

Tiempos de acumulación de carbón en México con especial énfasis en la Cuenca de Sabinas México, donde se proporcionan nuevos datos geocronológicos

**Eduardo González-Partida^{1,*}, Aurea Yahaira González-Betancourt¹, Antoni Camprubí²,
Alejandro Carrillo-Chávez¹, Alexander Iriondo^{1,3}, Juan Josué Enciso-Cárdenas⁴,
Fabiola González Carrillo⁵ y Juan Tomás Vázquez Ramírez¹**

¹ Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Blvd. Juriquilla 3001, 76230, Querétaro, Qro., México.

² Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México.

³ Department of Geosciences, University of Arizona, 1040 E 4th St, Tucson, AZ 85721, E.U.A.

⁴ Centro de Investigación en Geociencias Aplicadas, Universidad Autónoma de Coahuila, Boulevard Simón Bolívar # 303A, Nueva Rosita, Coahuila de Zaragoza, C.P. 26830, México.

⁵ Escuela Superior de Ingeniería Lic. Adolfo López Mateos, Universidad Autónoma de Coahuila, Nueva Rosita, Coahuila de Zaragoza, C.P. 26830, México.

* egp@geociencias.unam.mx

RESUMEN

En México, se han identificado en el tiempo y espacio diferentes épocas de acumulación de materia orgánica, que han dado origen a distintas cuencas carboníferas como en el Triásico la Cuenca de Barrancas en la Región Carbonífera de San Marcial en Sonora; en el Jurásico Medio y Tardío la Cuenca de Tlaxiaco en Oaxaca; y en el Cretácico superior las cuencas de Chihuahua y Sabinas, estas últimas objeto de este estudio en este trabajo. En el Terciario se tienen varias manifestaciones de carbón, las más importantes son las de la región carbonífera de Colombia-San Ignacio, Estados de Tamaulipas, Coahuila y Nuevo León.

La región carbonífera de Sabinas aporta más del 90 % de la producción nacional de carbón. La Cuenca de Sabinas posee un área de 37000 km², y su origen está relacionado con la apertura del Proto-Golfo de México y su “cierre tectónico” con la Orogenia Larámide, estando delimitada por altos estructurales como son la Península de Coahuila, la plataforma Burro-Peyotes y el arco de Tamaulipas y las fallas como La Babia y San Marcos. En esta cuenca está la Formación Olmos, también conocida como “Formación del Carbón”, cuyo origen pasa por dos periodos de formación: 1) un ambiente palustre donde la flora fue abundante y permitió el depósito de turba con espesores y calidad variables; 2) un ambiente continental y transicional: intermarea superior, laguna marginal, pantano y planicies aluviales. Los estudios paleobotánicos, de polen y esporas, la han definido como un sistema deltaico del Cretácico Superior en un ambiente climático subtropical. Por su posición estratigráfica, estructural y distribución espacial, además de producir carbón, es un *play* favorable para gas.

Los mantos de carbón en la cuenca de Sabinas presentan un horizonte “guía” de toba que nos ha permitido en este trabajo datar la época de acumulación del carbón por el método de U–Pb en zircones, dado que estos son refractarios para la temperatura de diagénesis a la que fueron sometidas las diferentes plantas originales que

conforman los mantos de carbón de la cuenca. Su edad determinada por el método U–Pb en zircones en este trabajo fue de 76.1 ± 1.2 Ma, este dato es congruente con la actividad magmática regional, dado que la subducción al Occidente de área de estudio ha estado activa durante todo el Cretácico hasta el Terciario con la generación de magmas intrusivos y efusivos en lo que se conoce como el Arco Magmático Laramídico Mexicano, conformado en gran parte por la Sierra Madre Occidental, es así que rocas volcanoclásticas han sido reportadas para el Cretácico Superior, tanto relacionadas a mantos de carbón como eventos distales provenientes del Occidente de México, una de las provincias volcanoclásticas más grandes del mundo, en donde se reportan numerosos datos que concuerdan con la edad determinada en este trabajo. En este sentido la cuenca de Sabinas, y sus mantos de carbón, son un buen referente para la combinación de métodos de investigación geocronológica como los paleobotánicos y geocronológicos de decaimiento radioactivo.

Palabras clave: Sabinas; Formación Olmos; carbón; toba; geocronología U–Pb en zircones.

ABSTRACT

Different periods of coal accumulation have been identified in time and space in Mexico. Some examples are the Triassic of Sonora in the San Marcial coal region, the Middle and Late Jurassic in the Tlaxiaco basin, the Lower Cretaceous in the Cabullona Basin in Sonora and the Upper Cretaceous in the Chihuahua and Sabinas Basin (object of the present work). In the Tertiary, there are several manifestations of coal, the most important are those of the coal region of Colombia-San Ignacio, States of Tamaulipas, Coahuila, and Nuevo León.

The Sabinas Basin coal region contributes more than 90 % of the national coal production. The Sabinas Basin has an area of 37000 km²,

and its origin is related to the opening of the Proto-Gulf of Mexico and its "tectonic closure", with the Laramide Orogeny. The Basin is being delimited by structural highs such as the Coahuila Peninsula, the Burro-Peyotes and the Tamaulipas arch, and faults such as La Babia and San Marcos. Within this basin is the Olmos Formation, also known as the "Coal Formation", whose origin goes through two formation periods: 1) a marshy environment where the flora was abundant and allowed the deposit of peat with variable thicknesses and quality; 2) a continental and transitional environment: upper intertidal, marginal lagoon, swamp and alluvial plains. Paleobotanical studies of pollen and spores have defined it as a deltaic system of the Upper Cretaceous in a subtropical climatic environment. Due to its stratigraphic characteristics, structural position, spatial distribution and its production of coal, the Olmos formation is a favorable play for gas.

The coal mantles in the Sabinas basin present a "guide-layer" of volcanic tuff that allowed us to date the time of coal accumulation by U-Pb method in zircons. These minerals are refractory, so the age of deposit is not modified at temperature of diagenesis during the transformation of organic matter to coal. The age determined by the U-Pb method in zircons is 76.1 ± 1.2 Ma. This data is consistent with the regional magmatic activity of the area. The subduction to the west of the study area was active from the Cretaceous until the Tertiary with the generation of intrusive and effusive magmas known as the Mexican Laramide Magmatic Arc, which made up the Sierra Madre Occidental. The Laramie magmatic Arc is one of the largest volcanoclastic provinces in the world, and numerous age data have been reported similar the reported in the present work. So, the Sabinas basin, and its coal seams, are a good reference for the combination of geochronological research methods such as paleobotanical and radioactive decay geochronological methods.

Keywords: Sabinas; Olmos Formation; coal; tuff; geochronology U-Pb in zircons.

INTRODUCCIÓN

El carbón es una roca sedimentaria organoclastica de grano fino, compuesta esencialmente por restos carbonizados de plantas. Estas rocas organoclasticas suelen constituir secuencias estratigráficas características que reciben el nombre de ciclotema, es decir, una secuencia litológica que se repite en el tiempo (Prothero y Schwab, 1996). Gracias precisamente a esta estructura estratigráfica, con frecuencia el carbón forma mantos de gran extensión, cuyo espesor varía desde pocos milímetros hasta varios metros, como es el caso de la Cuenca de Sabinas. En Norteamérica, los ciclotemas portadores de carbón se extienden por miles de kilómetros cuadrados, son notablemente uniformes en espesor y en organización interna. Durante el Carbonífero, gran parte de Norteamérica Oriental era una enorme planicie que yacía casi al nivel del mar, similar a la actual planicie costera del Golfo de México (Piedad-Sánchez et al., 2005a, Corona-Esquivel et al., 2006). El apilamiento de estos ciclotemas carboníferos indica frecuentes y repetidos ascensos y descensos del nivel del mar. Otro de los ambientes sedimentarios favorables para la formación de yacimientos de carbón es el deltaico (Piedad-Sánchez et al., 2005b y Corona-Esquivel et al., 2006). La distribución, orientación y arquitectura de los deltas depende de varios factores, como son el clima, el caudal del río y la dinámica de éste en la desembocadura, el aporte de sedimentos, el oleaje, los vientos, así como la pendiente, configuración y "movilidad tectónica" de la cuenca de depósito. Por lo general, los sedimentos deltaicos presentan grandes espesores (varios cientos de metros), principalmente de areniscas y/o limolitas. Las capas de carbón que se forman en estos ambientes suelen contener fauna en las unidades interestratificadas

que pueden indicar ambientes de aguas marinas o continentales que, junto con las estructuras sedimentarias, sugieren unas condiciones de depósito en aguas poco profundas (Piedad-Sánchez et al., 2005c y Corona-Esquivel et al., 2006). Bajo este esquema genético para el carbón de la cuenca de Sabinas, la paleontología, la paleobotánica y en especial la palinología (ej. Estrada-Ruiz et al., 2007) han sido de gran utilidad para fechar el carbón. Sin embargo, la particularidad de estos mantos de contener un horizonte "guía" de toba nos ha permitido en este trabajo datar la época de acumulación del carbón por el método de U-Pb en zircones, de manera más precisa, dado que estos son refractarios para la temperatura de diagénesis a la que fueron sometidas las diferentes plantas originales que conforman los mantos de la cuenca de Sabinas. En definitiva, aquí se cumple la máxima en geología que dice "las diferentes escalas de observación no se deben de contradecir".

Principales épocas del carbón en México

Actualmente, por su importancia económica destaca el carbón de la Cuenca de Sabinas- Chihuahua, en los Estados de Coahuila y Chihuahua, la Cuenca Tlaxiaco-Cualac entre Oaxaca y Guerrero, y la de San Marcial en Sonora, dado que solo la Región Carbonífera de Coahuila aporta más del 90 % de la producción nacional de carbón. Con respecto al tiempo, se han reportado indicios de carbón que aparecen en series paleozoicas, como los de las formaciones Matzitzí en Puebla y Los Arcos en Guerrero según Corona-Esquivel et al., (2006). Cuerpos importantes de carbón aparecen en el Triásico en la parte central del Estado de Sonora en lo que se conoce como la región carbonífera de San Marcial (Figura 1), según información geológica reportada por Alencáster (1961), Rangin (1978), Roldán-Quintana (1984), Dumble (1899), Flores (1930), King (1939), Wilson y Rocha (1946), y Flores-Galicia (1988), quienes concuerdan que los mantos de carbón como del grafito están alojados en la Formación Barranca (King, 1939) del Triásico, la cual está constituida por conglomerados, areniscas y limolitas rojas con intercalaciones de lutitas y mantos de carbón y grafito.

El Jurásico Medio y Tardío registra acumulación de carbón en la Región carbonífera de Tlaxiaco- Tezoatlán-Mixtepe en Oaxaca y se extiende al estado de Gro. en Cualac y parte de Puebla, en lo que hoy se conoce como cuenca de Tlaxiaco; Aquí los mantos de carbón se encuentran en la parte inferior de las Formaciones Rosario, Zorillo y Simón del Jurásico Medio (Erben, 1956a, 1956b, Wieland 1914, Silva-Pineda, 1969, 1978, 1984, Salas y Benavides, 1976 y Corona-Esquivel et al., 2006) en la cuenca de Tlaxiaco, mientras que en Puebla se encuentra en la Formación Tecomasúchil, que aflora en Tecamatlán, Puebla, y en otras partes del Estado, como las áreas de Tejaluca y de Ahuatlán según lo reporta Corona-Esquivel et al., (2006). Por otro lado, en Guerrero, en la Región de la Montaña, se han reconocido siete áreas con evidencias de carbón en estratos del Jurásico Medio y Tardío (Corona-Esquivel, 1978) de la parte baja del Grupo Tecocoyunca que son la continuidad de la cuenca de Tlaxiaco.

El Cretácico inferior en la Cuenca de Cabullona, Sonora es portador de mantos de carbón observados en las Formaciones Cintura y Snake Ridge del Grupo Bisbee, y la Formación Cabullona (Flores-Galicia, 1988), aquí los mantos de carbón están intercalados con lutitas y/o areniscas y calizas con moluscos de ambiente marino somero, tales como *Trigonia* sp., *Turritella* sp., y *Ostrea* sp. del Cretácico Inferior (Corona-Esquivel et al., 2006).

Las manifestaciones más importantes de carbón están en la cuenca de Chihuahua-Sabinas en lo que se conoce como Formación Aguja del Maastrichtiano (Salas y Benavides, 1976; Salas, 1980; Flores-Galicia, 1988) en Chihuahua, pero principalmente en Sabinas los mantos está asociado a un sistema deltaico que se desarrolló durante el Cretácico superior; cabe destacar que entre los mantos, aparece un horizonte



Figura 1. Principales localidades del carbón en México, tipo de carbón y distribución de las principales cuencas en función del tiempo geológico. Modificado de Salas (1980).

de 25 a 50 cm de espesor, que corresponde a una toba transformada parcialmente en bentonita y que fue reportada y descrita inicialmente por Piedad-Sánchez *et al.*, (2005a, 2005b y 2005c).

