



Caracteres morfométricos y anatómicos de frutos y semillas de una población de *Prosopis laevigata* (Fabaceae) en Lagos de Moreno, Jalisco, México

Morphometric and anatomical characters of fruits and seeds of a population of *Prosopis laevigata* (Fabaceae) in Lagos de Moreno, Jalisco, Mexico

Lilia García Azpeitia¹ , Gladis Judith Labrada-Delgado² , Efigenia Montalvo-González³ , Sofía Loza-Cornejo^{4,5} 

Resumen:

Antecedentes y Objetivos: *Prosopis laevigata*, especie de amplia distribución en México, es considerada un recurso con importancia ecológica y socioeconómica. A pesar de que sus semillas y frutos tienen valor nutricional, los estudios sobre su variación morfológica y anatómica son escasos. Este trabajo es el primero en abordar la morfo-anatomía e histoquímica del fruto y semilla de *P. laevigata* y tiene como objetivo contribuir al conocimiento de su biología y proporcionar las bases para otras investigaciones con un enfoque ecofisiológico en esta y otras especies del género.

Métodos: Muestras de frutos y semillas fueron recolectadas de árboles de *P. laevigata* en una localidad de Lagos de Moreno, Jalisco, México, para analizar sus caracteres morfométricos, anatómicos e histoquímicos. Adicionalmente, se estudió su composición micro elemental mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) acoplada a espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS). Se aplicaron análisis ANOVA y de correlación para conocer la variabilidad intrapoblacional y asociación entre variables morfométricas.

Resultados clave: El coeficiente de variación más alto (47.7%) fue para el número de semillas por fruto. El ANOVA demostró diferencias estadísticas significativas para las variables longitud ($F=7.51$, $p<0.0001$) y ancho de la semilla ($F=8.75$, $p<0.0001$); la correlación más alta (0.937) fue para ancho fruto-ancho semilla. Los frutos presentan epicarpo, mesocarpo con cristales de oxalato de calcio y endocarpo coriáceo. Las semillas tienen pleurograma, micrópilo subapical, testa gruesa con epidermis de macroesclereidas y osteoesclereidas en la hipodermis. Cotiledones contienen cuerpos de proteína y endospermo con almidón. La testa y el embrión presentan macroelementos (S, K, Mg) y microelementos (Al, Si, Cu).

Conclusiones: La estructura morfológica, anatómica e histoquímica de frutos y semillas de *P. laevigata* fueron similares a otros *Prosopis*. La epidermis en empalizada, hipodermis con osteoesclereidas en la testa de la semilla, los estomas y cristales prismáticos en las vainas podrían representar caracteres ecofisiológicos importantes.

Palabras clave: cristales, cuerpos de proteína, mezquite, micromorfología de la semilla, vainas.

Abstract:

Background and Aims: *Prosopis laevigata*, a widely distributed species in Mexico, is considered a resource with ecological and socioeconomic importance. Although its seeds and fruits have nutritional value, research on its morphological and anatomical variation is scarce. This study is the first to address the morpho-anatomy and histochemistry of the fruit and seed of *P. laevigata* and aims to contribute to the knowledge of its biology, as well as provide the basis for other research with an ecophysiological approach of this and other species of the genus.

Methods: Fruit and seed samples were collected from *Prosopis laevigata* trees in a locality of Lagos de Moreno, Jalisco, Mexico, to analyze their morphometric, anatomic, and histochemical characters. Additionally, its micro elemental composition was studied by scanning electron microscopy (SEM) coupled to energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). ANOVA and correlation analyzes were applied to determine intrapopulation variability and association between morphometric variables.

Key results: The highest coefficient of variation (47.7%) was for the number of seeds per fruit. The ANOVA showed significant statistical differences for the variables seed length ($F=7.51$, $p<0.0001$) and seed width ($F=8.75$, $p<0.0001$); the highest correlation (0.937) was for fruit width-seed width. The fruits have an epicarp, mesocarp with calcium oxalate crystals and a leathery endocarp. The seeds present a pleurogram, subapical micropyle, and a thick seed coat with an epidermis of macrosclereids, and osteosclereids in the hypodermis. Cotyledons contain protein bodies and starchy endosperm. The testa and the embryo present macroelements (S, K, Mg) and microelements (Al, Si, Cu).

Conclusions: The morphological and anatomical characteristics and histochemical structure of fruits and seeds of the *P. laevigata* were similar to other *Prosopis*. The palisade epidermis, hypodermis with osteosclereids in the seed coat, stomata and prismatic crystals in the pods could represent important ecophysiological characters.

Key words: crystals, mesquite, pods, protein bodies, seed micromorphology.

¹Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Lagos de Moreno, 47480 Lagos de Moreno, Jalisco, México.

²Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. (IPICYT), 78216 San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.

³Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tepic, 63175 Tepic, Nayarit, México.

⁴Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de los Lagos, 47460 Lagos de Moreno, Jalisco, México.

⁵Autor para la correspondencia: sofia.loza@academicos.udg.mx


Recibido: 12 de abril de 2022.

Revisado: 24 de mayo de 2022.

Aceptado por Rosario Redonda-Martínez: 1 de septiembre de 2022.

Publicado Primero en línea: 12 de septiembre de 2022.

Publicado: Acta Botanica Mexicana 129(2022).

 Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

Citar como: García Azpeitia, L., G. J. Labrada-Delgado, E. Montalvo-González y S. Loza-Cornejo. 2022. Caracteres morfométricos y anatómicos de frutos y semillas de una población de *Prosopis laevigata* (Fabaceae) en Lagos de Moreno, Jalisco, México. Acta Botanica Mexicana 129: e2057. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.2057>

Introducción

El género *Prosopis* L. incluye árboles y arbustos espinosos, perennes, que miden 0.4-10 m de altura (Palacios, 2006). Sus especies, comúnmente denominadas mezquites, poseen amplia distribución particularmente en regiones áridas, semiáridas y vegetación secundaria (Abdalia et al., 2014; Peña-Avelino et al., 2014; Armijo-Nájera et al., 2019). *Prosopis* pertenece al clado mimosoide, subfamilia Caesalpinioideae, familia Fabaceae (Kostlin, 2017; LPWG, 2017). En este género destacan *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *P. glandulosa* Torr., con frutos o vainas que presentan variaciones morfológicas en tamaño y color (Carrillo et al., 2014; Peña-Avelino et al., 2014, 2016; Negrete-Sánchez et al., 2017), y semillas que contienen proteínas, azúcares y fibra dietética, por lo cual constituyen un recurso con alto valor socioeconómico ya que son utilizados para producir harina y alimentar al ganado (Felker et al., 2013).

De las dos especies mencionadas, destaca *Prosopis laevigata* de amplia distribución en México y el suroeste de los Estados Unidos de América, con estatus nativo; y común en regiones áridas y semiáridas de Sudamérica, a lo largo de los Andes hasta Chile central y Argentina, como introducida (Valenzuela et al., 2011; McRostie et al., 2017; López Cravioto et al., 2018). En México, se encuentra en bosques de encino, pino-encino, espinosos, mesófilos de montaña, tropicales caducifolios, chaparrales, matorrales submontanos, subtropicales, xerófilos, palmares, pastizales naturales, así como en vegetación secundaria (Hernández et al., 2020).

