexico—U-Pb ages, Nd isotopic composition, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology, and clast provenance indicate pre-Early Jurassic arrival and Laramide exhumation: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 40, núm. 1, p. 48 (resumen).
- Amato, J.; Lawton, T.; y Mauel, D., 2005, Single-grain zircon ages from Proterozoic plutons in the Rancho La Lamina region, Sonora, Mexico—implications for the Mojave-Sonora megashear hypothesis: *GEOS, Unión Geofísica Mexicana, Resúmenes y Programa*, v. 25, núm. 1, p. 101 (resumen).
- Anderson, J.L., 1983, Proterozoic anorogenic granite plutonism of North America, *in* Medaris, L.G.; Mickelson, D.M.; Byers, C.W.; y Shanks, W.C., eds., *Proterozoic geology: Geological Society of America Memoir 161*, p. 133–154.
- Anderson, J.L., y Bender, E.E., 1989, Nature and origin of Proterozoic A-type granitic magmatism in the southwestern United States: *Lithos*, v. 23, p. 19–52.
- Anderson, J.L., y Morrison, J., 1999, 1.4 Ga peraluminous granites of the western U.S.—an anorogenic analogue of S-type granites: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 31, p. 261 (resumen).
- Anderson, J.L.; Wooden, J.L.; y Bender, E.E., 1993, Mojave Province of southern California and vicinity, *in* Van Schmus, W.R., et al., eds., *Transcontinental Proterozoic provinces*, *in* Reed, J.C., Jr.; Bickford, M.E.; Houston, R.S.; Link, P.K.; Rankin, D.W.; Sims, P.K.; y Van Schmus, W.R., eds., *Precambrian—conterminous U.S.: Boulder, Colo., Geological Society of America, The Geology of North America C-2*, p. 176–188.
- Anderson, T.H., y Schmidt, V.A., 1983, The evolution of Middle America and the Gulf of Mexico-Caribbean Sea region during Mesozoic time: *Geological Society of America Bulletin*, v. 94, p. 941–966.
- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 1977a, U-Pb isotope ages of granitic plutons near Cananea, Sonora: *Economic Geology*, v. 72, p. 827–836.
- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 1977b, Geochronometric and stratigraphic outlines of the Precambrian rocks of northwestern Mexico: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 9, p. 880 (resumen).
- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 1978, The nature and extent of Precambrian rocks in Sonora, Mexico, *in* Roldán-Quintana, Jaime, y Salas, G.A., eds., *Resúmenes, Primer Simposio sobre la Geología y Potencial Minero en el Estado de Sonora: Hermosillo, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología*, p. 9–10 (resumen).
- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 1979, The role of the Mojave-Sonora megashear in the tectonic evolution of northern Sonora, *in* Anderson, T.H., y Roldán-Quintana, Jaime, eds., *Geology of northern Sonora: Geological Society of America Field Trip Guidebook 7*, p. 59–68.
- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 1981, An overview of Precambrian rocks in Sonora: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista*, v. 5, p. 131–139.
- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 1997, 1.1 Ga plutons in Sonora, Mexico—regional tectonic implications: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 29, p. 348 (resumen).
- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 2005, The Mojave-Sonora megashear—field and analytical studies leading to the conception and evolution of the hypothesis, *in* Anderson, T.H.; Nourse, J.A.; McKee, J.W.; y Steiner, M.B., eds., *The Mojave-Sonora megashear hypothesis—development, assessment, and alternatives: Geological Society of America Special Paper 393*, p. 1–50.
- Anderson, T.H.; Bajek, D.T.; Chepega, J.R.; Ichikawa, K.M.; Rodríguez-Castañeda, J.L.; Stephens, W.E.; y Silver, L.T., 1984, Crystalline thrust sheets near the Mojave-Sonora megashear: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 16, p. 430 (resumen).
- Anderson, T.H.; Eells, J.L.; y Silver, L.T., 1979, Precambrian and Paleozoic rocks of the Caborca region, Sonora, Mexico, *in* Anderson, T.H., y Roldán-Quintana, Jaime, eds., *Geology of northern Sonora: Geological Society of America Annual Meeting Guidebook, trip 27*, p. 1–22.
- Arvizu-Gutiérrez, H.E., 2008, El basamento paleoproterozoico Yavapai-Mazatzal en los alrededores de la Sierra Pinta, NW Sonora—su importancia para el entendimiento del magmatismo pérmico y el inicio del margen continental activo de Norte América: *Linares, Universidad Autónoma de Nuevo León, tesis de licenciatura*, 181 p. (inédita).
- Arvizu, H.E.; Iriondo, Alexander; Izaguirre, Aldo; Chávez-Cabello, Gabriel; Kamenov, G.D.; Foster, D.A.; Lozano-Santa Cruz, Rufino; y Solís-Pichardo, Gabriela, 2009, Gneises bandeados paleoproterozoicos (~1.76–1.73 Ga) de la Zona Canteras-Puerto Peñasco—una nueva ocurrencia de rocas

- de basamento tipo Yavapai en el NW de Sonora, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 61, núm. 3, p. 375–402.