En el Cenozoico se tienen varias manifestaciones de carbón, las más importantes son las de la región carbonífera de Colombia-San Ignacio, Estados de Tamaulipas, Coahuila y Nuevo León, aquí, las unidades de mayor interés las representan las Formaciones Bigford y Pico Clay del Terciario, ya que en la cima de la primera y en la base de la segunda se localizan los mantos de carbón que representan el interés económico de esta cuenca, se conocen además, algunas localidades con evidencias de lignito y/o turbas de origen lacustre, tales como Tehuichila y Zacualtipán y San Miguel Ocaichitlán, Edo. de Hidalgo, de edad Mioceno; los mantos de carbón de Yahualica y Chicontepec en Veracruz, de edad Oligoceno; los de Zacualtipán en Hidalgo, de edad Miocénica, (cf. Cope, 1886; Ferrusquía-Villafranca, 1978; Castillo-Cerón *et al.*, 1996); Y los de Tamazuchale en San Luis Potosí, de edad terciaria. En Chalco, Estado de México, Corona-Esquivel *et al.*, (2006) reportan carbón del Cuaternario.

Antecedentes del carbón en Sabinas

En México se conocen yacimientos de carbón mineral desde el año 1850. La primera producción comercial de la que se tiene referencia se inició en el año 1884 en el estado de Coahuila. El carbón se utilizó primero para fundir cobre en las minas de Pánuco Coahuila, después

para proveer de combustible a los ferrocarriles y hacia fines del siglo XIX, para las recientes industrias metalúrgica y del acero y actualmente además para la generación de electricidad. Como ya se mencionó, los principales yacimientos de carbón se localizan en tres regiones que, por orden de importancia actual, corresponden a los estados de Coahuila, Sonora y Oaxaca. La región carbonífera de Coahuila es la más importante del país (Figura 1 a 3), y está ubicada en la porción norte-central del estado de Coahuila, se extiende al oriente hasta incluir una pequeña área del estado de Nuevo León. Esta región, también nombrada como “Cuenca de Sabinas” tiene 62 km de longitud, con una anchura máxima de 24 kilómetros. La profundidad máxima a la que se encuentran los mantos de carbón es de 490 m según Robeck *et al.*, (1956) y de 250 m según Rivera-Martínez y Alcocer-Valdés (2003). El carbón explotable se encuentra principalmente como un doble manto separado por una capa de toba objeto de este estudio (Figura 2). y es un índice confiable para la correlación de los mantos de carbón entre las diferentes minas de la cuenca.

El carbón es del tipo sub-bituminoso apropiado para su transformación en coque, tiene volatilidad media a baja, presenta vitrinita preponderante como constituyente, y un poder reflector de la vitrinita de 0.6–1.2 % (Verdugo y Ariciaga, 1988a, 1988b; Piedad-Sánchez *et al.*, 2005c). En cuanto a las reservas, en la cuenca de Sabinas se estimó un potencial total de 600 millones de toneladas de carbón sub-bituminoso (MICARE, 1982; Corona-Esquivel *et al.*, 2006) y de gas

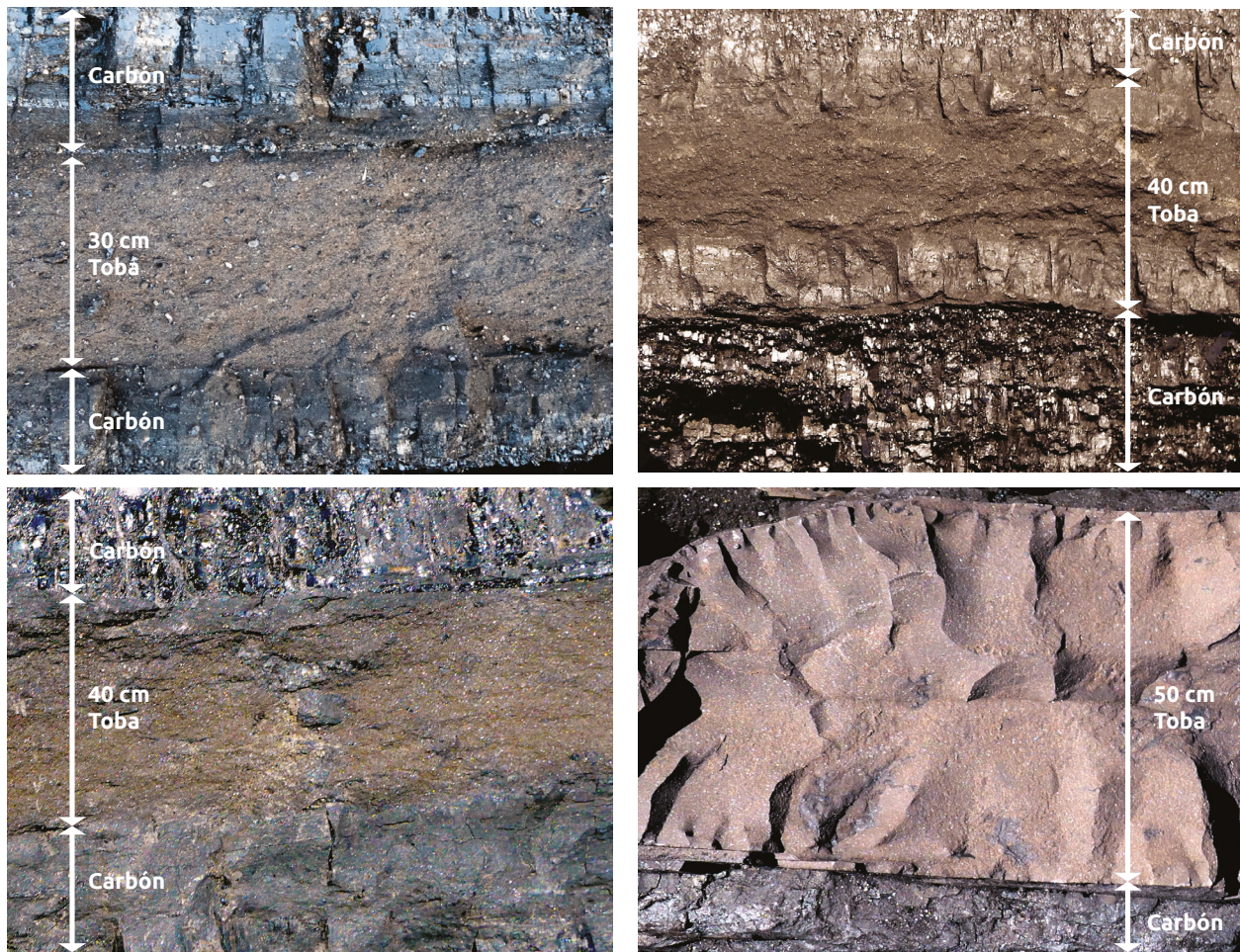


Figura 2. Mantos de carbón separados por un horizonte de toba “guía” que se extiende por toda la cuenca y que permite hacer correlaciones entre mantos en las subcuenas.

metano total entre 1.22×10^{11} y $2.22 \times 10^{11} \text{ m}^3$ respectivamente (Querol-Suñé, 2005), pero de acuerdo con Rivera-Martínez y Alcocer-Valdés (2003) y con el Servicio Geológico Mexicano (SGM), antes Consejo de Recursos Minerales COREMI, en su informe técnico de Exploración de la Cuenca de Sabinas mediante barrenación, con extracción de núcleo, en cuanto al volumen de reservas, solo en el año de 1993 se estimó un potencial total de 1387'622,586 toneladas; La litología de las unidades estratigráficas del Cretácico Tardío que contienen los horizontes de carbón, es prácticamente la misma en toda la cuenca de Sabinas. Desde el punto de vista estructural, los sedimentos carboníferos de esta zona forman un monoclin continuo, buzando hacia el noreste, por lo cual dichas unidades quedan pronto cubiertas por las formaciones marinas del Terciario que afloran hacia el Este y que constituyen la Planicie Costera del Golfo de México. Los mantos de carbón están asociados a un sistema deltaico que se desarrolló durante el Cretácico Superior (Corona Esquivel *et al.*, 2006) y que ha sido clasificado como del tipo constructivo lobulado. Sus facies están representadas por las formaciones Upson (prodelta), San Miguel (frente deltaico) y Olmos (planicie deltaica), siendo esta última la que contiene hacia su base, los mantos de carbón con espesores económicos (Verdugo y Ariciaga, 1988a, 1988b, y Barboza *et al.*, 1997). Dumble (1892, 1899) realizó los primeros estudios geológicos, describiendo las formaciones de la región. Böse y Cavins (1927), con base a la “biogeocronología” europea, asignaron una edad Cretácico Superior a estas unidades. Finalmente, Stephenson (1927) definió las formaciones tal como se conocen

hasta ahora. El estudio geológico más completo es el de Robeck *et al.*, (1956, 1960), en el que se describe detalladamente la estratigrafía y estructura de la región de Sabinas. Otros trabajos más recientes han sido publicados por Flores-Galicia (1988), Verdugo y Ariciaga (1988 a, b), COREMI (1994, 1996), Eguiluz de Antuñano (2001), Rivera-Martínez y Alcocer-Valdés (2003), Piedad-Sánchez *et al.*, (2005 a, 2005b y 2005c) y Corona-Esquivel *et al.*, (2006).

GENERALIDADES GEOLÓGICAS DE LA REGIÓN CARBONÍFERA DE COAHUILA

La Región Carbonífera de Coahuila, se encuentra geográficamente en la porción centro-norte del estado (Figura 3), entre las coordenadas $100^{\circ}30'$ a $101^{\circ}45'$ longitud oeste y $26^{\circ}45'$ a $28^{\circ}10'$ latitud norte, comprendiendo principalmente los municipios de Progreso, Juárez, Sabinas, San Juan de Sabinas, y Melchor Múzquiz. En general, según datos de la Secretaría de Planeación del estado de Coahuila, la región tiene las siguientes características: Existen en el área dos variedades de carbón: 1) El carbón no coquizable, conocido como “carbón térmico”, que es empleado como combustible para la generación de energía eléctrica. 2) El carbón coquizable que es conocido como carbón metalúrgico, el cual pasa por un proceso de “coquización”, para posteriormente utilizar el carbón coque en la producción de acero en el alto horno. Por otro lado, el 58 % de los yacimientos de

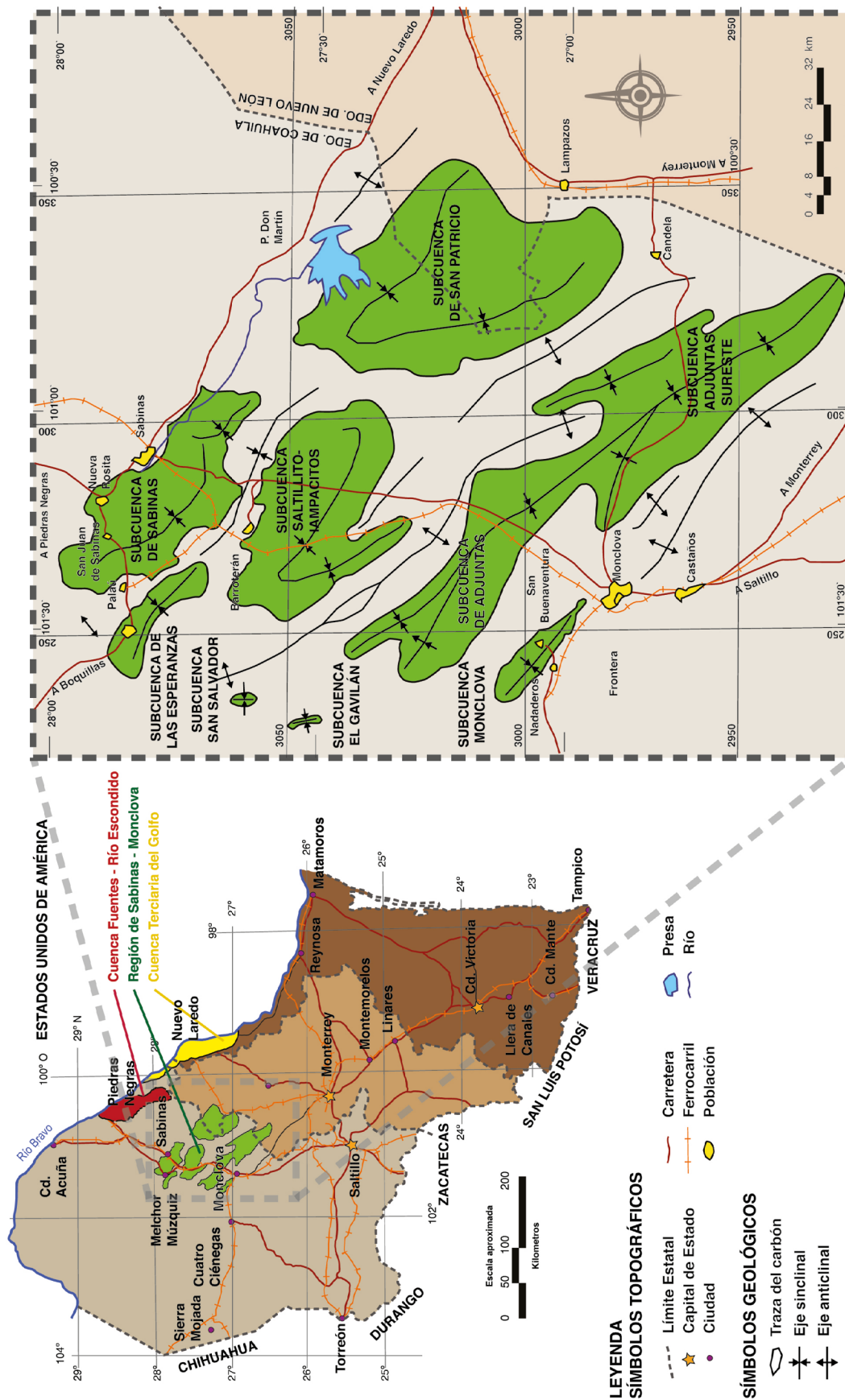


Figura 3. Plano de localización geográfica de la cuenca de Sabinas y su separación en sub-cuencas carboníferas de los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. Modificado de Corona Esquivel *et al.*, (2006).

carbón pertenecen a pequeños y medianos mineros, el 37 % de los yacimientos se explotan a cielo abierto y el 4.17 % en minas profundas. Según la Dirección General de Minas de la Secretaría de Economía, la Región Carbonífera sigue detentando el primer lugar en el país en la producción de carbón desde el año 2004 según Piedad Sánchez *et al.*, (2013, 2014, 2015 y 2017).