Prosopis laevigata tiene importancia ecológica al ser fijadora de nitrógeno, enriquecer el suelo y promover el crecimiento de la vegetación asociada; su sistema radical ayuda a retener la humedad y prevenir la erosión (Villegas-Espinoza et al., 2014). En el ecosistema desértico funciona como sombra y refugio para la fauna, ya que crea un microambiente bajo su cubierta (Rodríguez-Sauceda et al., 2014). La especie es apreciada por su madera, la cual se utiliza como leña, carbón y materia prima para construcción, para elaborar herramientas de trabajo, artesanías y juguetes, y por sus flores, que generan polen y néctar destinados particularmente a la producción apícola de miel y cera (Rodríguez-Sauceda et al., 2014; García-López et al., 2019).

A pesar de su importancia, los estudios sobre la morfo-anatomía de frutos y semillas en *Prosopis* son escasos. Para los frutos (vainas) se ha investigado su composición nutrimental, ya que se utilizan como materia prima en la elaboración de alimentos tanto para el consumo humano como ganadero (Negrete-Sánchez et al., 2017; García López et al., 2019). En el caso de las semillas, los estudios se centran en el efecto de diversos métodos físico-químicos para mejorar su germinación (López-Martínez et al., 2014; Morales-Domínguez et al., 2019).

Los trabajos referentes a su estructura anatómica son escasos. Con base en estudios anatómicos y ecofisiológicos, por ejemplo, se sabe que en *Prosopis* y en general en la familia Fabaceae, 80% de sus especies se caracterizan por tener semillas clasificadas como “duras”, con una testa resistente e impermeable (Dübbern de Souza y Marcos-Filho, 2001). Esa impermeabilidad impide su imbibición otorgándole latencia, la cual juega un papel relevante como moduladora de la relación ambiente-semilla, que es crucial en ecología de la restauración (Sobrevilla-Solís et al., 2013). Sin embargo, en Fabaceae los estudios enfocados a la influencia de la estructura anatómica de la semilla y su germinación se han concentrado principalmente en plantas de interés agronómico, como *Glycine max* L. (soya), *Phaseolus vulgaris* L. (frijol) y *Lupinus* spp., entre otras (Varela y Albornoz, 2013).

Por otro lado, los caracteres micromorfológicos y anatómicos de frutos y semillas pueden ser de utilidad en estudios taxonómicos en diversas familias de plantas (Mirzaei et al., 2015) y Fabaceae no es la excepción. En el caso de los frutos, caracteres como forma, tamaño, presencia de indumento, estructura superficial (epidermis, presencia y tipo de estomas), pueden tener importancia taxonómica como han demostrado Chauhan y Pandey (2014). Para las semillas, características tales como posición apical o subapical del micrópilo, el hilo (ubicación central, subcentral, basal, su longitud y elevación), presencia, forma, color y disposición de la lente, así como la presencia de pleurograma, son consideradas importantes para la clasificación de las especies (Boelcke, 1946; Gunn, 1984; Marzouk, 2006). El pleurograma es una estructura parecida o similar a una línea elíptica abierta en el extremo hiliar de la superficie de la testa en ambos lados de la semilla (Rodrigues-Junior et

al., 2019); su presencia o ausencia parece ser un carácter útil en la identificación y separación de especies (Ubierno y Lapp, 2007; Ulibarri, 2008; Romero-Hernández, 2019).

Este trabajo es el primero en abordar la morfo-anatomía e histoquímica de los frutos y semillas de *P. laevigata*, y tiene como objetivo contribuir al conocimiento de su biología, así como proporcionar información con posible valor ecofisiológico y taxonómico en esta y otras especies del género *Prosopis*.

Materiales y Métodos

Sitio de estudio

La recolecta de frutos y semillas de *P. laevigata* se realizó en la localidad Sepúlveda (21°25'13"N, 101°54'15"O), situada 7.5 km al sur de la cabecera municipal de Lagos de More-

no, Jalisco, México (Fig. 1), que forma parte de la región denominada Altos Norte. El área de estudio se encuentra a una altitud de 1893 m, el suelo es litosol (IIEG, 2018; 2019), y según la clasificación Köppen-García tiene clima predominante semiárido templado (BS1kw) con verano cálido, temperatura media anual de 12-18 °C y precipitación media anual de 665 mm, con lluvias en verano (Ruíz-Corral et al., 2021).

Colecta y análisis morfométrico de frutos y semillas

Durante julio y agosto de 2019, y de 20 árboles en la localidad seleccionada, se recolectaron muestras de frutos maduros, completos, sanos y sin daños externos visibles, para realizar tanto el estudio morfométrico como anatómi-