- Barth, A.P.; Wooden, J.L.; Tosdal, R.M.; Morrison, J.; Dawson, D.L.; y Hernly, B.M., 1995, Origin of gneisses in the aureole of the San Gabriel anorthosite complex and implications for the Proterozoic crustal evolution of southern California: *Tectonics*, v. 14, p. 736–752.
- Bender, E.E., 1994, Petrology of Early Proterozoic granitoids from the southwestern United States—implications for genesis and tectonics of the Mojave Crustal Province: Los Angeles, University of Southern California, disertación doctoral, 332 p. (inédita).
- Bennett, V.C., y DePaolo, D.J., 1987, Proterozoic crustal history of the western United States as determined by neodymium isotopic mapping: *Geological Society of America Bulletin*, v. 99, p. 674–685.
- Bergh, S.G., y Karlstrom, K.E., 1992, The Chaparral shear zone—deformation, partitioning and heterogeneous bulk crustal shortening during Proterozoic orogeny in central Arizona: *Geological Society of America Bulletin*, v. 104, p. 329–345.
- Bickford, M.E., y Hill, B.M., 2007, Does the arc accretion model adequately explain the Paleoproterozoic evolution of southern Laurentia?—an expanded interpretation: *Geology*, v. 35, núm. 2, p. 167–170.
- Bickford, M.E.; Mueller, P.A.; Kamenov, G.D.; y Hill, B.M., 2008, Crustal evolution of southern Laurentia during the Paleoproterozoic—insights from zircon Hf isotopic studies of ca. 1.75 Ga rocks in central Colorado: *Geology*, v. 36, núm. 7, p. 555–558.
- Bickford, M.E.; Soegaard, K.; Nielsen, K.C.; y McLelland, J.M., 2000, Geology and geochronology of Grenville age rocks in the Van Horn and Franklin Mountains area, west Texas—implications for the tectonic evolution of Laurentia during the Grenville: *Geological Society of America Bulletin*, v. 112, núm. 7, p. 1134–1148.
- Bond, G.C.; Christie-Blick, N.; Kominz, M.A.; y Devlin, W.J., 1985, An Early Cambrian rift to post-rift transition in the Cordillera of western North America: *Nature*, v. 316, p. 742–745.
- Borg, S.G., y DePaolo, D.J., 1994, Laurentia, Australia, and Antarctica as a Late Proterozoic supercontinent—constraints from isotopic mapping: *Geology*, v. 22, p. 307–310.
- Brookfield, M.E., 1993, Neoproterozoic Laurentia-Australia fit: *Geology*, v. 21, p. 683–686.
- Bryant, B.; DeWitt, E.; Wooden, J.L.; y Conway, C.M., 1994, The boundary between the Early Proterozoic Mojave and central Arizona crustal provinces, western Arizona: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 26, p. 6 (resumen).
- Burrett, C., y Berry, R., 2000, Proterozoic Australia-Western United States (AUSWUS) fit between Laurentia and Australia: *Geology*, v. 28, p. 103–106.
- Campillo-Castelo, J.A., 2008, Caracterización petrológica, mineralógica y geoquímica de las rocas anortosíticas del bloque Caborca, Sonora, México: Hermosillo, Universidad de Sonora, tesis de licenciatura, 84 p. (inédita).
- Carter, B., y Silver, L.T., 1972, Structure and petrology of the San Gabriel anorthosite-syenite body, California: *Congreso Geológico Internacional*, 24, Montreal, Canada, Section 2, p. 303–311.
- Castiñeiras, P.; Iriondo, Alexander; Dórame-Navarro, M.; Premo, W.R.; y Kunk, M.J., 2004a, Metamorphic evolution of the Bámuri Complex (Sonora, NW Mexico)—new insights from field and petrographic data: *Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra*, 4, Juriquilla, Querétaro, Libro de Resúmenes, p. 49 (resumen).
- Castiñeiras, P.; Iriondo, Alexander; Wooden, J.L.; Dórame-Navarro, M.; y Premo, W.R., 2004b, Detrital zircon U-Pb SHRIMP geochronology of Proterozoic quartzites from the Bámuri Complex, NW Sonora, Mexico—evidence for a Mojave connection: *IV Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra*, Juriquilla, Querétaro, Libro de Resúmenes, p. 215 (resumen).
- Castiñeiras, P.; Budahn, J.R.; Iriondo, Alexander; y Dórame-Navarro, M.A., 2005a, Geochemical characteristics of Proterozoic metasedimentary rocks from Bámuri and La Tortuga complexes, Mojave crustal province (NW Sonora, Mexico): *Actas INAGEQ*, v. 11, núm. 1, p. 110 (resumen).