La Cuenca de Sabinas posee un área de 37000 km², y su origen está relacionado con la apertura del Proto-Golfo de México (Goldhammer *et al.*, 1991, 1993, Goldhammer 1999; Goldhammer y Johnson, 2001; Pindell y Bewey 1982, Pindell 1985, 1993; Salvador, 1987, 1991 a, b, c) y su “cierre tectónico” está relacionado con la Orogenia Larámide (González-Sánchez *et al.*, 2007, 2009), estando delimitada por altos estructurales como son la Península de Coahuila, la plataforma Burro-Peyotes y el arco de Tamaulipas y fallas como La Babia y San Marcos. Su origen está asociado a la extensión marina del Golfo de México que ha evolucionado dentro del área, creada por la separación de Norteamérica, Sudamérica y África desde el rompimiento de Pangea en el Jurásico (Pindell, 1993) y derivado del rifting continental en la zona sur de la placa de Norte América. Específicamente la Región Carbonífera de Coahuila se localiza dentro de una porción SW de la Provincia Petrolera Cuenca de Sabinas–Burro Picachos, está constituida regionalmente de grandes planicies, resultado de la erosión y de la meteorización de la sucesión de anticlinales y sinclinales, formados por el plegamiento, en la dirección preferencial NW-SE impuesta por la Orogénia Larámide del Cretácico superior al Paleoceno (80–55 Ma; Damon *et al.*, 1981; Mújica-Mondragón y Jacobo-Albarrán 1983; McDowell *et al.*, 2001, entre otros). A nivel regional, las rocas que afloran dentro de la Región Carbonífera varían en edad del Jurásico Tardío al Cuaternario (Young, 1972, 1983; Flores-Galicia, 1988; Santamaría-Orozco, 1990, 2000, Santamaría-Orozco y Horseld 2000; Eguiluz de Antuñano, 2001; Román-Ramos y Holguín-Quinones, 2001). Las primeras son rocas sedimentarias de ambientes marinos y las últimas están representadas por rocas de tipo continental, incluyendo algunos derrames de basalto. En general, la secuencia sedimentaria constituida de rocas siliciclásticas, carbonatadas y evaporitas, conforman un espesor de 6 a 7 km.

Formación Olmos: La Portadora del Carbón

La Formación Olmos, también conocida como “Formación del Carbón”, fue definida por L.W. Stephenson (1927), y el nombre Olmos se tomó de la estación ferroviaria de Bandera Olmos, ubicada sobre el afloramiento de la formación, y del Arroyo Olmos, que sigue el rumbo de la formación cerca del centro de la zona del afloramiento desde un punto a 7 a 8 millas al norte de Eagle Pass, USA, hasta la confluencia del arroyo con el Río Grande. El espesor de la formación en la localidad tipo varía desde casi imperceptible hasta 152 m. La formación (Figura 4) consiste de lutita gris verdosa y lutita arenosa fina, interestratificadas irregularmente con arenisca gris verdosa, fina a gruesa, blanda a dura, de estratificación delgada a gruesa, más o menos diastratificada, que contiene algunas capas con ondulitas y mantos de carbón y lignito. Parece haber discordancia tanto en la base como en la cima de la Formación Olmos. Eguiluz de Antuñano y Amezcua-Torres (2003) señalan un límite erosional con la Formación San Miguel y sugieren que, en realidad, los mantos de carbón pertenecen a la Formación Escondido. Generalmente constituida de dos miembros: El primero formado de estratos de areniscas, pelitas bituminosas y estratos de carbón a la base, y el segundo constituido de pelitas, limolitas y areniscas con cambios de facies continuos. Su origen pasa por dos periodos de formación: 1) un ambiente palustre donde la flora fue abundante y permitió el depósito de turba con espesores y calidad variables; 2) un ambiente continental y transicional: intermarea superior, laguna marginal, pantano y planicies aluviales (Robeck *et al.*,

1956; Flores-Galicia, 1988; Verdugo y Ariciaga, 1988a; Flores-Espinoza, 1989; Santamaría-Orozco, 1990; Cevallos-Ferriz 1992, Cevallos-Ferriz y Weber, 1992, Cevallos-Ferriz y Ricalde-Moreno 1995; Eguiluz de Antuñano, 2001). La Formación Olmos en el área de estudio presenta un espesor variable con un máximo de 378 m y un promedio de 175 m, y está compuesta primordialmente por lutitas grises carbonáceas, con intercalaciones de limolitas y algunas areniscas de grano fino, y presencia de 1 a 12 mantos de carbón sub-bituminoso con espesor variable de 0.20 a 2 m de espesor. La Formación Olmos está afectada por fallas semiparalelas NW-SE, las cuales son derivaciones compresionales de la megacizalla regional NE-SW que atraviesa la región por lo que se divide en al menos ocho zonas que se denominan subcuencas (Figura 3), que corresponden a sinclinales amplios, cuya orientación NW-SE, se ajusta a la estructura regional: Fuentes–Río Escondido, Sabinas, Las Esperanzas, Saltillito–Lampacitos, San Patricio, El Gavilán, San Salvador, Monclova y Las Adjuntas. Estudios previos de la materia orgánica en la Provincia Petrolera Cuenca de Sabinas–Burro Picachos, indican que la Formación Olmos es un *play* potencial productor de gas y se considera con una madurez térmica adecuada, donde el gas es termogénico producto de una materia orgánica del tipo sapropelítico con una reflectancia de la vitrinita (Rr) que va de Rr = 0.6 a 1.5 %, con profundidades de generación entre los 4 a 6 km (Eguiluz, y Amezcua 2003, Piedad-Sánchez *et al.*, 2005a, 2005b y 2005c, y González Partida *et al.*, 2017, 2020).

METODOLOGÍA DE TRABAJO Y RESULTADOS OBTENIDOS

El zircón (ZrSiO₄) es un mineral presente comúnmente en una gran variedad de rocas (Finch y Hanchar 2003, Allègre 2008). Su importancia radica en que este mineral es capaz de retener información isotópica por sus propiedades refractarias y dado que el sistema se cierra a temperaturas > 900 °C, esta condición permite diferenciar los eventos más viejos de los más jóvenes (Lee *et al.*, 1997; Allègre, C., 2008). Considerando que la transformación térmica de la turba en carbón durante un evento diagenético, se presentan temperaturas que no sobrepasan los 200 °C, los valores isotópicos obtenidos corresponderán a los mismos que el zircón conservaba al momento de la formación de la toba, que corresponde a la roca descrita por Piedad-Sánchez *et al.*, 2005 (a, b, c) y mencionada en Piedad Sánchez *et al.*, (2013, 2014, 2015 y 2017) así como por Corona-Esquivel *et al.*, 2006.

Para este estudio los zircones fueron obtenidos de una toba pulverizada usando una combinación de técnicas convencionales de separación magnética y líquidos pesados empleadas en el Laboratorio de Separación Mineral del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Juriquilla, Querétaro. Para la separación de zircones con el fin de hacer estudios de geocronología U–Pb primeramente, la muestra de roca (~2 a 4 kg) fue triturada y pulverizada utilizando una quebradora de quijadas. Después se tamiza, obteniendo varias fracciones de material, en nuestro caso solo se utilizó la fracción de malla >60 (0.250 mm), para proceder a la separación mineral. Posteriormente, la muestra pulverizada fue lavada con agua destilada y después secada para proceder a la separación magnética con un separador magnético tipo Frantz. Este separador fue colocado con una inclinación frontal y lateral de +15°. la muestra se hizo pasar a través de un carril a distintos amperajes del imán que varían de 0–2 Amp. La fracción no-magnética final se utilizó para separarla en líquido pesado de densidad conocida, tal como el Ioduro de Metileno (MEI; *Methylene Iodide*, densidad de 3.32 g/cm³). Después de obtener la fracción pesada donde se encuentran los zircones (densidad del zircón: 3.9–4.8 g/cm³), estos se lavaron con acetona para disolver cualquier residuo, hasta, finalmente obtener el

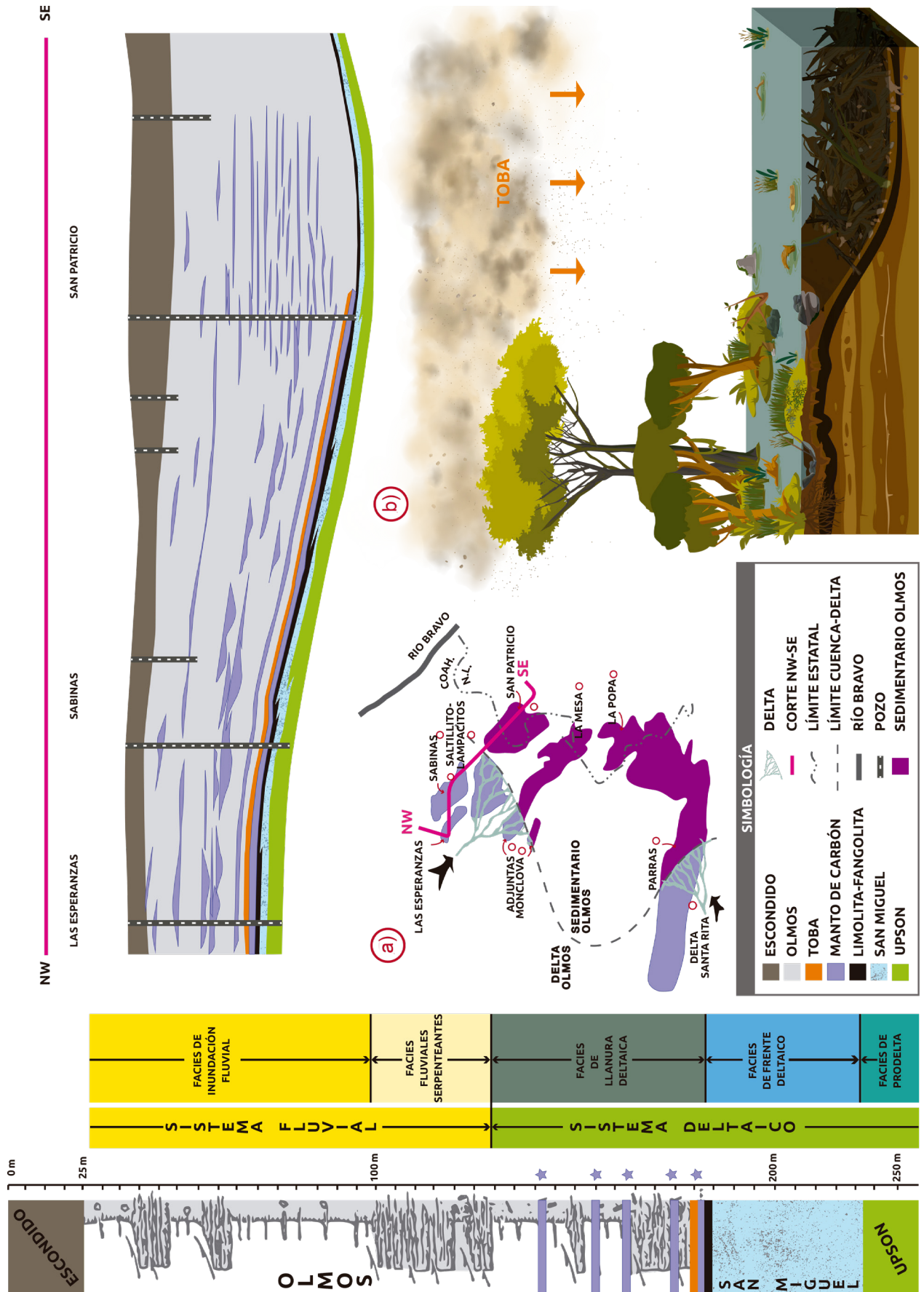


Figura 4. Columna detallada de la Formación Olmos y distribución regional del delta y sedimentos de la misma formación (a), con corte esquemático que muestra la distribución de los mantos y ambiente paleo geográfico de su formación (b).

concentrado final, el cual fue guardado en recipientes pequeños de vidrio para posteriormente montarlos. Después, alrededor de cincuenta granos de zircón de muestra fueron seleccionados cuidadosamente bajo un microscopio binocular con la finalidad de asegurarnos que los cristales fueran representativos de varias poblaciones de zircons (tamaño, forma y color) para después ser montados en una resina epóxica y, posteriormente, desbastados hasta exponer una superficie lo más cercana posible a la mitad ecuatorial de los zircons. Estas Probetas con zircons expuestos permitió la obtención de fotografías de microscopía óptica (luz transmitida y reflejada) y electrónica (imágenes de catodoluminiscencia SEM-CL). Esta caracterización microscópica permitió elegir los lugares del zircón más adecuados para el estudio de geocronología U–Pb utilizando el método laser-ICP-MS.