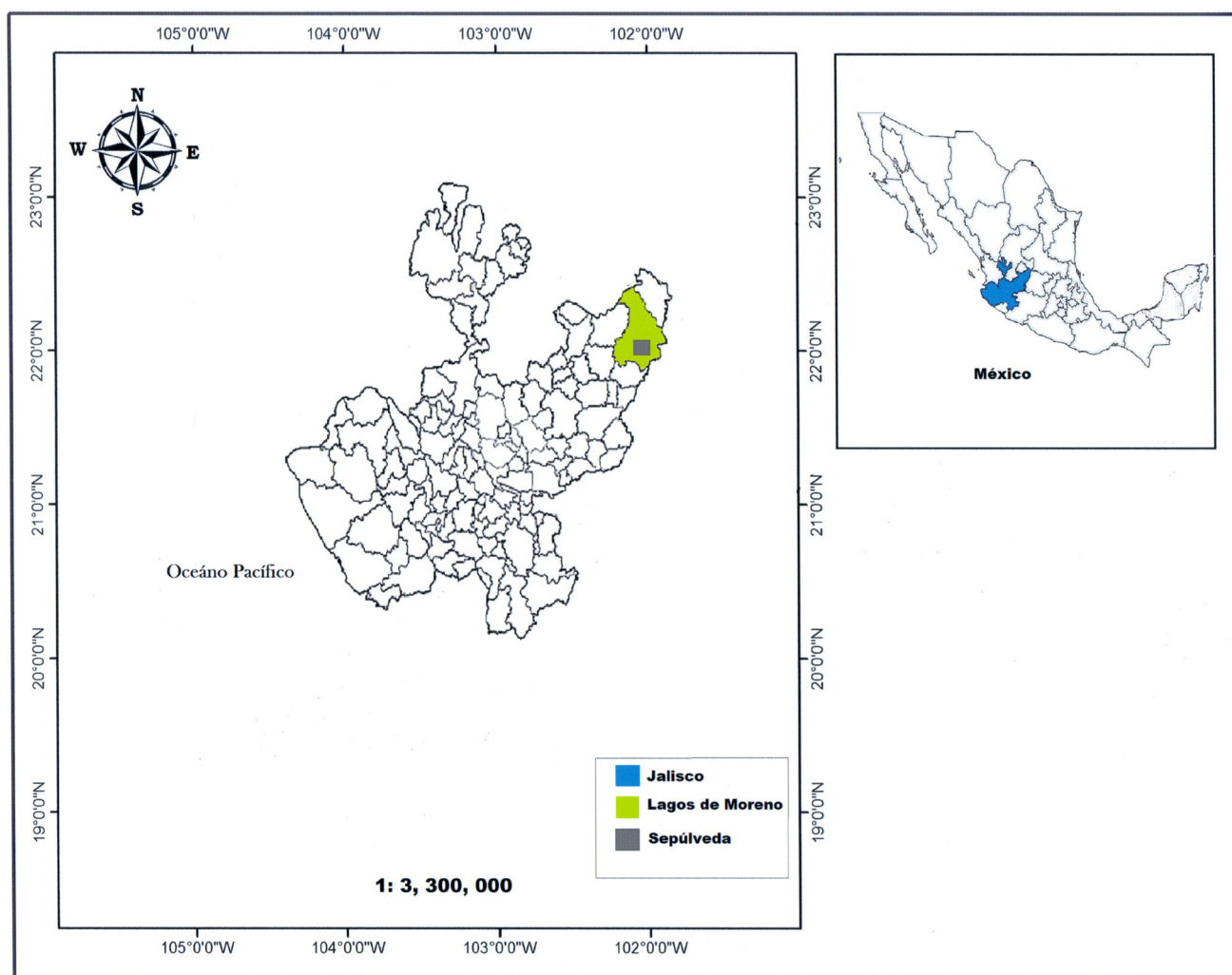


Figura 1: Área donde se recolectaron los frutos y semillas de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst., en Sepúlveda, una localidad de Lagos de Moreno, Jalisco, México.

co e histoquímico. Utilizando una muestra de 20 frutos de cada árbol se analizó la morfología (color, partes del fruto y la semilla), con un microscopio estereoscópico (Zeiss Microscopio Stereo Zoom, Berlín, Alemania); el peso fresco (incluyendo las semillas), con una balanza analítica Sartorius Entris II (RSU LABSUPPLY, NL, México); y el largo, ancho y grosor, utilizando un vernier digital Mitutoyo (Westport Corporation, Nueva York, EUA).

Muestras de frutos inmaduros (n=10) también fueron recolectados al azar de diferentes árboles, con la finalidad de conocer caracteres diferenciales en esta etapa de desarrollo, tanto del fruto como de la semilla. Para determinar color del pericarpo y la cubierta seminal se utilizó la carta de colores de Munsell (Munsell, 2000) y lo establecido en Lovey et al. (2010). Las imágenes fueron registradas con una cámara digital (SONY Cyber shot DSC-S750 de 7.2 megapíxeles, Kōnan Minato, Tokio, Japón).

Posteriormente, los frutos se secaron a temperatura ambiente durante tres semanas en bandejas de cartón forradas con papel absorbente, en un lugar fresco, ventilado y protegido de los rayos solares directos. Una vez secos, los frutos se abrieron cuidadosamente para registrar su número de semillas y el peso del pericarpo. Con ayuda de un vernier digital (Mitutoyo, Westport Corporation, Nueva York, EUA) y una balanza analítica (Sartorius Entris II, RSU LABSUPPLY, NL, México) también fueron registrados longitud, ancho, grosor y peso de 20 semillas sanas y completas por árbol (n=20 árboles).

Empleando las variables largo (L) y ancho (A) de la semilla (20 semillas de cada árbol, n=400 semillas en total), se calculó el índice de redondez (IR) con la fórmula $IR=(A/L)$; si $IR=1$ es esférica, $IR>1$ es alargada u oblonga, e $IR<1$ es ovoide (más ancha que larga) (Aguirre-Dugua et al., 2012). La descripción morfológica y las partes constituyentes de los frutos fueron descritas siguiendo la terminología de Meyer y Morton (1971), Chauhan y Pandey (2014) y Rodríguez et al. (2019). La nomenclatura proporcionada por Boelcke (1946), Palacios y Bravo (1975), Gunn (1984) e Irving (1984) fue utilizada para describir la forma, posición del hilo, micrópilo y características de la testa de la semilla.

Los ejemplares de respaldo correspondientes (S. Loza 247; S. Loza 248; S. Loza 249) fueron enviados para su incorporación en el Herbario Luz María Villareal de Puga

del Instituto de Botánica de la Universidad de Guadalajara (IBUG) (Thiers, 2021).

Anatomía y microanálisis elemental del fruto y semilla

Posterior al registro de caracteres morfométricos, los frutos y semillas fueron procesados para su análisis anatómico. Para conocer la estructura de ambos órganos y su composición histoquímica, se hicieron cortes transversales y longitudinales a mano alzada de 10 frutos y 10 semillas, con ayuda de una navaja unifilo de acero con cuchilla de 4 cm de ancho (modelo 0.009", Urban Tools, EUA). Los segmentos resultantes se colocaron en portaobjetos y tiñeron con diferentes colorantes y reactivos para identificar metabolitos primarios: proteínas (Azul de bromofenol), lípidos (Sudán IV), almidón (Yodo-lugol), polisacáridos insolubles (Ácido peryódico-reactivo de Schiff) y celulosa (Azul de toluidina) (López Curto et al., 1998; Sandoval Zapotitla, 2005).

Las observaciones correspondientes se hicieron con un microscopio óptico (Zeiss KF2 Microscope Gemini BV, Berlín, Alemania) adaptado a un analizador de imágenes Leica IM500 (Leica Microsystems, Wetzlar, Alemania). La descripción anatómica e histoquímica se basó en los estudios de Irving (1984), Irving y Beckler (1985), Serrato-Valenti et al. (1990) y Rodríguez et al. (2019).

También se llevó a cabo el análisis anatómico de vainas y semillas por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB); para ello, otras muestras de frutos (n=5) y semillas (n=5) se lavaron con agua corriente y posteriormente con agua destilada. Los frutos se cortaron a mano alzada con navaja unifilo de acero con cuchilla de 4 cm de ancho (modelo 0.009", Urban Tools, EUA) en segmentos de ca. $3 \times 2 \times 2$ mm de ancho, largo y grosor, respectivamente; luego fueron secados a temperatura ambiente. Las semillas se deshidrataron de igual forma y se utilizaron para realizar cortes transversales y longitudinales a mano alzada con navaja unifilo de acero con cuchilla de 4 cm de ancho (modelo 0.009", Urban Tools, EUA) para observar sus componentes.

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM FEG QUANTA 250, FEI Technology, Brno, República Checa), para muestras aislantes sin recubrimiento acoplado a un sistema de espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS,



Ametek, EDAX, Pensilvania, USA), empleando un voltaje de 20 kV, con la finalidad de detectar de manera semi-cuantitativa los elementos químicos presentes en la superficie de las muestras, las cuales se analizaron en diferentes puntos seleccionados aleatoriamente para obtener una lectura representativa de la composición química o elementos presentes.