- Castiñeiras, P.; Herrera-Urbina, S.; Paz-Moreno, F.A.; e Iriondo, Alexander, 2005b, SP89—a potential Mexican zircon standard for U-Pb geochronology using ion and laser probe techniques: *Actas INAGEQ*, v. 11, núm. 1, p. 99 (resumen).
- Conway, C.M., y Silver, L.T., 1989, Early Proterozoic rocks (1710–1615 Ma) in central to southeastern Arizona, *in* Jenney, J.P., y Reynolds, S.J., eds., *Geological evolution of Arizona: Arizona Geological Society Digest*, v. 17, p. 165–186.
- Cooper, G.A., y Arellano, A.R.V., 1946, Stratigraphy near Caborca, northwest Sonora, Mexico: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 30, p. 606–611.
- Damon, P.E.; Livingston, D.E.; y Giletti, B.J., 1961, Extension of the older Precambrian of the southwest into Sonora, Mexico: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 68, p. 158–159 (resumen).
- Damon, P.E.; Livingston, D.E.; Mauger, R.L., Giletti, B.J., y Pantoja-Alor, Jerjes, 1962, Edad del Precámbrico “Anterior” y de otras rocas del zócalo de la región de Caborca-Altar de la parte noroccidental del estado de Sonora: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín* 64, p. 11–44.
- Dalziel, I.W.D., 1991, Pacific margins of Laurentia and East Antarctica-Australia as a conjugate rift pair—evidence and implications for an Eocambrian supercontinent: *Geology*, v. 19, p. 589–601.
- DePaolo, D.J., 1981, Neodymium isotopes in the Colorado Front Range and crust-mantle evolution in the Proterozoic: *Nature*, v. 291, p. 193–196.
- Dórame-Navarro, M., e Iriondo, Alexander, 2005, Cartografía, petrografía y geocronología de los Cerros Tecolote y su relación con el metamorfismo de los Cerros Bámuri y La Tortuga al sur de Caborca, NW de Sonora: *GEOS, Unión Geofísica Mexicana, Resúmenes y Programa*, v. 25, núm. 1, p. 85–86 (resumen).
- Dórame-Navarro, M.; Iriondo, Alexander; Castiñeiras, P.; y Premo, W.R., 2004, Cartografía y geocronología del basamento pro-

- terozoico metamórfico en Los Cerros Tecolote, NW Sonora: IV Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, Juriquilla, Querétaro, Libro de Resúmenes, p. 59 (resumen).
- Duebendorfer, E.M., y Christensen, C., 1995, Synkinematic (?) intrusion of the “anorogenic” 1425 Ma Beer Bottle Pass pluton, southern Nevada: *Tectonics*, v. 14, p. 168–184.
- Duebendorfer, E.M.; Jones, C.S.; y Chamberlain, K., 1996, Timing and kinematics of Proterozoic polyphase deformation, Cerbat Mountains, Arizona—implications for the Mojave-Yavapai Proterozoic provinces boundary: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 28, p. 6 (resumen).
- Duebendorfer, E.M.; Nyman, M.W.; Chamberlain, K.R.; y Jones, C.S., 1998, Proterozoic rocks within the Mojave-Yavapai boundary zone, northwestern Arizona—comparison of metamorphic and structural evolution across a major lithospheric (?) structure, *in* Duebendorfer, E.M., ed., *Geologic excursions in northern and central Arizona: Geological Society of America Rocky Mountain Section Meeting*, Flagstaff, Arizona, Field Trip Guidebook, p. 127–148.
- Duebendorfer, E.M.; Chamberlain, K.R.; y Fry, B., 2006, Mojave-Yavapai boundary zone, southwestern United States—a rifting model for the formation of an isotopically mixed crustal boundary zone: *Geology*, v. 34, núm. 8, p. 681–684.
- Enríquez-Castillo, M.A., 2008, Termocronología U-Pb y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de intrusivos de la Sierra Blanca, NW Sonora: Ejemplo de interacción termal entre magmas graníticos laramídicos y las rocas encajonantes del basamento metaígneo mesoproterozoico: Linares, Nuevo León, Universidad Autónoma de Nuevo León, tesis de licenciatura, 74 p. (inédita).
- Enríquez-Castillo, M.A.; Iriondo, Alexander; Chávez-Cabello, Gabriel; y Kunk, M.J., 2009, Interacción termal entre magmas graníticos laramídicos y rocas encajonantes mesoproterozoicas—termocronología de intrusivos de la Sierrita Blanca, NW Sonora: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 61, núm. 3, p. 451–483.
- Espinoza, I.; Iriondo, Alexander; Premo, W.R.; Paz, F.; y Valencia-Moreno, Martín, 2003, Geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of anorthositic rocks at Sierra El Tecolote in the Caborca block, northwestern Sonora, Mexico: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 35, núm. 4, p. 84 (resumen).