Los análisis isotópicos de U–Pb en zircons fueron realizados en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) en el Centro de Geociencias (CGEO), UNAM, Campus Juriquilla, Querétaro, utilizando la técnica de ablación láser (LA-ICP-MS). Esta técnica de microanálisis y fechamiento es ventajosa ya que permite hacer mediciones isotópicas de alta precisión y rapidez para obtener edades y concentraciones geoquímicas en materiales geológicos (Solari et al., 2010).

El LEI cuenta con un sistema de ablación láser modelo Resolution M50 de la marca “Resonetics” compuesto por un láser LPX 220 tipo excímero de 193 nm de longitud de onda utilizando una mezcla de fluoruro de argón (ArF) para generar la pulsación. Este se encuentra acoplado a un espectrómetro de masas (ICP-MS) tipo cuadrupolo

marca “Thermo X-Series”. El sistema fue recientemente descrito por Solari et al. (2010), quienes presentaron la metodología para los análisis isotópicos U(Th)-Pb en zircons. Los datos isotópicos fueron adquiridos utilizando el software analítico Thermo PlasmaLab con resolución temporal, permitiendo que las relaciones isotópicas sean calculadas de los datos adquiridos en un intervalo de tiempo específico. Debido a que el trabajo analítico requiere de una precisa y sistemática reducción de los datos, cálculo de edades y concentraciones elementales de los zircons analizados, en el LEI (UNAM) se ha desarrollado el software “UPb.age” para facilitar a los usuarios una rápida y transparente reducción de datos para los fechamientos U(Th)-Pb por LAICPMS (ver Solari et al., 2010, Solari y Tanner, 2011). Nuestros datos ya tratados bajo esta modalidad se presentan en la Figura 5 y en la Tabla 1.

DISCUSIÓN

La acumulación de turba se lleva a cabo *in situ*, en el propio medio de vida de las plantas como deltas, estuarios o albuferas y, muy pocas veces, por transporte en medios distintos al de su formación. Estas características permiten diferenciar los carbones autóctonos, formados en el propio ecosistema, y los carbones alóctonos, formados en un medio diferente al ecosistema original, por lo que la materia vegetal ha sufrido un transporte más o menos largo. Según el medio de formación,

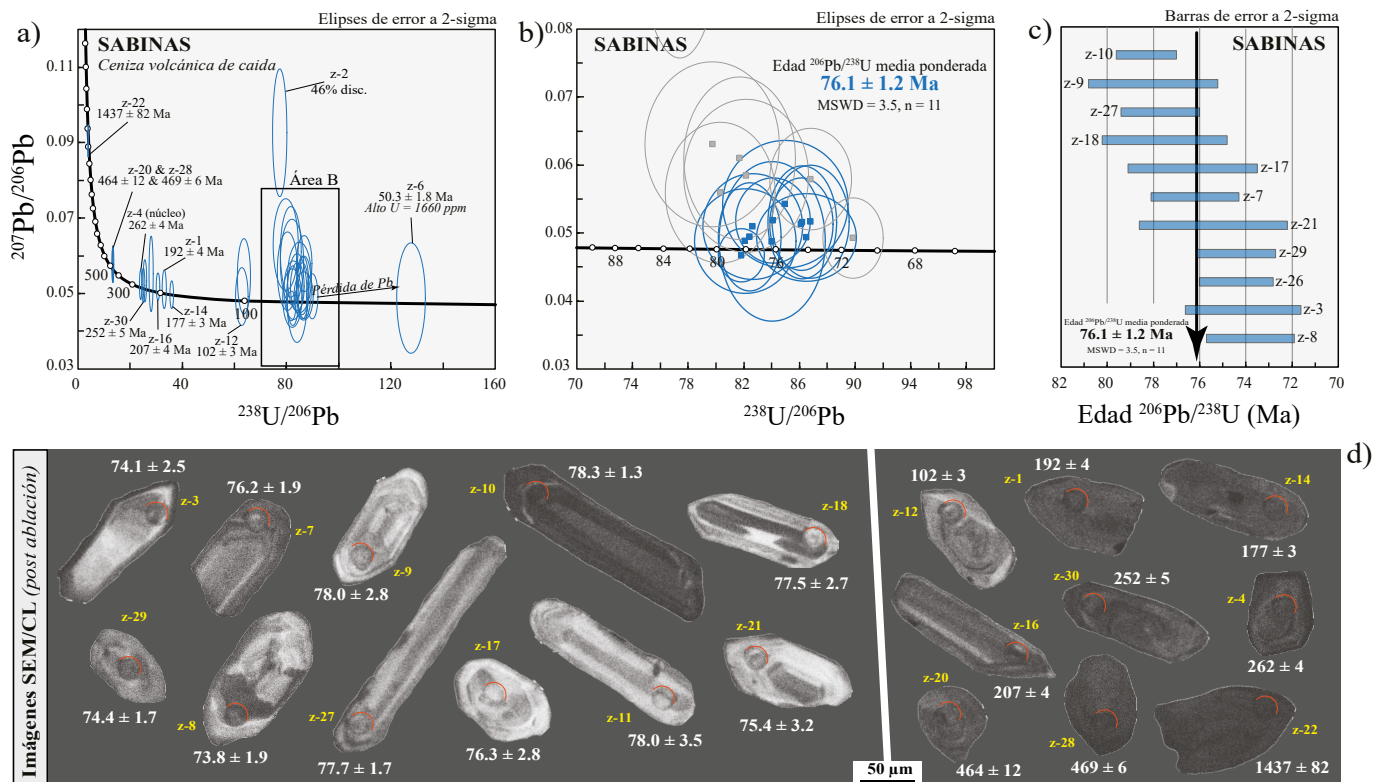


Figura 5. Gráficos de datos U–Pb obtenidos mediante la técnica de ablación láser (LA-ICP-MS) e imágenes de catodoluminiscencia de zircons de la muestra SABINAS. (a) Diagrama de concordia tipo Tera-Wasserburg mostrando todos los datos de los zircons analizados. (b) Acercamiento a los datos más jóvenes en donde se muestra la edad $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ media ponderada calculada. Las elipses y cuadros de color azul representan los análisis utilizados para el cálculo de la edad media ponderada, mientras que las elipses y cuadros de color gris representan los datos que fueron descartados para el cálculo de la edad debido a que representan zircons con un cierto grado de pérdida de Pb, altas discordancias y/o herencias. (c) Diagrama de media ponderada mostrando los análisis utilizados para calcular la edad media ponderada. (d) Imágenes de catodoluminiscencia post ablación láser de los zircons representativos de algunos de los análisis utilizados para el cálculo de la edad media ponderada, donde los medios círculos rojos corresponden al lugar de ablación de un diámetro de $\sim 23 \mu\text{m}$. En la parte derecha, se muestran zircons con edades más viejas del Cretácico, Jurásico, Triásico, Pérmico, Ordovícico y Mesoproterozoico.

Tabla 1. Datos analíticos U–Pb obtenidos por LA-ICPMS en zircones de la muestra denominada SABINAS: toba volcánica de caída.

RELACIONES ISOTÓPICAS CORREGIDAS										EADAES CORREGIDAS (Ma)												
Análisis/ Zirón	Comen- tario	U ^a (ppm)	Th ^a (ppm)	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ⁺		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ^{††}		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ^{††}		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th [†]		Rho ^{***}	% disc ^{***}	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±2s ⁺	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ±2s ⁺	Mejor edad ± 2s (Ma)				
					err. %	err. %	err. %	err. %	err. %													
Muestra SABINAS Ceniza volcánica de caída										Probeta ICGEO-250 (Octubre 2019)												
SABINAS-6	B+N, >U	1660	1610	0.97	0.0481	15.2	0.0527	24.7	0.0078	3.58	0.0022	9.5	0.14	3	50.3	1.8	52.1	6.3	120	180	50.3	± 1.8
SABINAS-25	B, >U	576	266	0.46	0.0491	10.0	0.0756	10.1	0.0111	1.98	0.0037	8.6	0.20	3	71.4	1.4	73.8	7.1	240	190	71.4	± 1.4
SABINAS-8	B+N	392	423	1.08	0.0513	12.5	0.0820	13.4	0.0115	2.60	0.0038	5.5	0.19	7	73.8	1.9	79.4	9.8	170	220	73.8	± 1.9
SABINAS-13	B+N, >U	673	931	1.38	0.0602	10.5	0.0920	10.9	0.0115	2.78	0.0038	5.6	0.26	18	73.8	2.0	90.0	9.4	520	190	73.8	± 2.0
SABINAS-3	B+N	290	141	0.48	0.0509	11.2	0.0787	11.2	0.0116	3.37	0.0039	9.6	0.30	3	74.1	2.5	76.6	8.3	180	220	74.1	± 2.5
SABINAS-26	B+N, >U	1061	672	0.63	0.0527	9.3	0.0821	11.1	0.0116	2.15	0.0034	13.6	0.19	7	74.4	1.6	80.0	8.3	290	180	74.4	± 1.6
SABINAS-29	N	394	271	0.69	0.0508	13.2	0.0825	13.3	0.0116	2.33	0.0036	10.1	0.17	7	74.4	1.7	80.2	10.0	260	260	74.4	± 1.7
SABINAS-21	B	144	89	0.62	0.0547	15.9	0.0880	14.8	0.0118	4.33	0.0038	12.8	0.29	11	75.4	3.2	85.0	12.0	310	290	75.4	± 3.2
SABINAS-7	B	384	340	0.89	0.0523	10.1	0.0850	10.2	0.0119	2.61	0.0036	7.3	0.25	10	76.2	1.9	84.6	8.1	280	200	76.2	± 1.9
SABINAS-17	N	147	108	0.73	0.0520	19.2	0.0800	20.0	0.0119	3.70	0.0037	12.8	0.18	2	76.3	2.8	78.0	15.0	190	350	76.3	± 2.8
SABINAS-18	B+N	209	186	0.89	0.0525	14.9	0.0850	12.9	0.0121	3.55	0.0039	8.0	0.27	7	77.5	2.7	83.0	9.9	180	270	77.5	± 2.7
SABINAS-27	B+N	334	151	0.45	0.0499	11.6	0.0827	13.3	0.0121	2.23	0.0040	9.2	0.17	7	77.7	1.7	83.7	11.0	190	240	77.7	± 1.7
SABINAS-9	B+N	236	128	0.54	0.0492	14.6	0.0820	13.4	0.0122	3.61	0.0038	10.6	0.27	3	78.0	2.8	80.0	11.0	60.0	280	78.0	± 2.8
SABINAS-11	B+N	124	90	0.73	0.0591	15.1	0.0980	16.3	0.0122	4.44	0.0036	11.8	0.27	20	78.0	3.5	98.0	15.0	620	300	78.0	± 3.5
SABINAS-10	B+N, >U	1322	736	0.56	0.0474	7.4	0.0787	7.0	0.0122	1.64	0.0040	5.2	0.23	-2	78.3	1.3	76.8	5.2	60.0	150	78.3	± 1.3
SABINAS-15	B	132	87	0.66	0.0640	18.8	0.1030	16.5	0.0122	4.00	0.0043	11.2	0.24	20	78.4	3.1	98.0	16.0	510	340	78.4	± 3.1
SABINAS-24	B	166	122	0.74	0.0510	19.6	0.0960	15.6	0.0125	4.02	0.0043	8.8	0.26	16	79.8	3.2	95.0	14.0	360	340	79.8	± 3.2
SABINAS-23	B+N	92	74	0.80	0.0610	18.0	0.1090	16.5	0.0125	4.94	0.0045	9.7	0.30	22	80.3	3.9	103	16	410	330	80.3	± 3.9
SABINAS-2	B+N	285	263	0.92	0.0930	14.0	0.1650	15.2	0.0129	2.86	0.0059	8.0	0.19	46	82.7	2.4	154	21	1500	190	82.7	± 2.4
SABINAS-19	B+N	128	84	0.65	0.0562	16.2	0.1180	15.3	0.0157	3.25	0.0053	9.3	0.21	10	100	3	112	17	240	320	100	± 3
SABINAS-12	B+N	207	60	0.29	0.0486	12.8	0.1080	13.0	0.0159	3.02	0.0058	12.5	0.23	1	102	3	103	12	120	250	102	± 3
SABINAS-14	B+N, >U	510	236	0.46	0.0489	6.1	0.1903	6.3	0.0278	1.69	0.0088	5.2	0.27	0	177	3	177	10	150	140	177	± 3
SABINAS-1	B+N	289	128	0.44	0.0527	8.5	0.2130	8.5	0.0302	1.92	0.0095	5.9	0.23	3	192	4	197	15	250	170	192	± 4
SABINAS-16	B+N	347	398	1.15	0.0519	6.0	0.2330	6.0	0.0326	1.87	0.0095	4.4	0.31	4	207	4	215	11	300	130	207	± 4
SABINAS-31	B+N	174	217	1.24	0.0569	12.7	0.2710	15.1	0.0356	2.53	0.0123	8.2	0.17	7	225	6	242	30	410	230	225	± 6
SABINAS-5	B	181	136	0.75	0.0532	8.3	0.2870	8.7	0.0390	1.95	0.0122	5.0	0.22	5	247	5	259	19	340	180	247	± 5
SABINAS-30	B+N	351	339	0.97	0.0535	6.9	0.2860	7.3	0.0398	2.01	0.0126	7.0	0.27	1	252	5	255	17	320	150	252	± 5
SABINAS-4	N	365	212	0.58	0.0523	6.3	0.2990	6.4	0.0414	1.57	0.0136	4.9	0.25	2	262	4	266	15	280	130	262	± 4
SABINAS-20	B+N	226	128	0.56	0.0579	5.7	0.5940	7.4	0.0746	2.68	0.0244	4.1	0.36	4	464	12	481	26	520	130	464	± 12
SABINAS-28	N >U	524	22	0.04	0.0571	5.6	0.5980	6.4	0.0755	1.30	0.0252	10.7	0.20	1	469	6	475	24	503	120	469	± 6
SABINAS-22	B+N	214	73	0.34	0.0908	4.3	3.1510	4.1	0.2526	1.31	0.0746	4.2	0.32	0	1452	17	1447	30	1437	82	1437	± 82
n = 31														Edad ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U media ponderada = 76.1 ± 1.2 (2 sigma, MSWD = 3.5; n = 11 de 17)								