Análisis estadístico

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar incluyendo 20 mediciones de cada variable morfométrica de semillas y frutos provenientes de cada árbol (n=20 árboles) de la localidad muestreada, para constituir un total de n=400 registros de cada variable. Se obtuvieron los parámetros de estadística descriptiva (media, error estándar, coeficiente de variación) de 11 caracteres morfométricos evaluados de los frutos (largo, ancho, grosor, peso fresco, peso fresco de la cáscara y número de semillas) y de las semillas (longitud, ancho, índice de redondez, grosor, peso fresco). Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una sola vía con un nivel de significancia $p < 0.05$ con la finalidad de conocer la variación intrapoblacional y un análisis de correlación de Pearson (rp) para establecer la existencia de asociación entre variables, utilizando el software SAS v. 9.4 (SAS, 2002).

Resultados

Morfometría de frutos y semillas

El fruto de *P. laevigata* es una vaina indehisciente, generalmente linear, clasificada como lomento drupáceo formada por el pericarpo y las semillas. Es color verde claro (G80Y valor 8, intensidad 3) cuando inmaduro (Fig. 2A, B), con septos que lo separan en compartimentos que incluyen a cada una de las semillas (Fig. 2B); y color amarillo paja dorado (10YR valor 6 intensidad 6) con tintes café oscuro-violáceos (7.5YR valor 2.5 intensidad 3), en la madurez (Fig. 2C-F).

Las vainas son planas, semi-curvadas, con bordes ondulados (Fig. 2E-H) y longitud promedio de 15.14 ± 0.16 cm, con 8.7 ± 0.19 semillas en su interior; cada una se encuentra en un compartimento rodeada por el endocarpo (Fig. 2E, J). En frutos inmaduros las semillas son verdes, cambiando a una coloración marrón o castaño claro (2.5Y valor 6 inten-

sidad 6) al madurar; ovoides (0.66 de índice de redondez), comprimidas (con un grosor 1.86 ± 0.012 mm), tienen testadura dura y brillante (Fig. 2K). Otros caracteres morfométricos de las semillas son peso fresco de 0.41 ± 0.008 g y 1.86 ± 0.012 mm de grosor (Cuadro 1).

El coeficiente de variación más bajo (6.8%) se registró para la longitud de la semilla, mientras que la mayor variación (43.7%) fue para el número de semillas por fruto (Cuadro 1). El análisis de varianza demostró que no existen diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) al comparar los caracteres morfométricos de frutos y semillas entre individuos (árboles muestreados) de *P. laevigata*, excepto para las variables longitud ($F=7.51$, $p < 0.0001$) y ancho de la semilla ($F=8.75$, $p < 0.0001$), como se muestra en el cuadro 2 y figura 3. El análisis de correlación mostró bajos coeficientes de asociación en la mayoría de las variables, altos (0.627) al comparar el índice de redondez y ancho de semilla (Cuadro 3). Al comparar algunas variables como longitud de fruto-peso de semilla (-0.042), ancho de fruto-número de semillas por fruto (-0.010), entre otras (Cuadro 4), se obtuvo una correlación inversa. Asimismo, fue altamente significativa (0.937) comparando ancho de semilla y ancho de fruto (Cuadro 4).

Anatomía del fruto y semilla

El pericarpo del fruto de *P. laevigata* está constituido por un epicarpo delgado (ca. 2 mm de grueso) y mesocarpo de ca. 5 mm de grosor, dispuesto alrededor del endocarpo que rodea las semillas. Los caracteres anatómicos de cada estructura se describen a continuación.

Epicarpo

Estructura exterior de la vaina de color amarillo, pajizo o pardo-rojizo, a veces con tonos morados (7.5YR valor 2.5 intensidad 3), con apariencia papirácea y superficie rugosa e irregular (Fig. 4A). Presenta cutícula, epidermis uni o bistratificada con células poliédricas de paredes anticlinales ligeramente sinuosas y estomas anomocíticos (Fig. 4B-D).

Mesocarpo

Constituye la sección de mayor proporción en los frutos, es similar a una masa pulposa y comestible; de color amarillo, con aroma dulce, consistencia gomosa o mucilaginosa