- Espinoza, M.A.; Nourse, J.A.; Premo, W.R.; e Iriondo, Alexander, 2005, Stratigraphy, structure, and U-Pb geochronology of Paleoproterozoic gneisses in Sierra Hornaday and Cerro el Aguila, NW Sonora, Mexico—fingerprints at the truncated margin of Laurentia: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 37, núm. 4, p. 57 (resumen).
- Farmer, G.L.; Bowring, S.A.; Matzel, J.; Espinosa-Maldonado, G.; Fedo, C.; y Wooden, J., 2005, Paleoproterozoic Mojave province in northwestern Mexico? Isotopic and U-Pb zircon geochronologic studies of Precambrian and Cambrian crystalline and sedimentary rocks, Caborca, Sonora, *in* Anderson, T.H.; Nourse, J.A.; McKee, J.W.; y Steiner, M.B., eds., *The Mojave-Sonora megashear hypothesis—development, assessment, and alternatives: Geological Society of America Special Paper 393*, p. 183–198.
- Farmer, G.L., y DePaolo, D.J., 1984, Origin of Mesozoic and Cenozoic granite in the western United States and implications for pre-Mesozoic crustal structure; 2. Nd and Sr isotopic studies of unmineralized and Cu- and Mo-mineralized granite in the Precambrian craton: *Journal of Geophysical Research*, v. 89, núm. 10, p. 10141–10160.
- Farmer, G.L.; Espinosa, G.; Morales, M.; Martin, M.W.; y Bowring, S.A., 2001, Nd isotope constraints on sources of Neoproterozoic to Early Cambrian siliciclastic sedimentary rocks in northern Sonora: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 14, núm. 5, p. 437–446.
- Frost, C.D., y Frost, B.R., 1997, Reduced rapakivi-type granites—the tholeiite connection: *Geology*, v. 25, p. 647–650.
- Gehrels, G.E., y Stewart, J.H., 1998, Detrital zircon U-Pb geochronology of Cambrian to Triassic miogeoclinal and eugeoclinal strata of Sonora, Mexico: *Journal of Geophysical Research*, v. 103, p. 2471–2487.
- Gehrels, G.E.; Dickinson, W.R.; Ross, G.M.; Stewart, J.H.; y Howell, D.G., 1995, Detrital zircon reference for Cambrian to Triassic miogeoclinal strata of western North America: *Geology*, v. 23, p. 831–834.
- González-León, C.M.; Stanley, G.D.; Gehrels, G.E.; y Centeno-García, Elena, 2005, New data on the lithostratigraphy, detrital zircon and Nd isotope provenance, and paleogeographic setting of the El Antimonio Group, Sonora, Mexico, *in* Anderson, T.H.; Nourse, J.A.; McKee, J.W.; y Steiner, M.B., eds., *The Mojave-Sonora megashear hypothesis—development, assessment and alternatives: Geological Society of America Special Paper 393*, p. 259–282.
- Gutiérrez-Coronado, A.; Iriondo, Alexander; Rodríguez-Castañeda, J.L.; Wooden, J.L.; Budahn, J.R.; Lozano-Santa Cruz, Rufino; y Hernández-Treviño, T., 2008, Paleoproterozoic gneisses of the San Luisito Hills in NW Sonora—extending the Mexican Yavapai province of SW Laurentia: *Joint Annual Meeting, Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 40, núm. 6, p. 144 (resumen).
- Hammond, J.G., 1986, Geochemistry and petrogenesis of Proterozoic diabase in southern Death Valley region of California: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 93, p. 312–321.
- Hawkins, D.P.; Bowring, S.A.; Ilg, B.R.; Karlstrom, K.E.; y Williams, M.L., 1996, U-Pb geochronologic constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Upper Granite Gorge, Grand Canyon, Arizona: *Geological Society of America Bulletin* 108, p. 1167–1181.
- Heaman, L.M., y Grotzinger, J.P., 1992, 1.08 Ga diabase sills in the Pahrump Group, California—implications for the development of the Cordilleran miogeocline: *Geology*, v. 20, p. 637–640.
- Herrera-López, P.; Iriondo, Alexander; y Rodríguez-Castañeda, J.L., 2005, Preliminary time constraints and geochemistry of the Proterozoic basement from Sierra Los Ajos and Cerros Las Mesteñas, NE Sonora, Mexico: *GEOS, Unión Geofísica Mexicana, Resúmenes y Programa*, v. 25, núm. 1, p. 87–88 (resumen).
- Herrera-Urbina, Saúl; Soto-Verdugo, L.D.C.; Iriondo, Alexander; y Paz-Moreno, F., 2004, El zócalo ígneo-metamórfico pa-

- leoproterozoico Sierrita Prieta, Sonora, México—petrología, geoquímica y geocronología: *Actas INAGEQ*, v. 10, núm. 1, p. 19 (resumen).
- Hill, B.M., y Bickford, M.E., 2001, Paleoproterozoic rocks of central Colorado—accreted arcs or extended older crust?: *Geology*, v. 29, p. 1015–1018.