Abreviaturas: N = núcleo, B = borde, B+N = borde+núcleo, >U = alto Uranio, >D = alta discordancia.

^aLas concentraciones de U y Th (ppm) fueron calculadas con relación al análisis del vidrio estándar NIST 610 para elementos traza. ^bRelaciones isotópicas corregidas con relación al zircón estándar de edad conocida (91500 de ~1065 Ma; Wiedenbeck *et al.*, 1995) por el fraccionamiento de masa y deriva instrumental. Las relaciones isotópicas, edades y errores son calculados como en Paton *et al.* (2010). ^cTodos los errores en las relaciones isotópicas son en porcentaje y los de las edades en absoluto y, en ambos casos, están reportados a nivel 2 sigma, incluida la edad ²⁰⁶Pb/²³⁸U media ponderada. Estas incertidumbres han sido propagadas según la metodología de Paton *et al.* (2010). ^dRho es el valor de correlación de errores definido como el cociente de los errores (en porcentaje) de las relaciones isotópicas de ²⁰⁶Pb/²³⁸U y ²⁰⁷Pb/²³⁵U. El valor Rho es necesario para graficar los datos U-Th-Pb en diagramas de concordia. ^ePorcentaje de discordancia obtenido usando la siguiente ecuación (100*[(edad ²⁰⁷Pb/²³⁵U)-(edad ²⁰⁶Pb/²³⁸U)]/(edad ²⁰⁷Pb/²³⁵U)). Valores positivos y negativos indican discordancias normales y discordancias inversas, respectivamente. Las edades individuales de cada zircón marcadas en negrita y en cursiva fueron usadas para calcular las edades medias ponderadas y el MSWD (Mean Square of Weighted Deviates) usando el programa computacional Isoplot (Ludwig, 2003).

también es posible diferenciar entre los carbones límnicos, formados en medios lacustres, y parálcos, formados en ambientes transicionales como deltas, estuarios o lagunas (Weber, 1972, 1973, 1975, 1976; Piedad-Sánchez *et al.*, 2005a, 2005b y 2005c, entre otros). Así los medios más propicios en los que pueden darse procesos de acumulación de materia vegetal son (Corona Esquivel *et al.*, 2006): 1) Lagunas, estuarios y marismas, saladas o salobres que son zonas con comunicación ocasional con el mar, en las que se produce una importante actividad biológica vegetal. 2) Zonas pantanosas, ciénagas, canales, lagos y charcas intracontinentales, con vegetación de tipos diversos (herbácea o leñosa) controlada por la profundidad del medio, sus condiciones del fondo, temperatura de las aguas, etc. 3) Manglares de las zonas tropicales que se encuentran bordeando a las lagunas y a los estuarios. 4) Ambientes fluviales y deltaicos. Un factor también importante es el clima (paleoclima) imperante durante la época de formación del carbón. Los más favorables son los paleoclimas tropicales, generadores de vegetación exuberante. Asimismo, es importante considerar la edad de las series sedimentarias en las que aparece, ya que las plantas vasculares aparecieron en el Silúrico, y poblaron la mayor parte de la superficie de la Tierra durante el Devónico, originándose entonces los depósitos de carbón más antiguos conocidos. Posteriormente, se formaron yacimientos de carbón prácticamente de todas las edades, aunque existen períodos especialmente favorables que se explican por factores fundamentalmente tectónicos, paleoclimáticos y de tipo de vegetación predominante en cada uno de dichos períodos (Piedad-Sánchez *et al.*, 2005c). En específico para la Cuenca de Sabinas, los estudios paleobotánicos realizados en la Formación Olmos por Weber

(1972, 1973, 1975, 1976), Cevallos-Ferriz y Weber (1992), Estrada-Ruiz (2004), Estrada-Ruiz *et al.*, (2007) han documentado más de 80 plantas fósiles diversas entre las que destacan: *Liriodendron*, *Pistia*, *Sassafras*, y *Sabalites* (Weber 1972, 1976), *Paraphyllanthoxylon* (Cevallos-Ferriz y Weber, 1992), *Palmoxylon* (Cevallos-Ferriz y Ricalde-Moreno, 1995) y *Gymnosperms* (Weber, 1975; Serlin *et al.*, 1980; Cevallos-Ferriz, 1992). El polen y esporas fueron documentados por Rueda-Gaxiola (1967) y Martínez-Hernández *et al.*, (1980). La Formación Olmos se interpreta como un sistema deltaico por Flores-Espinoza (1989) en un ambiente climático sub-tropical (Weber, 1972, 1975, 1976).

Justo al norte del área de este trabajo, en el límite con E.U.A., Robinson *et al.*, (1995) reportan en una reconstrucción paleogeografía de rocas volcanoclásticas que están relacionadas a depósitos de carbón en el rango de edad 79 a 72 Ma, datos similares fueron reportados por Elder (1988), Thomas *et al.*, (1990), Cadrin *et al.*, (1995), Roberts *et al.*, (2005), Foreman *et al.*, (2008) y Jinnah *et al.*, (2009). Al este del área de estudio, Castro-Reino (2004), Becerra-González (2006), González-Alejandro y Martínez-Limas (2009), Navarro-Gutiérrez (2010), Serna-Pedraza (2011), Martínez-Paco (2012) y Velasco-Tapia *et al.*, (2016) determinaron, en lo que se denomina la Formación San Felipe, el depósito de cenizas volcánicas acumuladas en un ambiente de talud en el rango de 84–74 Ma por el método U–Pb en zircones. En la Figura 6 y Tabla S1 (del material suplementario), se presentan los datos publicados en la región Norte de México (Sierra Madre Occidental y Oriental) en el rango de 62 Ma a 89 Ma. Por otro lado, es conocido que la subducción al occidente de área de estudio ha estado activa durante todo el Cretácico hasta el Cenozoico con la generación

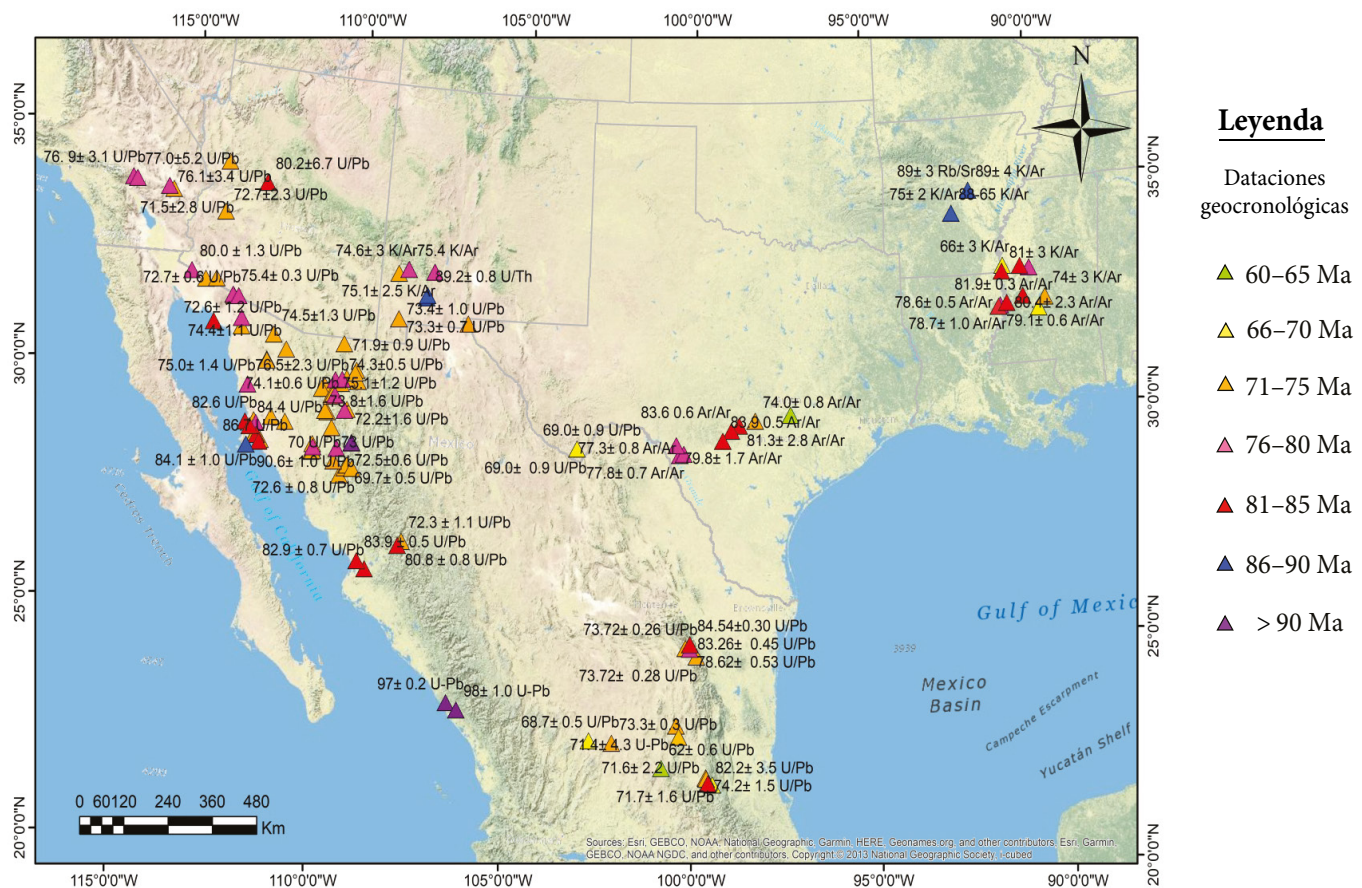


Figura 6. Recopilación de datos Geocronológico-existent en edades que van desde 62 Ma a 90 Ma para el Occidente de México y Sierra Madre Oriental, los detalles bibliográficos se presentan en la Tabla S1 del Material Suplementario.

de cuerpos intrusivos y efusivos en lo que se conoce como el arco magmático Laramídico mexicano, conformado en gran parte por la Sierra Madre Occidental (ej., Damon *et al.*, 1981; Mújica-Mondragón y Jacobo-Albarrán 1983; McDowell *et al.*, 2001; González-León *et al.*, 2011; entre otros).