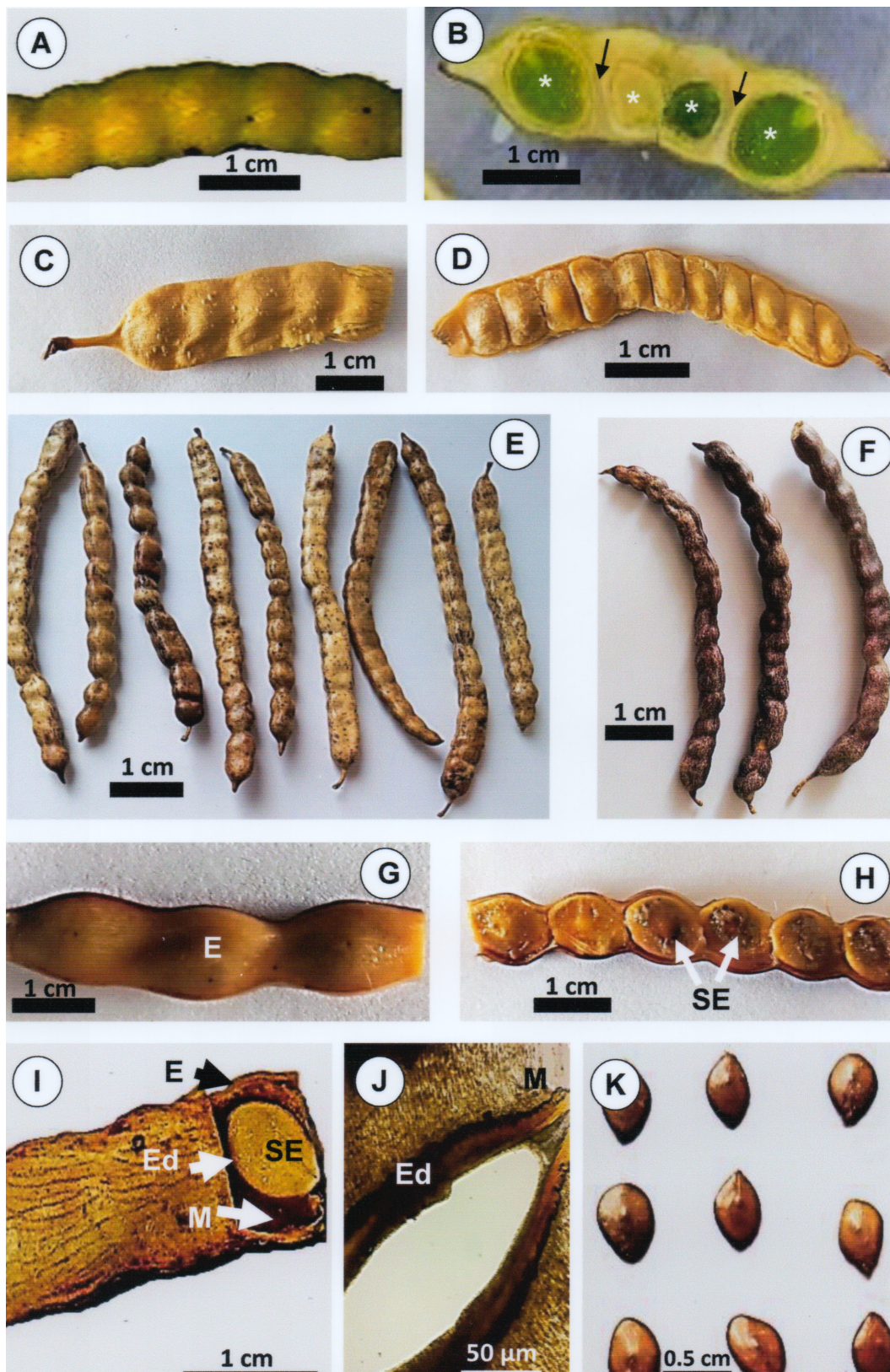


Figura 2: Frutos y semillas de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. A. apariencia externa de fruto inmaduro; B. corte longitudinal de fruto inmaduro mostrando semillas inmaduras (*) en compartimientos separados por septos (flechas); C. superficie externa de fruto maduro; D. fruto maduro mostrando semillas separadas en compartimientos; E. y F. frutos maduros mostrando tintes morados en la superficie del epicarpo; G. detalle de la superficie exterior del epicarpo de fruto maduro; H. detalle de semillas en fruto maduro; I. corte longitudinal de fruto maduro mostrando el epicarpo, mesocarpo y endocarpo que rodea la semilla madura; J. detalle del endocarpo y mesocarpo en corte longitudinal de un fruto maduro; K. semillas maduras. E=epicarpo, Ed=endocarpo, M=mesocarpo, SE=semilla.

Cuadro 1: Caracteres morfométricos de frutos y semillas de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. Los datos representan la media \pm error estándar (EE), n=20 árboles.

| Característica | Media \pm EE | Coefficiente Variación% | Valor mínimo | Valor máximo |
|-------------------------|------------------|-------------------------|--------------|--------------|
| Largo fruto (cm) | 15.14 \pm 0.16 | 21.1 | 6.4 | 21.6 |
| Ancho fruto (mm) | 8.63 \pm 0.04 | 9.6 | 4.5 | 10.3 |
| Grosor fruto (mm) | 5.76 \pm 0.04 | 15.5 | 3.4 | 8.6 |
| Peso fresco fruto (g) | 3.1 \pm 0.04 | 27.5 | 1.44 | 5.9 |
| Peso fresco cáscara (g) | 2.78 \pm 0.03 | 22.3 | 1.4 | 4.3 |
| No. semillas por fruto | 8.7 \pm 0.19 | 43.7 | 1.0 | 19.0 |
| Longitud semilla (mm) | 6.54 \pm 0.02 | 6.8 | 5.2 | 7.6 |
| Ancho semilla (mm) | 4.35 \pm 0.01 | 8.6 | 3.1 | 5.20 |
| Índice de redondez | 0.66 \pm 0.002 | 7.1 | 0.51 | 0.81 |
| Grosor semilla (mm) | 1.86 \pm 0.012 | 13.5 | 1.2 | 2.90 |
| Peso fresco semilla (g) | 0.41 \pm 0.008 | 41.1 | 0.1 | 0.80 |

Cuadro 2: Análisis de varianza (ANOVA) de los caracteres morfométricos de frutos y semillas de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. n=20 árboles, gl=grados de libertad, SC=suma de cuadrados, CM=cuadrado de la media, F=estadístico F, P=probabilidad.

| Variable | gl | SC | CM | Valor de F | P>F |
|------------------------|----|------------|------------|------------|---------|
| Largo fruto | 19 | 128.141619 | 6.7442960 | 0.65 | 0.8692 |
| Ancho fruto | 19 | 8.34031600 | 0.4389640 | 0.63 | 0.8823 |
| Grosor fruto | 19 | 22.8724388 | 1.2038126 | 1.55 | 0.0655 |
| Peso fresco fruto | 19 | 5.92296240 | 0.3117349 | 0.42 | 0.9863 |
| Peso fresco cáscara | 19 | 1.58327500 | 0.8333030 | 0.21 | 0.9999 |
| No. semillas por fruto | 19 | 419.060000 | 22.055789 | 1.57 | 0.1616 |
| Longitud semilla | 19 | 21.6404750 | 1.13897237 | 7.51 | <0.0001 |
| Ancho semilla | 19 | 16.9458750 | 0.89188160 | 8.75 | <0.0001 |
| Índice de redondez | 19 | 0.05945295 | 0.00312910 | 1.41 | 0.1191 |
| Grosor semilla | 19 | 2.56910000 | 0.13521579 | 2.29 | 0.0017 |
| Peso fresco semilla | 19 | 0.86747500 | 0.04565658 | 1.68 | 0.0369 |

al tacto. Se encuentra adherido al endocarpo y epicarpo, dificultando su extracción de los frutos. Anatómicamente tiene una estructura compleja y heterogénea, está formado por parénquima y colénquima (Fig. 4E). Las células de parénquima tienen paredes delgadas, el colénquima está formado por células con paredes gruesas que casi ocluyen el lumen en la mayoría de las células (Fig. 4F, G). Frecuentemente, el mesocarpo presenta cristales prismáticos de oxalato de calcio, como lo demuestra el micro análisis elemental por espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS), así como otros elementos (Mg 0.36%, Al 0.35%) (Fig. 5A, B).

Endocarpo

Estructura cerrada e indehiscente, variando en espesor. Muestra una conformación sólida y fibrosa y está dividido en segmentos o septos cerrados entre las semillas, en ocasiones difíciles de abrir o separar por su dureza. En sección longitudinal tiene superficie heterogénea, con fibras entrecruzadas arregladas perpendicularmente al eje longitudinal del fruto; sin estomas visibles (Fig. 5C, D). Algunas células del esclerénquima (fibras) pueden contener cristales prismáticos con calcio (14.64%) y otros elementos (C 29.09%, O 55.56%, Mg 0.36%, Al 0.35%) (Fig. 5E, F). Las pruebas histoquímicas demostraron la presencia de almidón, lípidos,