- Hoffman, P.F., 1989, Speculations on Laurentia's first gigayear (2.0 to 1.0 Ga): *Geology*, v. 17, p., 135–138.
- Hoffman, P.F., 1991, Did the breakout of Laurentia turn Gondwana inside out?: *Science*, v. 252, p. 1409–1412.
- Iriondo, Alexander, 2001, Proterozoic basements and their Laramide juxtaposition in NW Sonora, Mexico—tectonic constraints on the SW margin of Laurentia: Boulder, University of Colorado, disertación doctoral, 222 p. (inédita).
- Iriondo, Alexander, 2005, The Caborca oroclinal bend—a testable hypothesis to explain the NW-SE geological trend of Paleoproterozoic provinces in the Mexican SW Laurentia: *GEOS, Unión Geofísica Mexicana, Resúmenes y Programa*, v. 25, núm. 1, p. 85 (resumen).
- Iriondo, Alexander, 2007, Precambrian geology in NW Mexico—new ideas for the distribution of Paleoproterozoic crustal provinces in SW Laurentia: Arizona Geological Society, Symposium Ores & Orogenesis, Circum-Pacific Tectonics, Geologic Evolution and Ore Deposits, Tucson, Arizona, p. 94–95 (resumen).
- Iriondo, Alexander, y Premo, W.R., 2003, The Caborca block—an inhomogeneous piece of Paleoproterozoic crust in Sonora: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 35, núm. 4, p. 67 (resumen).
- Iriondo, Alexander; Miggins, D.; y Premo, W.R., 2003, The Aibó-type (~1.1 Ga) granitic magmatism in NW Sonora, Mexico—failed continental rifting of Rodinia?: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 35, núm. 4, p. 84 (resumen).
- Iriondo, Alexander; Premo, W.R.; Martínez-Torres, L.M.; Budahn, J.R.; Atkinson, W.W., Jr.; Siems, D.F.; y Guarás-González, B., 2004, Isotopic, geochemical and temporal characterization of Precambrian basement rocks in the Quitovac region, northwestern Sonora, Mexico—its implications for the tectonic reconstruction of southwestern North America: *Geological Society of America Bulletin*, v. 116, núms. 1 y 2, p. 154–170.
- Iriondo, Alexander; Kamenov, G.D.; y Foster, D.A., 2008, The Sierra Los Tanques ~1.1 Ga granite in NW Sonora—another example of Mesoproterozoic plutonism along the Mexican Yavapai Province: Joint Annual Meeting, Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 40, núm. 6, p. 144 (resumen).
- Izaguirre-Pompa, A., 2009, El basamento paleoproterozoico (~1.71–1.68 Ga) Yavapai de la región Mina La Herradura en el NW de Sonora—sus implicaciones para el desarrollo del margen continental activo mesozoico-cenozoico del NW de México: Querétaro, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, tesis de maestría en ciencias, 201 p. (inédita).
- Izaguirre-Pompa, A., e Iriondo, Alexander, 2007, Mesoproterozoico (~1.2 Ga) quartzite and intruding anorthosite (~1.08 Ga) from Sierra Prieta, NW Sonora—Mexican additions to the Precambrian history of SW Laurentia: Symposium Ores & Orogenesis, Circum-Pacific Tectonics, Geologic Evolution and Ore Deposits, Tucson, Arizona, Arizona Geological Society, p. 147–148 (resumen).
- Izaguirre, A.; Iriondo, Alexander; Wooden, J.L.; Budahn, J.R.; y Schaaf, Peter, 2008, Paleoproterozoic orthogneisses from the Cerro Prieto area—a new addition to the Mexican Yavapai province in NW Sonora: Joint Annual Meeting, Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 40, núm. 6, p. 143–144.
- Jacques-Ayala, César; Barth, A.P.; Wooden, J.L.; y Jacobson, C.E., 2005, Provenance and U-Pb geochronology of the Late Cretaceous El Chanate Group, NW Sonora, Mexico: *GEOS, Unión Geofísica Mexicana, Resúmenes y Programa*, v. 25, núm. 1, p. 160–161 (resumen).
- Jacques-Ayala, César; Barth, A.P.; Wooden, J.L.; y Jacobson, C.E., 2009, Provenance and U-Pb geochronology of the Upper Cretaceous El Chanate Group, northwest Sonora, Mexico, and its tectonic significance: *International Geology Review*, v. 51, núm. 9, p. 1051–1077.
- Jones, C.S., 1998, Proterozoic geologic history of the Vock Canyon area, Cerbat Mountains, northwestern Arizona: Flagstaff, Northern Arizona University, tesis de maestría en ciencias, 125 p. (inédita).
- Karlstrom, K.E., y Bowring, S.A., 1988, Early Proterozoic assembly of tectonostratigraphic terranes in southwestern North America: *Journal of Geology*, v. 96, p. 561–576.