CONCLUSIÓN

Como se puede apreciar, rocas vulcanoclásticas han sido reportadas para el Cretácico Superior, provenientes del Occidente de México y que están representados por lo que se conoce como Sierra Madre Occidental, una de las provincias volcánicas más grandes del mundo y la toba relacionada a los mantos de carbón forma parte de este magmatismo.

Recientemente, Fonseca Martínez (2022) realizó una base de datos geocronológicos U–Pb en zircones para el noroeste de México, en donde se reportan numerosos datos que concuerdan con la edad determinada en este trabajo de 76.1 ± 1.2 Ma por el método U–Pb. En este sentido la Cuenca de Sabinas, y sus mantos de carbón, son un buen referente para la combinación de métodos de investigación geocronológica y paleobotánica.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

La Tabla S1 con el resumen de los datos geocronológico-publicados en el rango de 62 Ma a 90 Ma para México y Estados Unidos de Norteamérica, se puede descargar desde la vista previa de este artículo en la página web de la Revista <www.rmccg.unam.mx>.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es financiado por la Universidad Nacional Autónoma de México, en el proyecto PAPIIT denominado “Procesos diagenéticos e historia térmica de los mantos de carbón con potencial de gas (CBM) en la Cuenca de Sabinas: Sub-Cuencas Sabinas, Las Esperanzas y Saltillito-Lampacitos” con número de expediente IN114522. Igualmente forma parte del proyecto doctoral de Aurea González-Betancourt que se lleva a cabo en el Centro de Geociencias de la UNAM Campus Juriquilla. Se agradece muy espacialmente a Walter Reátegui, por la separación de los zircones y a Carlos Ortega por la medición espectrométrica, así como a los revisores Luis Fernando Camacho Ortégón y César Francisco Ramírez Peña por sus importantes observaciones para mejorar este trabajo.

REFERENCIAS

Alencáster, G., 1961, Fauna fósil de la Formación Santa Clara (Cárnico): Paleontología Mexicana, 11, Parte III, 1-44.
 Allègre, C., 2008, Isotope geology: New York, EE.UU., Cambridge University Press, 1^{ra} edición, 512 pp.
 Arvizu-Gutiérrez, H.E., 2012, Magmatismo permo-triásico en el NW de Sonora, México: Inicio de la subducción y maduración de un margen continental activo: Juriquilla, Qro. México, Centro de Geociencias, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, pp. 242.
 Barboza, L.D., Santiago C.B., Izaguirre R.M.A., Martínez R.C., Gracia V.M., 1997, Carta Geológico- Minera Monclova, G14-4, escala 1:250,000 Estados de Coahuila y Nuevo León: Pachuca Edo. de Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa.

Barra, F., Valencia, V.A., 2014, Late Cretaceous porphyry copper mineralization in Sonora, Mexico: Implications for the evolution of the Southwest North America porphyry copper province: Mineralium Deposita, 49(7), 879-884.
 Baksi, A.K., 1997, The Timing of Late Cretaceous Alkaline Igneous Activity in the Northern Gulf of Mexico Basin, Southeastern USA: The Journal of Geology, 105, 629-643.
 Becerra González, C. 2006. Estudio geoquímico y mineralógico de los sedimentos clásticos de la Formación San Felipe, NE de México: Linares, N.L., México, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Licenciatura (Ing. Geólogo), 126 pp.
 Böse, E., Cavins, O. A., 1927, The Cretaceous and Tertiary of southern Texas and northern Mexico: Texas University Bulletin, 2748, 7-142.
 Cadrin, A.A.J., Kyser, T.K., Caldwell, W.G.E., Longstaffe, F.J., 1995, Isotopic and chemical compositions of bentonites as paleoenvironmental indicators of the Cretaceous Western Interior Seaway: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 119, 301-320, [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(95\)00015-1](https://doi.org/10.1016/0031-0182(95)00015-1)
 Castro-Reino, S.F., 2004, Intrusion-related Mineralization in the Central Sector of the Sierra Madre Oriental, Mexico: Tucson, Arizona, University of Arizona, Tesis Doctoral, 500 pp.
 Castillo-Cerón, J.M., Cabral-Perdomo, M.A., Carranza-Castañeda, O., 1996, Vertebrados fósiles del Estado de Hidalgo: Pachuca, Hgo., Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México, Publicación Especial, 127 pp.
 Cevallos-Ferriz, S.R.S., 1992, Tres maderas de gimnospermas cretácicas del norte de México: Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica, 63(2), 111-137.
 Cevallos-Ferriz, S.R.S., Ricalde-Moreno, O.S., 1995, Palmeras fósiles del norte de México Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica, 66, 37-106.
 Cevallos-Ferriz, S.R.S., Weber, R., 1992, Dicotyledonous wood from the Upper Cretaceous (Maastrichtian) of Coahuila: Instituto de Geología, Revista. 10(1), 65-70.
 COREMI (Consejo de Recursos Minerales), 1994, Monografía Geológico-Minera del Estado de Sonora: México D.F., México, Subsecretaría de Minas e Industria Básica, 220 pp.
 COREMI (Consejo de Recursos Minerales), 1996, Monografía Geológico-Minera del Estado de Oaxaca: México D.F., México, 280 pp.
 Cope, E.D., 1886, Report in the coal deposits near Zacualtipán, in the State of Hidalgo, Mexico: American Philosophical Society, 23, 146-151.
 Corona-Esquivel, R., 1978, Estudio Geológico de los depósitos carboníferos de la porción noreste del Estado de Guerrero: México, D.F., Consejo de Recursos Minerales (informe inédito), 59 p.
 Corona-Esquivel R., Tritlla, J., Benavides-Muñoz, M.E., Piedad-Sánchez, N., Ferrusquía-Villafranca, I., 2006, Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LVIII(1), 141-160.
 Cuéllar-Cárdenas, M.A., Nieto-Samaniego, A.F., Levresse, G., Alaniz-Álvarez, S.A., Solari, L., Ortega-Obregón, C., López-Martínez, M., 2012, Límites temporales de la deformación por acortamiento Laramide en el centro de México: Revista mexicana de ciencias geológicas, 29(1), 179-203.
 Chapman, J.B., Dabov, M.N., Gehrels, G., Ducea, M.N., Valley, J.W., Ishida, A., 2018, Lithospheric architecture and tectonic evolution of the southwestern U.S. Cordillera: Constraints from zircon Hf and O isotopic data: Bulletin of the Geological Society of America, 130(11-12), 2031-2046.
 Clinkscales, C.A., Lawton, T.F., 2015, Timing of Late Cretaceous shortening and basin development, Little Hatchet Mountains, southwestern New Mexico, USA – implications for regional Laramide tectonics: Basin Research, 27, 453-472.
 Christiansen, E.H., Kowallis, B.J., Barton, M.D., 1994, Temporal and spatial distribution of volcanic ash in Mesozoic sedimentary rocks of the Western Interior: an alternative record of Mesozoic magmatism, *en* Caputo, M.V., Peterson, J.A., Franczyk, K.J., (eds.): Mesozoic Systems of the Rocky Mountain Region, USA, Rocky Mountain Section (SEPM), 73-94.
 Damon, P.E., Shafiqullah, M., Clark, K.F., 1981, Age trends of igneous activity in relation to metallogenesis in the Southern Cordillera, *en* Dickinson, W.R., Payne, W.D. (eds.), Relations of Tectonics to Ore Deposits in

- Southern Cordillera: Arizona Geological Society Digest, 14, 137-154.
- Díaz-Bravo, Beatriz A., Barboza-Gudiño, José R., Ortega-Obregón, C., Morales-Gámez, M., 2022, Late Cretaceous to Oligocene overlapping plutonic magmatism episodes in the eastern Mesa Central province of Mexico: International Geology Review, 64(5), 675-697. DOI: 10.1080/00206814.2021.1871866
- Dumble, E.T., 1899, Notes on the Geology of Sonora: Institute Mining Engineers, Transactions A. M. Vol XXIX, 122-152.
- Dumble, E.T., 1892, Notes on the geology of the Valley of the Middle Rio Grande: Geological Society of America Bulletin, 3, 219-230.
- Enríquez-Castillo, M.A., Iriondo, A., Chávez-Cabello, G., Kunk, M.J., 2009, Interacción termal entre magmas graníticos laramídicos y rocas encajonantes mesoproterozoicas: Historia de enfriamiento de intrusivos de la sierrita blanca, NW Sonora: Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana, 61(3), 451-483.
- Eguiluz de Antuñano, S., 2001, Geologic evolution and gas resources of the Sabinas basin in northeastern Mexico, *en* Bartolini, C., Bufler, R.T., Cantú-Chapa, A., (eds.), The western Gulf of Mexico Basin: tectonics, sedimentary basins and petroleum systems: AAPG Memoir, 75, 241-270.
- Eguiluz, A.S., Amezcua, N., 2003, Coalbed methane resources of the Sabinas Basin, Coahuila, México, *en* Bartolini, C., Bluffer, R.T., Blickede, J. (eds.), The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, 395-402.
- Elder, W.P., 1988, Geometry of Upper Cretaceous bentonite beds: implications about volcanic source areas and paleowind patterns, western interior, United States: Geology, 16, 835-838.
- Estrada-Ruiz, E., 2004, Frutos permineralizados de la Formación Cerro del Pueblo (Maastrichtiano), Coahuila, México: Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, 61 pp.
- Estrada-Ruiz, E., Hugo I. Martínez-Cabrera, Sergio R.S. Cevallos-Ferriz, 2007, Fossil woods from the late Campanian-early Maastrichtian Olmos Formation, Coahuila, Mexico: Review of Palaeobotany and Palynology, 145, 123-133.
- Estrada-Sánchez, A., 2018, Geocronología U-Pb y composición geoquímica de granitoides laramídicos emplazados en rocas paleozoicas del terreno Cortés, Sonora Central, México: Hermosillo, Son, México, Universidad de Sonora, Tesis de Licenciatura.
- Erben, Heinrich K., 1956a, El Jurásico Inferior de México y sus amonitas, *en* XX Sesión, Congreso Geológico Internacional: México, Impresiones Modernas, 393 p.
- Erben, Heinrich K., 1956b, El Jurásico Medio y el Calloviano de México, *en* XX Sesión, Congreso Geológico Internacional: México, Impresiones Modernas, 140 p.
- Ferrusquía-Villafranca, I., 1978, Distribution of Cenozoic vertebrate faunas in Middle America and problems of migration between North and South America, *en* Conexiones terrestres entre Norte y Sudamérica: Simposio Interdisciplinario sobre Paleogeografía Mesoamericana: Boletín del Instituto de Geología de la UNAM, 101, 193-321.
- Finch, R.J., Hanchar, J.M. 2003, Structure and chemistry of zircon and zircon-group mineral: Review in Mineralogy and Geochemistry, 53(1), 1-25.
- Flores, T., 1930, Reconocimientos geológicos en la región central de estado de Sonora: Boletín del Instituto de Geología de la UNAM, 49, 267 p.
- Flores-Espinoza, E., 1989, Stratigraphy and sedimentology of the Upper Cretaceous terrigenous rocks and coal of the Sabinas-Monclova area, Northern Mexico: Austin, Texas, University of Texas, Tesis de Doctorado, 315 pp.
- Flores-Galicia, E., 1988, Geología y reservas de los yacimientos de carbón en la República Mexicana, *en* Salas, G.P. (ed.), Geología de México: México, Fondo de Cultura Económica, 175-217.
- Fonseca Martínez A.B. 2022, Definición de límites corticales de basamento y evaluación de asimilación cortical de a partir de estudios de geocronología U-Pb y Hf en zircones de granitos laramídicos: Juriquilla, Qro., México, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, 120 pp.
- Foreman, B.Z., Rogers, R.R., Deino, A.L., Wirth, K.R., Thole, J.T., 2008, Geochemical characterization of bentonite in the Two Medicine Formation (Campanian, Montana), including a new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age: Cretaceous Research, 29, 373-385.
- García-Martínez, D., Molina-Garza, R., Roldán-Quintana, J., Mendivil-Quijada, H., 2014, Ca. 13 Ma strike-slip deformation in coastal Sonora from a large-scale, En-echelon, Brittle-ductile, Dextral shear indicator: Implications for the evolution of the California rift: Geophysical International, 53(4), 435456.
- Goldhammer, R.K., 1999, Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast of Mexico, *en* Bartolini, C., Wilson, J.L., Lawton, T.F., (eds.), Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of North America Special Paper 340, 1-58.
- Goldhammer, R.K., Johnson, C.A., 2001, Middle Jurassic-Upper Cretaceous Paleogeographic evolution and sequence-stratigraphic framework of the northwest Gulf of México rim, *en* Bartolini, C., Bufler, R. T., Cantú-Chapa, A., (eds.), The western Gulf of México Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 75, 45-81.
- Goldhammer, R.K., Dunn, P.A., Lehmann, P.J., 1993, The origin of high-frequency platform carbonate cycles and third-order sequences (Lower Ordovician El Paso Group, west Texas): Constraints from outcrop data, inverse and forward stratigraphic modelling: Journal of Sedimentary Petrology, 63, 318359.
- Goldhammer, R.K., Lehmann, P.J., Todd, R.G., Wilson, J.L., Ward, W.C., Johnson, C.R., 1991, Sequence stratigraphy and cyclostratigraphy of the Mesozoic of the Sierra Madre Oriental, northeast Mexico, a field guidebook: Gulf Coast Section, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 85 pp.
- González-Becuar, E., Pérez-Segura, E., Vega-Granillo, R., Solari, L., González-León, C. M., Solé, J., López-Martínez, M., 2017, Laramide to Miocene syn-extensional plutonism in the Puerta del Sol area, central Sonora, Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 34(1), 45-61.
- González-León, C.M., Solari, L., Solé, J., Ducea, M.N., Lawton, T.F., Bernal, J.P., González-Becuar, E., Gray, F., López-Martínez, M., Lozano-Santacruz, R., 2011, Stratigraphy, geochronology, and geochemistry of the Laramide magmatic arc in north-central Sonora, México: Geosphere, 7(6), 1392-1418.
- González-León, C.M., Solari, L., Valencia-Moreno, M., Rascon-Heimpel, M., Solé, J., González-Becuar, E., Lozano-Santacruz, R., Pérez-Arvizu, O., 2017, Late Cretaceous to early Eocene magmatic evolution of the Laramide arc in the Nacozari quadrangle, northeastern Sonora, Mexico and its regional implications: Ore Geology Reviews, 81, 1137-1157.
- González-Alejandro, A.G., Martínez-Limas, N.A., 2009, Formación San Felipe: Caracterización mineralógica y geoquímica de rocas clásticas en el N de la Sierra Madre Oriental, NE de México: Linares, N.L., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, México, Tesis de Licenciatura (Ing. Geólogo), 149 pp.
- González-Sánchez, F., Camprubí, A., González-Partida, E., Puente-Solís, R., Canet, C., Centeno-García, E., Atudorei, V., 2009, Regional stratigraphy and distribution of epigenetic stratabound celestine, fluorite, barite and Pb-Zn deposits in the MVT province of northeastern Mexico: Mineralium Deposita, 44, 343-361.
- González-Sánchez, F., Puente-Solís, R., González-Partida, E., Camprubí, A., 2007, Estratigrafía del Noreste de México y su relación con los yacimientos estratoligados de fluorita, barita, celestina y Zn-Pb: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 59, 43-62.
- González-Partida E., Sánchez, F., González-Carrillo, Piedad Sánchez, N., 2020, Procesos diagenéticos e historia térmica de los mantos de carbón con potencial de gas (CBM) en la Cuenca de Sabinas: Sub-Cuencas Sabinas, Las Esperanzas y Saltillito-Lampacitos, *en* Memoria del XXX Congreso Nacional de Geoquímica: ACTAS INAGEQ 2020, 26, 130-131.
- González-Partida, E., Piedad Sánchez, N., González Betancourt A., González Ruiz, D., González Sánchez, F., González Ruiz, L., 2017, Estado actual del conocimiento para el estudio de la historia térmica de cuencas y sus procesos diagenéticos: Una revisión de los métodos más aplicados, *en* memorias del XVII Congreso Nacional de Geoquímica: ACTAS INAGEQ, 2017, 209-222.
- Griffin, W.R., Foland, K.A., Stern, R.J., Leybourne, M.I., 2010, Geochronology of Bimodal Alkaline Volcanism in the Balcones Igneous Province, Texas: Implications for Cretaceous Intraplate Magmatism in the Northern Gulf of Mexico Magmatic Zone: The Journal of Geology, 118, 1-21.
- Hedlund, D.C., 1974, Age and structural setting of base-metal mineralization