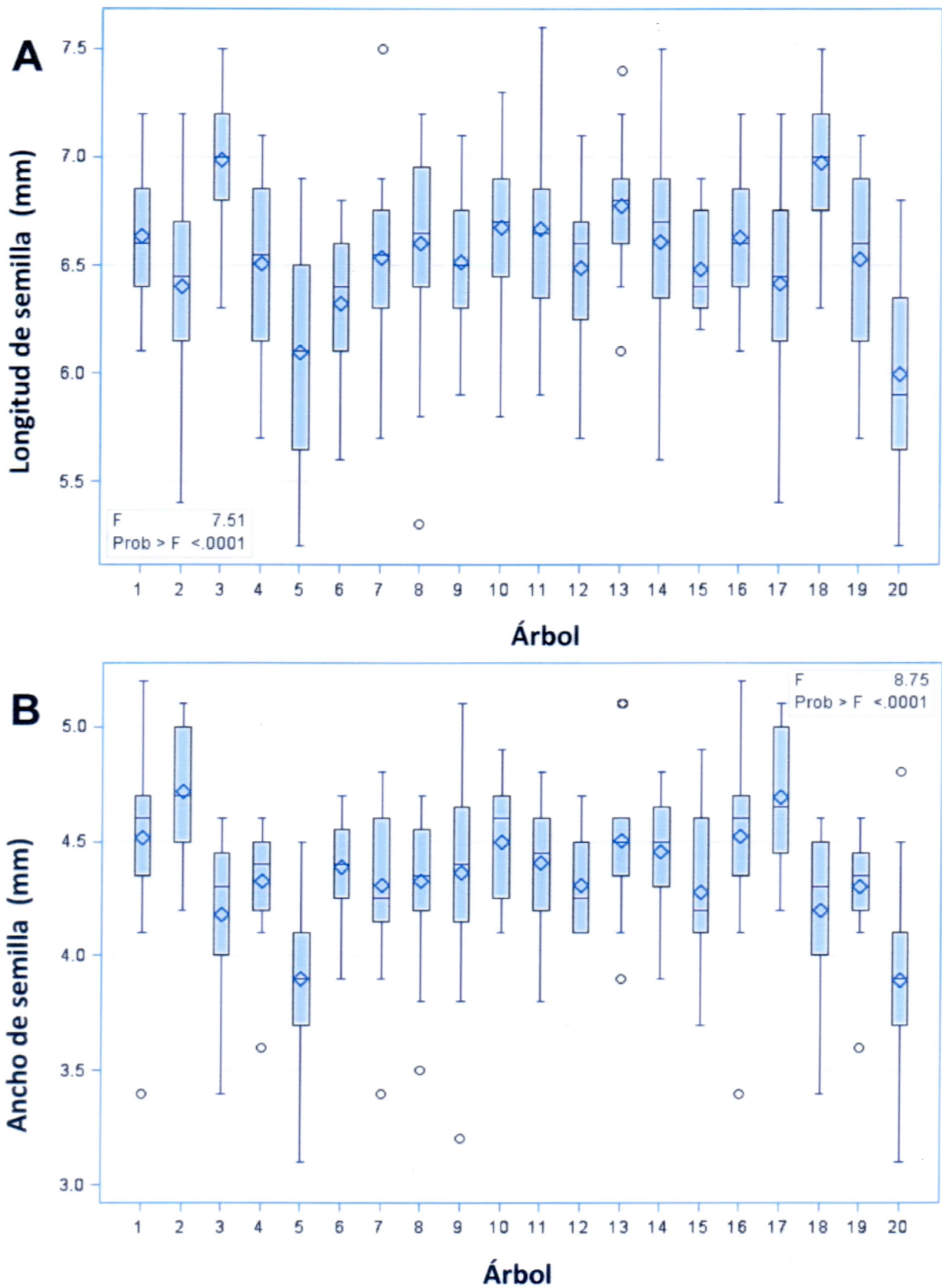


Figura 3: Variación morfométrica de las semillas de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. A. longitud de semilla; B. ancho de semilla. n=20 árboles.



Cuadro 3: Coeficientes de correlación de Pearson (r_p) de las variables morfológicas de frutos y semillas de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. LF=longitud fruto, AF=ancho fruto, GF=grosor fruto, PF=peso fruto, PC=peso de la cáscara del fruto, NS=número de semillas por fruto, LS=longitud semilla, AS=ancho semilla, IR=índice de redondez semilla, GS=grosor semilla, PS=peso semilla (n=20 mediciones de cada variable de 20 árboles), ** altamente significativa, $\text{prob}>(r)$ suponiendo $H_0: \text{Rho}=0$.

| | LF | AF | GF | PF | PC | NS | LS | AS | IR | GS | PS |
|----|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------|
| LF | 1.000 | 0.013 | 0.022 | 0.204 | 0.148 | 0.004 | 0.126 | 0.003 | -0.007 | 0.025 | -0.042 |
| AF | | 1.000 | 0.012 | 0.300 | -0.051 | -0.010 | 0.012 | 0.937** | 0.016 | 0.028 | 0.032 |
| GF | | | 1.000 | 0.321 | 0.231 | 0.211 | 0.014 | 0.004 | 0.005 | 0.022 | 0.043 |
| PF | | | | 1.000 | 0.044 | -0.078 | 0.043 | 0.064 | 0.078 | 0.023 | 0.023 |
| PC | | | | | 1.000 | 0.084 | -0.072 | 0.0005 | -0.011 | 0.042 | 0.125 |
| NS | | | | | | 1.000 | 0.063 | 0.039 | -0.003 | -0.054 | -0.007 |
| LS | | | | | | | 1.000 | 0.291 | -0.303 | 0.293 | 0.030 |
| AS | | | | | | | | 1.000 | 0.627 | 0.231 | 0.054 |
| IR | | | | | | | | | 1.000 | -0.055 | 0.004 |
| GS | | | | | | | | | | 1.000 | 0.007 |
| PS | | | | | | | | | | | 1.000 |

Cuadro 4: Composición micro elemental del embrión y endospermo de la semilla de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. determinada mediante EDS (espectroscopia de rayos X de energía dispersiva), nd=no detectado en la muestra.

| Muestra | % atómico de cada elemento | | | | | | | | | |
|------------|----------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | C | O | Mg | K | Al | S | Cl | Ca | Cu | Si |
| Embrión | 69.23 | 26.74 | 0.02 | 0.61 | 1.16 | 2.24 | nd | nd | nd | nd |
| Endospermo | 72.67 | 22.76 | nd | 0.52 | 3.2 | nd | 0.18 | 0.37 | 0.24 | 0.06 |

proteínas, polisacáridos insolubles y celulosa en el epicarpo, mesocarpo y endocarpo (Fig. 6A-H).

Las semillas contenidas en las vainas están rodeadas por el endocarpo fibroso que adquiere una consistencia coriácea cuando madura el fruto; son ovoides, monocromáticas (color pardo claro brillante, superficie glabra, ligeramente rugosa-punteada (Fig. 7A). El pleurograma es evidente y tiene forma de herradura o "U" invertida, con el extremo abierto hacia la región del hilo. En el estereomicroscopio el pleurograma muestra coloración marrón-rojiza, abarcando gran parte de la superficie de la semilla (Fig. 7A). El extremo hilar generalmente es agudo; el hilo es subapical, elíptico, obliterado, con restos de funículo; micrópilo subapical ligeramente ovalado y alineado con el hilo. El funículo es de color pardo y puede ser remanente en la semilla madura (Fig. 7B); en la cual, está claramente diferenciada la testa, el embrión con dos cotiledones y restos del endospermo.

Testa

En vista superficial, aparentemente es lisa, brillante, con pequeñas punteaduras, carece de poros o protuberancias, excepto la marca del pleurograma, pero vista con el microscopio electrónico de barrido, la superficie es rugoso-punteada (Fig. 7C) y con algunas líneas de fractura evidentes (Fig. 7D, E).

Cortes longitudinales de la semilla madura muestran que la testa desarrolla cuatro capas: cutícula, epidermis, hipodermis y parénquima. La cutícula es delgada, casi indistinguible. La epidermis está formada por un estrato de células en empalizada de pared gruesa, llamadas macroesclereidas o capa de Malphigi, que son radialmente alargadas, con engrosamientos desiguales en las paredes celulares. Las macroesclereidas en empalizada se disponen a lo largo de la epidermis de la testa, excepto en el área del hilo (Fig. 7F, G).