- Karlstrom, K.E., y Bowring, S.A., 1991, Styles and timing of Early Proterozoic deformation in Arizona, *in* Karlstrom, K.E., ed., Proterozoic geology and ore deposits of Arizona: *Arizona Geological Society Digest*, v. 19, p. 1–10.
- Karlstrom, K.E., y Bowring, S.A., 1993, Proterozoic orogenic history of Arizona, *in* Van Schmus, W.R. et al., eds., 1993. Transcontinental Proterozoic provinces, *in* Reed, J.C., Jr.; Bickford, M.E.; Houston, R.S.; Link, P.K.; Rankin, D.W.; Sims, P.K.; y Van Schmus, W.R., eds., Precambrian—conterminous U.S.: Geological Society of America, *The Geology of North America C-2*, p. 188–211.
- Karlstrom, K.E., y Daniel, C.G., 1993, Restoration of Laramide right-lateral strike slip in northern New Mexico by using Proterozoic piercing points—tectonic implications from the Proterozoic to the Cenozoic: *Geology*, v. 21, p. 1139–1142.
- Karlstrom, K.E., y Humphreys, E.D., 1998, Persistent influence of Proterozoic accretionary boundaries in the tectonic evolution of southwestern North America—interaction of cratonic grain and mantle modification events: *Rocky Mountain Geology*, v. 33, p. 161–179.
- Karlstrom, K.E.; Bowring, S.A.; y Conway, C.M., 1987, Tectonic significance of an Early Proterozoic two-province boundary in central Arizona: *Geological Society of America Bulletin*, v. 99, p. 529–538.
- Karlstrom, K.E.; Harlan, S.S.; Williams, M.L.; McLelland, J.; Geissman, J.W.; y Åhäll, K.-I., 1999, Refining Rodinia—geologic evidence for the Australia-Western U.S. connection in the Proterozoic: *GSA Today*, v. 9, núm. 10, p. 1–7.
- Kirby, E.; Karlstrom, K.E.; Andronicos, C.L.; y Dallmeyer, R.D., 1995, Tectonic setting of the Sandia pluton—anorogenic 1.4 Ga granite in New Mexico: *Tectonics*, v. 14, p. 185–201.

- Koehnken, P.J., 1976, Petrology of anorthosites from two localities in northwestern Sonora, Mexico: Los Angeles, University of Southern California, tesis de maestría en ciencias, 97 p. (inédita).
- Li, Y.; Barnes, M.A.; Barnes, C.G.; y Frost, C.D., 2007, Grenville-age A-type and related magmatism in southern Laurentia, Texas and New Mexico, U.S.A.: *Lithos*, v. 97, p. 58–87.
- Li, Z.-X.; Li, X.-H.; Zhou, H.; y Kinny, P.D., 2002, Grenvillian continental collision in south China—new SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia: *Geology*, v. 30, núm. 2, p. 163–166.
- Li, Z.-X.; Zhang, L.; y Powell, C. McA., 1995, South China in Rodinia—part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia: *Geology*, v. 23, p. 407–410.
- Li, Z.-X.; Bogdanova, S.V.; Collins, A.S.; Davison, A.; De Waele, B.; Ernst, R.E.; Fitzsimons, I.C.W.; Fuck, R.A.; Gladkochub, D.P.; Jacobs, J.; Karlstrom, K.E.; Lu, S.; Natapov, L.M.; Pease, V.; Pisarevsky, S.A.; Thrane, K.; y Vernikovskiy, V., 2008, Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia—a synthesis: *Precambrian Research*, v. 160, p. 179–210.
- Merriam, R., 1972, Reconnaissance geologic map of the Sonoyta quadrangle, northwest Sonora, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, v. 83, p. 3533–3536.
- Merriam, R., e Eells, J.L., 1978, Reconnaissance geologic map of the Caborca quadrangle, Sonora, Mexico: Hermosillo, Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, v. 1, p. 87–94.
- Molina-Garza, R.S., e Iriondo, Alexander, 2005, La megacizalla Mojave-Sonora—la hipótesis, la controversia y el estado actual de conocimiento del problema, in *Volumen Centenario SGM—Grandes Fronteras Tectónicas de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 52, núm. 1, p. 1–26.
- Moores, E.M., 1991, Southwest U.S.-East Antarctic (SWEAT) connection—a hypothesis: *Geology*, v. 19, p. 425–428.
- Mosher, S., 1998, Tectonic evolution of the southern Laurentian Grenville orogenic belt: *Geological Society of America Bulletin*, v. 110, núm. 11, p. 1357–1375.
- Nelson, B.K., y DePaolo, D.J., 1984, 1700 Myr greenstone volcanic successions in southwestern North America and isotopic evolution of the Proterozoic mantle: *Nature*, v. 312, p. 143–146.
- Noguez-Alcántara, Benito, 2008, Reconstrucción del modelo genético y evolución tectónica del yacimiento tipo pórfido cuprífero Milpillás, distrito de Cananea, Sonora, México: Hermosillo, Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, ERNO, disertación doctoral, 390 p. (inédita).