- in the Hillsboro–San Lorenzo area, southwestern New Mexico (abstr.), en Siemers, C.T., Woodward, L.A., Callender, J.F. (eds.), Ghost Ranch: New Mexico Geological Society Guidebook, 25, 378–379.
- Hedlund, D.C., 1980, Geologic Map of the Redrock NE Quadrangle, Grant County, New Mexico: U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies, escala 1:24,000, Map MF-1264.
- Iriondo, A., Izaguirre, A., Arvizu, H.E., 2013, Reordenamiento geológico del área Mina La Colorada y sus alrededores: Estudios de geocronología de utilidad en la exploración mineral de la Compañía Minera Pitalla: Juriquilla, Qro., México, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Convenio de Colaboración entre Centro de Geociencias, UNAM–Compañía Minera Pitalla, S.A., Reporte, 114 pp.
- Iriondo, A., 2001, Proterozoic basements and their Laramide juxtaposition in NW Sonora, Mexico: Tectonic constraints on the SW margin of Laurentia: University of Colorado, Texas, U.S.A. Tesis de Doctorado, 222 pp.
- Jacques-Ayala, C., Barth, A.P., Wooden, J.L., 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*, 51(9–11), 1051–1077.
- Jinnah, Z.A., Roberts, E.M., Deino, A.L., Larsen, J.S., Link, P.K., Fanning, C.M., 2009, New ^{40}Ar – ^{39}Ar and detrital zircon U–Pb ages for the Upper Cretaceous Wah–weap and Kaiparowits formations on the Kaiparowits Plateau, Utah: implications for regional correlation, provenance, and biostratigraphy: *Cretaceous Research*, 30, 287–299.
- Juárez-Arriaga, E., Lawton, T.F., Solari, L.A., Stockli, D.F., 2022, Stratigraphy and origin of Upper Cretaceous wedge-top and proximal foredeep deposits in the Mexican foreland basin, east-central Mexico: *Journal of South American Earth Sciences*, 114, 103681, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103681>
- King, R.E., 1939, Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental of Mexico: *Geological Society of America*, 50(11), 1625–1722.
- Lee, J.K.W., Williams, I., Ellis, D.J., 1997, Pb, U and Th diffusion in natural zircon, *Nature*, 390 (6656), 159–163.
- Lehman, T.M., McDowell, F.W., Connelly, J.N., 2006, First isotopic (U–Pb) age for the Late Cretaceous Alamosaurus vertebrate fauna of west Texas, and its significance as a link between two faunal provinces: *Journal of Vertebrate Paleontology*, 26(4), 922–928.
- Martínez-Paco, M., 2012, Análisis petrográfico, geoquímico y geocronológico U–Pb de cenizas volcánicas alteradas de la Formación San Felipe (Cretácico Superior) en Cerro de Labradores, Galeana, N.L., Sierra Madre Oriental: Linares, N.L., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría en Ciencias Geológicas, 96 pp.
- Martínez-Hernández, E., Almeida-Leñero, L., Reyes-Salas, M., Betancourt-Aguilar, Y., 1980, Estudio palinológico para la determinación de ambientes en la cuenca Fuentes-Río Escondido (Cretácico Superior), región de Piedras Negras, Coahuila: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 4(2), 167–185.
- Mahar, M.A., Goodell, P.C., Feinstein, M.N., 2016, Tectono-magmatic evolution of the Chihuahua-Sinaloa border region in northern Mexico: Insights from zircon-apatite U–Pb geochronology, zircon Hf isotope composition and geochemistry of granodiorite intrusions: *Lithos*, 264, 555–576.
- McDowell, F.W., 1971, K–Ar ages of igneous rocks from the western United States: *Isotopes*, 2, 1–16.
- McDowell, F.W., Roldan-Quintana, J., Connelly, J.N., 2001, Duration of Late Cretaceous e early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 113, 521–531.
- McLemore, V.T., Munroe, E. A., Heizler, Matt T., McKee, C., 1999, Geochemistry of the Copper Flat porphyry and associated deposits in the Hillsboro mining district, Sierra County, New Mexico, USA: *Journal of Geochemical Exploration*, 67 (1–3), 167–189.
- Merrill, R.K., 1983, Source of the volcanic precursor to Upper Cretaceous bentonite in Monroe County, Mississippi: *Mississippi Geology*, 3, 1–6.
- MICARE, (Minera Carbonífera Río Escondido), 1982, Carbón mineral y electricidad en México: Dirección de Relaciones Públicas MICARE, Publicación Especial, 54 pp.
- Mújica-Mondragón, M.R., Jacobo-Albarrán, J., 1983, Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas del Altiplano Mexicano. Internal Report e Project C-1156. Instituto Mexicano del Petróleo, México City, 78 p.
- Navarro-Gutiérrez, N.R., 2010, Estudio mineralógico y geoquímico de la Formación San Felipe en Iturbide, N.L.: Linares, N.L., México, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Licenciatura (Ing. Geólogo Mineralogista), 81 pp.
- Niño-Estrada, L., Iriondo, A., García-Flores, R., McDowell, F.W., Izaguirre, A., Bennett, S.E.K., Oskin, M.E., 2014, Edades cretácicas de rocas batolíticas de Isla Tiburón Golfo de California, en Reunión Anual 2014, Unión Geofísica Mexicana: Puerto Vallarta, Jalisco, Unión Geofísica Mexicana, Resumen, 0624.
- Nourse, J.A., Premo, W.R., Iriondo, A., Stahl, E.R., 2005, Contrasting Proterozoic basement complexes near the truncated margin of Laurentia, northwestern Sonora- Arizona international border region, en Anderson, T.H., Nourse, J.A., McKee, J.W., Steiner, M.B., (eds.), The Mojave- Sonora megashear hypothesis-development, assessment, and alternatives: *Geological Society of America Special Paper*, 393, 123–182.
- Pérez-Segura, E., González-Partida, E., Valencia-Moreno, M., 2009, Late Cretaceous adakitic magmatism in east-central Sonora, México, and its relation to Cu–Zn–Ni–Co skarns: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(2), 411–427.
- Piedad-Sánchez, N., Suárez-Ruiz, I., Martínez, L., Izart, A., Elie, M., Keravis, D., 2005a, Organic petrology and geochemistry of the Carboniferous coal seams from the Central Asturian Coal Basin (NW Spain): *International Journal of Coal Geology*, 57, 211–242.
- Piedad-Sánchez, N., Martínez L., Garza Blakaller C., 2005b, Estudio de la Industria del Carbón en la Región Carbonífera del Estado de Coahuila y del cluster del carbón a nivel mundial: *Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A.*, 16–29.
- Piedad-Sánchez, N., Martínez, L., Suárez-Ruiz, I., Alsaab, D., Izart, A., Milenkova, K., 2005c, Estudio preliminar de la estructura del carbón de la Formación Olmos en la Región Carbonífera, Coahuila, México, en *Convención Internacional de Minería XXVI: Veracruz, Ver., México*, Acta de Sesiones, 89–90.
- Piedad-Sánchez, N., Muñoz-García, A., Garza Blakaller C., Chávez Cabello B., Pérez Rodríguez, M., González Partida, E., Esquivel Vega E., Ibarra Escalante S. 2013, Propiedades del carbón del area de Nueva Rosita, Coah., para la producción de coque: *Actas del congreso INAGEQ. Cuernavaca, Morelos*, 19(1), 103–109.
- Piedad-Sánchez, N., Garza-Blackaller, S., García-Muñoz, J.L., De la Rosa-Rodríguez, G., González-Partida, E., Vega-González, M., Facundo-Arzola A., Zamora-López E., Flores-Castro A., Hernández-Noriega F., 2014, Peculiaridades del carbón en Las Esperanzas, Coahuila, México: *Actas INAGEQ*, 20(1), 140–146.
- Piedad-Sánchez, N., González-Partida, E., Vega-González, M., De la Rosa-Rodríguez, G., Garza-Blackaller, S., Muñoz-García, J.L., Corona-Esquivel, R., 2015, Madurez térmica del carbón en un área de Las Esperanzas, Coah., municipio de Melchor Múzquiz, Coah., en *Corona-Esquivel, R. (ed.), XXXI International Mining Congress: Acapulco Gro.*, octubre 2015, 127–132.
- Piedad-Sánchez, N., González-Partida, E., Peralta-Salazar, R., Hernández-Godoy, González-Carrillo, F., 2017, Métodos analíticos geoquímicos en la cadena productiva del gas asociado a carbón, en *memorias del XVII Congreso Nacional de Geoquímica: ACTAS INAGEQ 2017*, 245–258.
- Pindell, J.L., 1985, Alleghenian reconstruction and subsequent evolution of the Gulf of Mexico, Bahamas, and Proto-Caribbean: *Tectonics*, 4, 1–39.
- Pindell, J.L., 1993, Regional synopsis of the Gulf of Mexico and Caribbean evolution, en Pindell, J.L., Perkins, B.F., (eds.), *Mesozoic and early Cenozoic development of the Gulf of Mexico and Caribbean region: Gulf Coast Section, SEPM (Society for Sedimentary Geology), Foundation*, 13th Annual Research Conference, 251–274.
- Pindell, J.L., Dewey, J.F., 1982, Permo-Triassic reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico/Caribbean region: *Tectonics*, 1, 179–212, <https://doi.org/10.1029/TC001i002p00179>
- Powell, T.G., McQueen, 1984, Precipitation of sulfide ores and organic matter: Sulfate reactions at Pine Point, Canada: *Science*, 224, 63–66.
- Preston, J.W., Yancey, T.E., Pope, M.C., Miller, B.V., Ayers, W.B. 2016, U–Pb detrital zircon geochronology of the Upper Paleocene to Lower Eocene