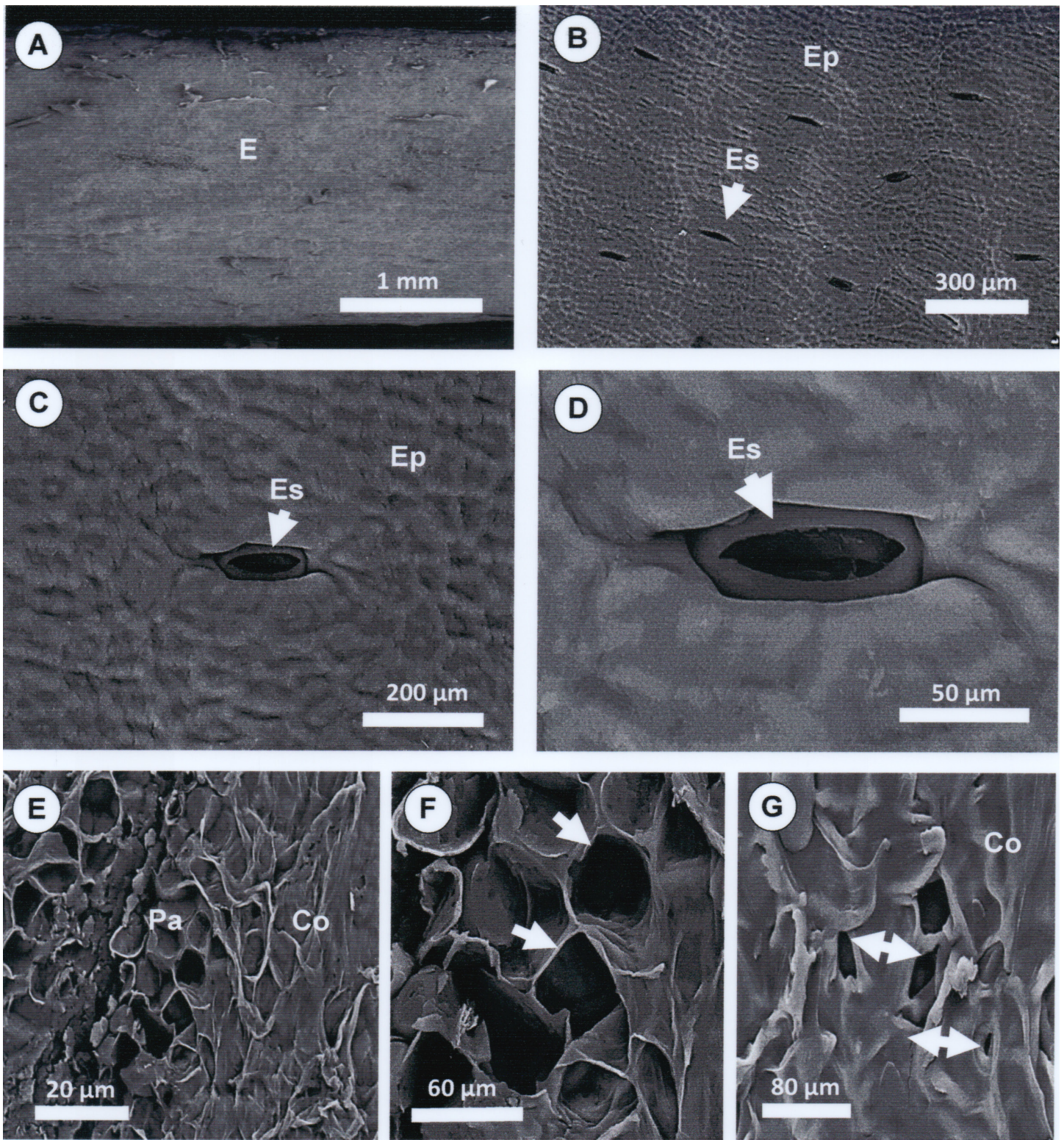


Figura 4: Epicarpo y mesocarpo del fruto (vaina) de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. A. vista general del epicarpo disociado de fruto maduro; B. vista superficial de la epidermis con estomas en el epicarpo; C. epidermis del epicarpo estoma; D. detalle de estoma; E. parénquima y colénquima del mesocarpo en corte transversal del fruto; F. corte transversal del mesocarpo mostrando células de parénquima con paredes delgadas (flechas); G. paredes gruesas de colénquima (flechas doble sentido) que ocluyen el lumen celular de la mayoría de las células. Co=colénquima, E=epicarpo, Ep=epidermis, Es=estoma, Pa=parénquima.