- Nourse, J.A.; Premo, W.R.; Iriondo, Alexander; y Stahl, E.R., 2005, Contrasting Proterozoic basement complexes near the truncated margin of Laurentia, northwestern Sonora-Arizona international border region, in *Anderson, T.H.; Nourse, J.A.; McKee, J.W.; y Steiner, M.B.*, eds., *The Mojave-Sonora megashear hypothesis—development, assessment, and alternatives: Geological Society of America Special Paper 393*, p. 123–182.
- Nyman, M.W., y Karlstrom, K.E., 1997, Pluton emplacement processes and tectonic setting of the 1.42 Ga Signal batholith, SW U.S.A.—important role of crustal anisotropy during regional shortening: *Precambrian Research*, v. 82, p. 237–263.
- Nyman, M.W.; Karlstrom, K.E.; Kirby, E.; y Graubard, C.M., 1994, Mesoproterozoic contractional orogeny in western North America—evidence from ca. 1.4 Ga plutons: *Geology*, v. 22, p. 901–904.
- Pearce, J.A.; Harris, N.B.W.; y Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks: *Journal of Petrology*, v. 25, p. 956–983.
- Plumb, K.A., 1991, New Precambrian time scale: *Episodes*, v. 14, núm. 2, p. 139–140.
- Premo, W.R.; Iriondo, Alexander; y Nourse, J.A., 2003, U-Pb zircon geochronology of Paleoproterozoic basement in northwestern Sonora, Mexico—evidence for affinity to SW US provinces: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 35, núm. 4, p. 67 (resumen).
- Rämö, O.T., y Calzia, J.P., 1998, Nd isotopic composition of cratonic rocks in the southern Death Valley region—evidence for a substantial Archean source component in Mojavia: *Geology*, v. 26, p. 891–894.
- Robb, L.J.; Knoll, A.H.; Plumb, K.A.; Shields, G.A.; Strauss, H.; y Veizer, J., 2004, The Precambrian—the Archean and Proterozoic eons, in *Grandstein, F.M.; Ogg, J.G.; y Smith, A.G.*, eds., *A geologic time scale 2004: Cambridge University Press*, Chapter 9, p. 129–140.
- Sears, J.W., y Price, R.A., 2000, New look at the Siberian connection—no SWEAT: *Geology*, v. 28, p. 423–426.
- Shaw, C.A., y Karlstrom, K.E., 1999, The Yavapai-Mazatzal crustal boundary in the Southern Rocky Mountains: *Rocky Mountain Geology*, v. 34, núm. 1, p. 37–52.
- Silver, L.T., 1960, Age determinations on Precambrian diabase differentiates in Sierra Ancha, Gila County, Arizona: *Geological Society of America Bulletin*, v. 71, p. 1973–1974 (resumen).
- Silver, L.T., 1965, Mazatzal orogeny and tectonic episodicity: *Geological Society of America Special Paper 82*, p. 185–186.
- Silver, L.T., 1967, U-Pb isotope relations in Precambrian zircons from Bagdad, Arizona: *Geological Society of America Special Paper 101*, 420 p.
- Silver, L.T., 1969, Precambrian batholiths of Arizona: *Geological Society of America Special Paper 121*, p. 558–559 (resumen).
- Silver, L.T., y Anderson, T.H., 1974, Possible left-lateral early to middle Mesozoic disruption of the southwestern North American Craton margin: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 6, p. 955 (resumen).
- Silver, L.T., y Anderson, T.H., 1983, Further evidence and analysis of the role of the Mojave-Sonora Megashear(s) in Mesozoic Cordilleran tectonics: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 15, p. 273 (resumen).
- Silver, L.T.; Anderson, C.A.; Crittenden, M.; y Robertson, J.M., 1977, Chronostratigraphic elements of the Precambrian rocks of the southwestern and far western United States: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 9, p. 1176 (resumen).

- Silver, L.T.; Conway, C.M.; y Ludwig, K.R., 1986, Implications of a precise chronology for Early Proterozoic crustal evolution and caldera formation in the Tonto Basin-Mazatzal Mountains region, Arizona: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 18, p. 413 (resumen).
- Smith, D.R.; Barnes, C.; Shannon, W.; Roback, R.; y James, E., 1997, Petrogenesis of mid-Proterozoic granitic magmas—examples from central and west Texas: Precambrian Research, v. 85, p. 53–79.
- Smith, D.R.; Noblett, J.; Wobus, R.A.; Unruh, D.; Douglass, J.; Beane, R.; Davis, C.; Goldman, S.; Kay, G.; Gustavson, B.; Saltoun, B.; y Stewart, J., 1999, Petrology and geochemistry of late-stage intrusions of the A-type, mid-Proterozoic Pikes Peak batholith (Central Colorado, USA)—implications for petrogenetic models: Precambrian Research, v. 98, p. 271–305.