- Wilcox Group, east-central Texas: *Geosphere*, 12(5), 1517-1531, doi: <https://doi.org/10.1130/GES01313.1>
- Prothero, D.R., Schwab F., 1996, *Sedimentary Geology, an Introduction to Sedimentary Rocks and Stratigraphy*: New York, W.H. Freeman and Company, 575 pp.
- Querol-Suñé, F., 2005, Desperdicio del gas grisú en México, *en* Convención Internacional de Minería XXVI: Veracruz, Ver., México, Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C., Acta de Sesiones, 461-465
- Rangin, C., 1978, Speculative model of Mesozoic geodynamics, Central Baja California to northeastern Sonora, México, *en* Howelle, D.C., McDougall, K.A., (eds.), *Mesozoic paleogeography of the western United States*: Los Angeles, California, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 2nd Pacific Coast Symposium, 85-105.
- Ramos-Velázquez, E., Calmus, T., Valencia, V.A., Iriondo, A., Valencia-Moreno, M., Bellon, H., 2008, U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the coastal Sonora batholith: new insights on Laramide continental arc magmatism: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(2), 314-333.
- Rascón-Heimpel, M.A., Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., Calmus, T., 2012, Geología y geoquímica del pórfido cuprífero Los Alisos, distrito minero de La Caridad, Sonora, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(2), 355-383.
- Reade, Nathan Z., Biddle, Julian M., Ricketts, Jason, W., Amato, Jeffrey, M., 2020, Zircon (U-Th) / He Thermochronologic Constraints on the Long-Term Thermal Evolution of Southern New Mexico and Western Texas: *Lithosphere*, 1. 8881315, doi: <https://doi.org/10.2113/2020/8881315>
- Reategui-Palomino, W.V., 2019, Límite de provincias paleoproterozoicas Yavapai y Mazatzal en el noroeste de Sonora y sureste de Arizona: Estudios de U-Pb y Hf en zircones de rocas paleoproterozoicas y laramílicas: Juriquilla, Qro., México, Centro de Geociencias, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, 213 pp.
- Roberts, E.M., Deino, A.L., Chan, M.A., 2005, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the Kaiparowits Formation, southern Utah, and correlation of contemporaneous Campanian strata and vertebrate faunas along the margin of the Western Interior Basin: *Cretaceous Research*, 26, 307-318.
- Robinson L.N., Kirschbaum, M.A., Kirschbaum, R., 1995, Paleogeography and coal of the Late Cretaceous of the Western Interior of Middle North America-Coal Distribution and Sediment Accumulation: U.S. Geological Survey, Professional Paper No 1561, 1-63.
- Roldán-Quintana, J., 1984, Evolución tectónica del Estado de Sonora: Instituto de Geología, Revista, 5, 178-185.
- Román-Ramos, J.R., Holguín-Quinones, N., 2001, Subsistemas generadores de la región norte de México: Boletín de la Asociación Mexicana Geólogos Petroleros, 49, 68-84.
- Rueda-Gaxiola, J., 1967, Contribution à l'étude palynologique et pétrographique du charbon crétacé du Bassin de Sabinas, Coahuila, Mexique: Lille, Francia, Faculté des Sciences, Université de Lille, Tesis Doctoral, 3 vols, 184 pp.
- Rivera-Martínez, J.C., Alcocer-Valdés C., 2003, La situación actual del aprovechamiento del carbón en el Estado de Coahuila: Boletín Técnico del Consejo de Recursos Minerales, IX, 54, 2-19.
- Robeck C., R., Pesquera V., R., Ulloa A., S., 1956, Geología y depósitos de carbón de la región de Sabinas, Estado de Coahuila, *en* XX Congreso Geológico Internacional: México, 109 pp.
- Robeck R.C., Pesquera V., R., Ulloa, A. S., 1960, Geología y depósitos de carbón de la región de Sabinas, Estado de Coahuila, *en* Sociedad Geológica Mexicana (ed.), Libro guía de la excursión C-3, XX Congreso Geológico Internacional: Geología a lo largo de la carretera entre el D.F. y Saltillo, Coah. Distritos mineros de Guanajuato y Ávalos Concepción del Oro-Mazapil, Zac. Minas de carbón de Monclova y Nueva Rosita, Coah., 87-115.
- Salas, G., Benavides, L., 1976, La exploración y las reservas mexicanas de carbón *en* Congreso ILAFA, Usos del carbón en siderurgia: Abastecimiento y Tecnologías: México, D.F., Instituto Latinoamericano del Fierro y el Acero, 79-90.
- Salas, P.G., 1980, El Programa Nacional del Carbón en México, *en* XX Convención Nacional del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos: México, D.F., México, Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos, Memorias del Congreso, 43-51.
- Santamaría-Orozco, D.M., 1990, Ambientes sedimentarios de las rocas del Cretácico Superior en la Cuenca Carbonífera de Sabinas, Estado de Coahuila, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, 72 pp.
- Santamaría-Orozco, D., 2000, Organic geochemistry of Tithonian source rocks and associated oils from the Sonda de Campeche, México: Aachen, Alemania, Universität Aachen, Tesis doctoral, 190 pp.
- Santamaría-Orozco, D., Horseld, B., 2000, La Evolución térmica de las rocas generadoras del Tithoniano en el Área Marina de Campeche, México: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 49(1-2), 116-136.
- Salvador, A., 1987, Late Triassic-Jurassic paleogeography and origin of Gulf of Mexico basin: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 71, 419-451.
- Salvador, A., 1991a, The Gulf of Mexico basin: Boulder, Colorado, Geological Society of America, *Geology of North America J*, 568 pp.
- Salvador, A., 1991b, Triassic-Jurassic, *en* Salvador, A. (ed.), The Gulf of Mexico Basin: Boulder, Colorado, Geological Society of America, *Geology of North America J*, 131-180.
- Salvador, A., 1991c, Origin and development of the Gulf of Mexico basin, *en* Salvador, A., (ed.), The Gulf of Mexico basin: Boulder, Colorado, Geological Society of America, *Geology of North America J*, 389-444.
- Sarmiento-Villagrana, A., Vega-Granillo, R., Talavera-Mendoza, O., Vidal-Solano, J.R., 2016, New age constraints on magmatism and metamorphism of the Western Sonobari Complex and their implications for an earliest Late Cretaceous orogeny on northwestern Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(2), 170-182.
- Serlin, B., Delevoryas, T.H., Weber, R., 1980, A new conifer pollen cone from the Upper Cretaceous of Coahuila, Mexico: Review of Palaeobotany and Palynology 31(3-4), 241-248.
- Serna-Pedraza, A.A., 2011, Estudio mineralógico y geoquímico de tobas alteradas de la Formación San Felipe (Cretácico Superior) en la localidad Juan Capitán, Rumbo Nuevo, Tamaulipas, México: Linares, N.L., Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Licenciatura (Ing. Geólogo Mineralogista), 87 pp.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2003, Anuario Estadístico de la Minería Mexicana: Editado en Pachuca, Estado de Hidalgo, México. 479 pp.
- Silva-Pineda, A., 1969, Plantas fósiles del Jurásico Medio de Tecamatlán, Estado de Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana, 27, Parte I, 1-76.
- Silva-Pineda, A., 1978, Plantas del Jurásico Medio del Sur de Puebla y Noroeste de Oaxaca: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana, 44, Parte III, 1-44.
- Silva-Pineda, A., 1984, Revisión taxonómica y tipificación de las plantas jurásicas colectadas y estudiadas por Wieland (1914) en la región de El Consuelo, Oaxaca: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana, 49, 1-112.
- Solari, L.A., Gómez-Tuena, A., Bernal, J.P., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M., 2010, U-Pb zircon geochronology by an integrated LAICPMS microanalytical workstation: achievements in precision and accuracy: *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34(1), 5-18.
- Solari, L.A., Tanner, M., 2011, UPb age, a fast data reduction script for LA-ICP-MS U-Pb geochronology: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(1), 83-91.
- Sharp, W.N., 1991, Petrochemistry of Igneous Rocks, Silver City 1 Degree $\times$ 2 Degrees Quadrangle, New Mexico and Arizona: U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations Series Map I-1310- H, scale 1:250,000.
- Stephenson, L.W., 1927, Notes on the Stratigraphy of the Upper Cretaceous formations of Texas and Arkansas: American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 11(1), 1-17.
- Thomas, R.G., Eberth, D.A., Deino, A.L., Robinson, D., 1990, Composition, radioisotopic ages, and potential significance of an altered volcanic ash (bentonite) from the Upper Cretaceous Judith River formation, Dinosaur provincial park, southern Alberta, Canada: *Cretaceous Research*, 11, 125e162.
- Sundeen, D.A., Cook, P.L., 1977, K-Ar dates from Upper Cretaceous volcanic rocks in the subsurface of west-central Mississippi: Geological Society of America Bulletin, 88, 1144-1146.

- Velasco Tapia, F., Martínez Paco, M., Iriondo, A., Ramos Ledezma, A., Ocampo Díaz, Y.Z.E., Cruz Gámez, E.M., Andaverde Arredondo, J.A., 2015, Formación San Felipe: la huella de vulcanismo cretácico en la Sierra Madre Oriental, 86-92.
- Velasco-Tapia F., Martínez-Paco, M., Iriondo, A., Ocampo-Díaz, Y.Z.E., Cruz-Gómez E.M., Ramos-Ledezma, A., Andaverde, J.A., Ostrooumov, M., Masuch, D., 2016, Altered volcanic ash layers of the Late Cretaceous San Felipe Formation, Sierra Madre Oriental (Northeastern Mexico): U/Pb geochronology, provenance and tectonic setting: *Journal of South American Earth Sciences*, 70, 18-35.
- Verdugo, D.F., Ariciaga, M.C., 1988a, Informe Geológico de la cuenca carbonífera Fuentes-Río Escondido Coahuila, *en* Salas, G. (ed.), *Geología Económica de México*: México, Fondo de Cultura Económica, S.A. de C.V., 143-170.
- Verdugo, D.F., Ariciaga, M.C., 1988b, Resumen de la exploración y explotación en Río Escondido, *en* Salas G. (ed.), *Geología Económica de México*: México, Fondo de Cultura Económica, S.A. de C.V., 171-174.
- Weber, R., 1972, La vegetación maestrichtiana de la Formación Olmos de Coahuila, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 33, 5-19.
- Weber, R., 1973, *Salvinia coahuilensis* nov. sp. del Cretácico Superior de México: *Ameghiniana*, 10, 173-190.
- Weber, R., 1975, *Achenia knoblochii* n. sp. an interesting conifer of the Upper Cretaceous Olmos Formation of northeastern Mexico: *Palaeontographica* 152B, 76-83.
- Weber, R., 1976, *Dorfiella auriculata* f. gen. nov. sp. nov. Un género de helechos acuáticos del Cretácico Superior de México: *Boletín de la Asociación Latinoamericana de Paleobotánica y Palinología*, 3, 1-13.
- Wieland, G.R., 1914, La flora liásica de la Mixteca Alta: Instituto de Geología. México, Boletín 31, 165 p (50 láminas).
- Wilson, I.F., Rocha, V.S., 1946, Los Yacimientos de Carbón de la Región de Santa Clara, Municipio de San Javier, Estado de Sonora: Comité Directivo para la Investigación de los Recursos Minerales de México Boletín Núm. 9. 108 pp.
- Young, K., 1972, Cretaceous Paleogeography: Implications of Endemic Ammonite Faunas: Bureau of Economic Geology, University of Texas, Geological Circular 72, 2.
- Young, K., 1983, Mesozoic history of Mexico, *en* Moullade, M., Narm, A.E.M. (eds.), *The Phanerozoic Geology of the World* 2, B.
- Young, J.R., McMillan, N.J., Lawton, T.F., Esser, R.P., 2000, Volcanology, geochemistry and structural geology of the Upper Cretaceous Hidalgo Formation, southwestern New Mexico, *en* Lawton, T.F., McMillan, N.J., McLemore, V.T., (eds.), *Southwest Passage-A trip through the Phanerozoic: New Mexico Geological Society Guidebook*, 51, 149-156.
- Zartman, R.E., 1977, Geochronology of some alkalic rock provinces in eastern and central United States: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 5, 257-286.

Manuscrito recibido: agosto 29, 2022

Manuscrito corregido recibido: octubre 4, 2022

Manuscrito aceptado: octubre 5, 2022