- Soto-Verdugo, L.D.C., 2006, El zócalo ígneo-metamórfico Sierrita Prieta, Sonora norte central, México—características petrográficas, geoquímicas y geocronológicas: Hermosillo, Universidad de Sonora, tesis de licenciatura, 115 p. (inédita).
- Stacey, J.S., y Kramers, J.D., 1975, Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model: Earth and Planetary Science Letters, v. 26, p. 207–221.
- Stewart, J.H., 1972, Initial deposits in the Cordilleran geosyncline—evidence of a late Precambrian (<850 m.y.) continental separation: Geological Society of America Bulletin, v. 83, p. 1345–1360.
- Stewart, J.H., 1988, Latest Proterozoic and Paleozoic southern margin of North America and the accretion of Mexico: Geology, v. 16, p. 186–189.
- Stewart, J.H.; McMenamin, M.A.S.; y Morales-Ramírez, J.M., 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.; Gehrels, G.E.; Barth, A.P.; Link, P.K.; Christie-Blick, N.; y Wrucke, C.T., 2001, Detrital zircon provenance of Mesoproterozoic to Cambrian arenites in the western United States and northwestern Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 113, p. 1343–1356.
- Stewart J.H.; Amaya-Martínez, Ricardo; y Palmer, A.R., 2002, Neoproterozoic and Cambrian strata of Sonora, Mexico—Rodinian supercontinent to Laurentian Cordilleran margin, in Barth, A., ed., Contributions to crustal evolution of the southwestern United States: Geological Society of America Special Paper 365, p. 5–48.
- Thompson, A.G.; Grambling, J.A.; y Dallmeyer, R.D., 1991, Proterozoic tectonic history of the Manzano Mountains, central New Mexico: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources Bulletin 137, p. 71–77.
- Valenzuela-Navarro, L.C.; Valencia-Moreno, M.; Iriondo, Alexander; y Premo, W.R., 2003, The Crestón granite—new confirmed Paleoproterozoic locality in the Opodepe area, north-central Sonora, Mexico: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 35, núm. 4, p. 83 (resumen).
- Valenzuela-Navarro, L.C.; Valencia-Moreno, M.; Calmus, Thierry; Ochoa-Landín, Lucas; y González-León, C.M., 2005, Marco geológico del pórfido de molibdeno El Crestón, Sonora central, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 22, núm. 3, p. 345–357.
- Vernon, R.H., 1987, Oriented growth of sillimanite and andalusite, Placitas-Juan Tabo area, New Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 24, p. 580–590.
- Whitmeyer, S.J., y Karlstrom, K.E., 2007, Tectonic model for the Proterozoic growth of North America: Geosphere, v. 3, núm. 4, p. 220–259.
- Williams, M.L., 1991, Early Proterozoic low-pressure high-temperature metamorphism in Arizona, in Karlstrom, K.E., ed., Proterozoic geology and ore deposits of Arizona: Arizona Geological Society Digest, v. 19, p. 11–26.
- Windley, B.F., 1993, Proterozoic anorogenic magmatism and its orogenic connections: Journal of the Geological Society (Londres), v. 150, p. 39–50.
- Wooden, J.L., 1997, Crustal history and processes as reflected in lead isotopic signatures—some examples from North America: Lunar and Planetary Institute, Seventh Annual V.M. Goldschmidt Conference, Houston, LPI Contribution No. 921, p. XX (resumen).
- Wooden, J.L., y DeWitt, E., 1991, Pb isotopic evidence for the boundary between the Early Proterozoic Mojave and Central Arizona crustal provinces in western Arizona, in Karlstrom, K.E., ed., Proterozoic geology and ore deposits of Arizona: Arizona Geological Society Digest, v. 19, p. 27–50.
- Wooden, J.L., y Miller, D.M., 1990, Chronologic and isotopic framework for Early Proterozoic crustal evolution in the eastern Mojave Desert region, SE California: Journal of Geophysical Research, v. 95, p. 20133–20146.
- Wooden, J.L.; Stacey, J.S.; Doe, B.R.; Howard, K.A.; y Miller, D.M., 1988, Pb isotopic evidence for the formation of Proterozoic crust in the southwestern United States, in Ernst, W.G., ed., Metamorphism and crustal evolution of the Western United States: Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, p. 69–86.
- Wooden, J.L.; Nutman, A.P.; Miller, D.M.; Howard, K.A.; Bryant, B.; DeWitt, E.; y Mueller, P.A., 1994, SHRIMP U-Pb zircon evidence for Late Archean and Early Proterozoic crustal evolution in the Mojave and Arizona crustal provinces: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 26, p. 69 (resumen).
- Young, E.D.; Anderson, J.L.; Clarke, H.S.; y Thomas, W.M., 1989, Petrology of biotite-cordierite-garnet gneiss of the McCullough Range, Nevada; I, Evidence for Proterozoic low-pressure fluid-absent granulite-grade metamorphism in the southern Cordillera: Journal of Petrology, v. 30, p. 39–60.