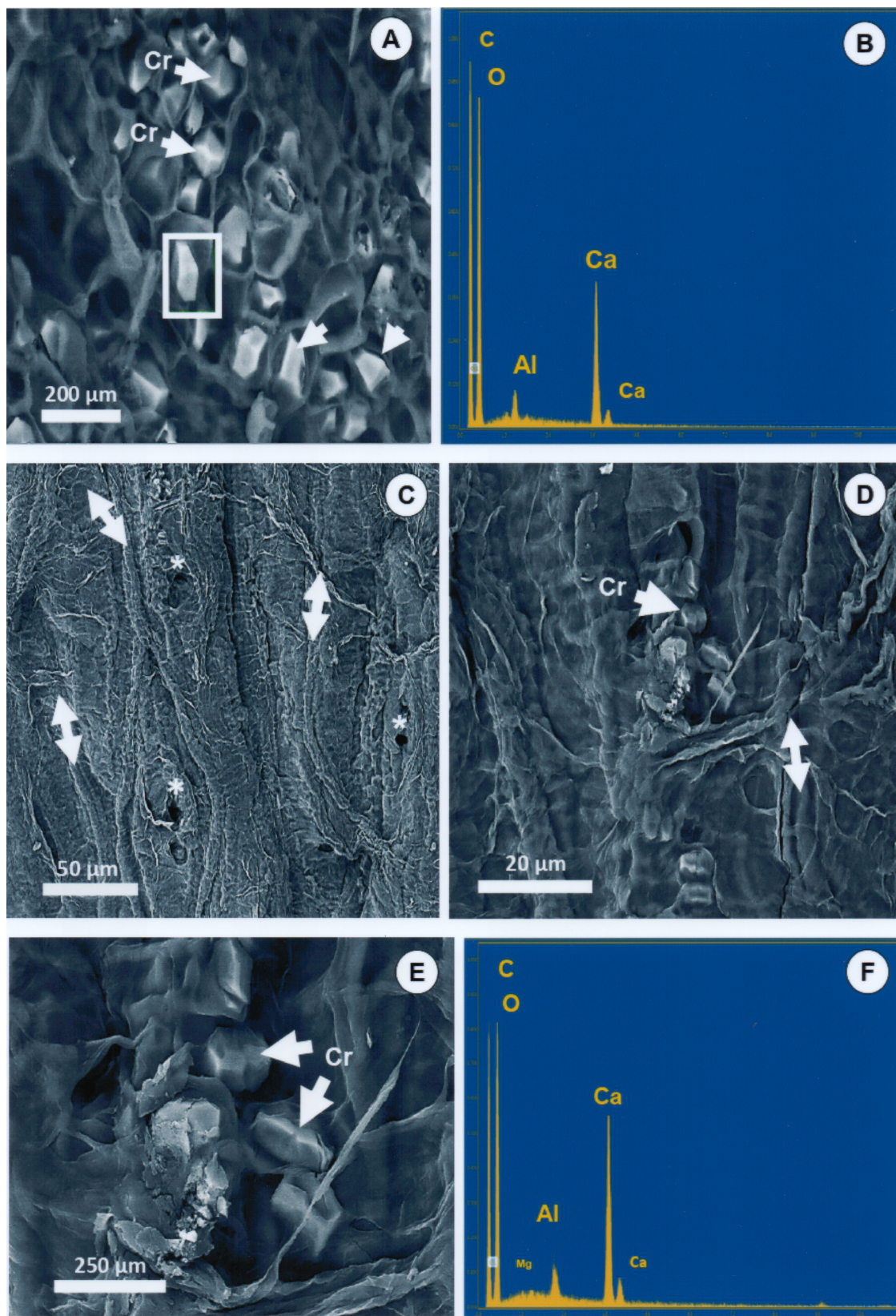


Figura 5: Mesocarpo y endocarpo en frutos de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. A. corte longitudinal del mesocarpo con cristales de oxalato de calcio (recuadro blanco y flechas); B. espectro EDS de un cristal en el mesocarpo; C. corte longitudinal del endocarpo con fibras (flecha doble sentido) fuertemente unidas y perforaciones circulares (*) causadas por insectos; D. cristales prismáticos y fibras (flecha doble sentido) en un corte longitudinal del endocarpo; E. detalle de cristales prismáticos del endocarpo; F. espectro EDS de composición elemental de cristales. Cr=cristales, C=carbono, O=oxígeno, Mg=magnesio, Al=aluminio, Ca=calcio.

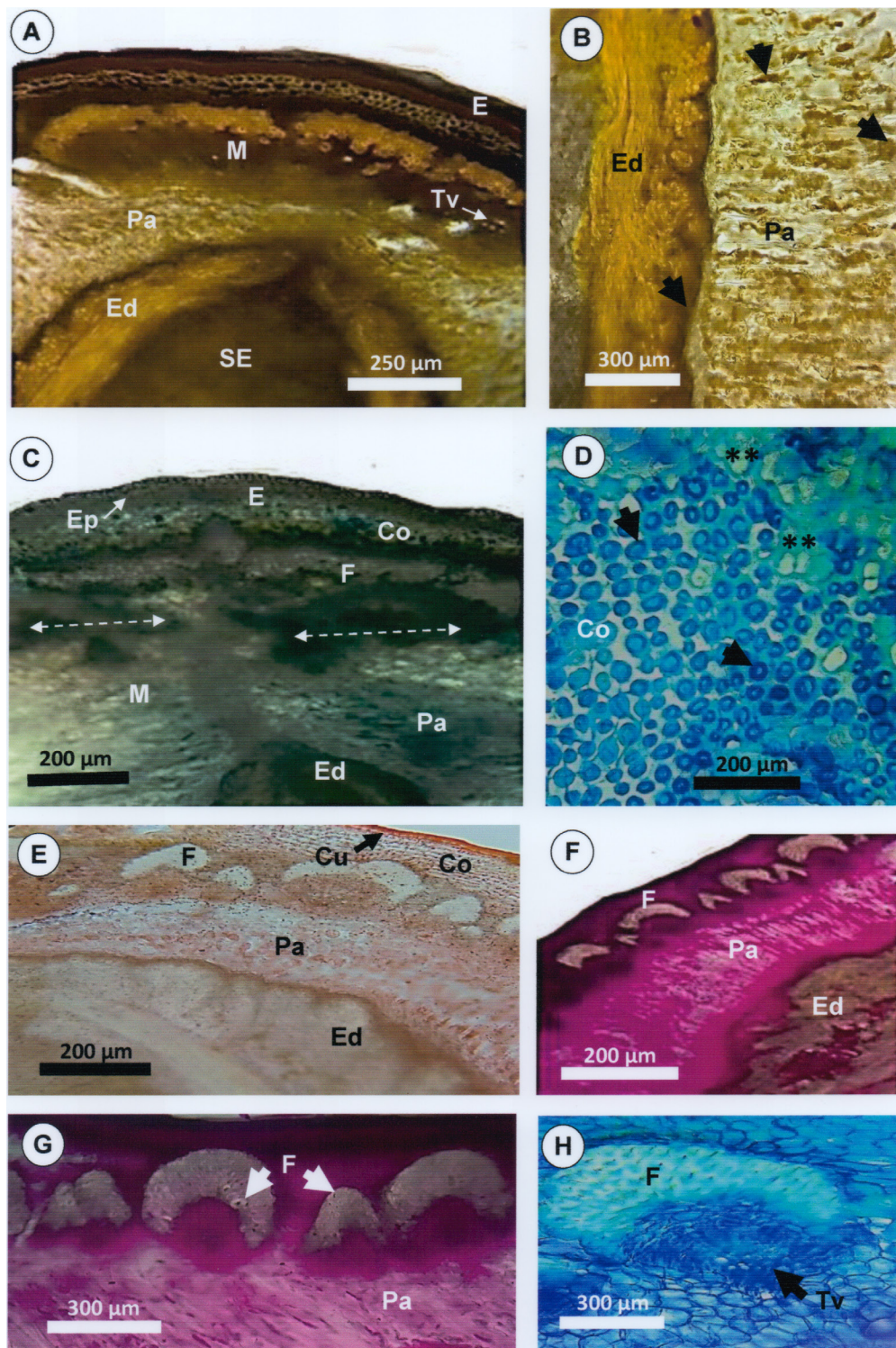


Figura 6: Histoquímica del fruto de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. A. corte transversal que muestra presencia de almidón (coloración café oscuro o negro) en todas las partes del fruto y la semilla; B. corte longitudinal del endocarpio y mesocarpio mostrando acumulaciones de almidón (flechas); C. corte transversal del fruto mostrando la presencia de proteínas (coloración azul verdosa (flechas punteadas) en todos los tejidos; D. sección transversal del colénquima del mesocarpio con proteínas tanto en las paredes de las células (flechas), como en los espacios intercelulares y parénquima circundante (**); E. corte transversal del fruto mostrando sustancias lipídicas (coloración naranja-rojiza) en la cutícula del epicarpio, en el mesocarpio y endocarpio; F. corte transversal del fruto que muestra polisacáridos insolubles en todos los tejidos, identificados con la tinción APS; G. haces de fibras y parénquima del mesocarpio en corte transversal con abundantes polisacáridos insolubles (coloración rosa magenta-morado); H. detalle de un haz de fibras y tejido vascular en el mesocarpio (tinción con azul de toluidina para denotar presencia de celulosa). APS=ácido peryódico Schiff, Co=colénquima, Cu=cutícula, E=epicarpio, Ed=endocarpio, Ep=epidermis, F=fibras, M=mesocarpio, Pa=parénquima, SE=semilla, Tv=tejido vascular.

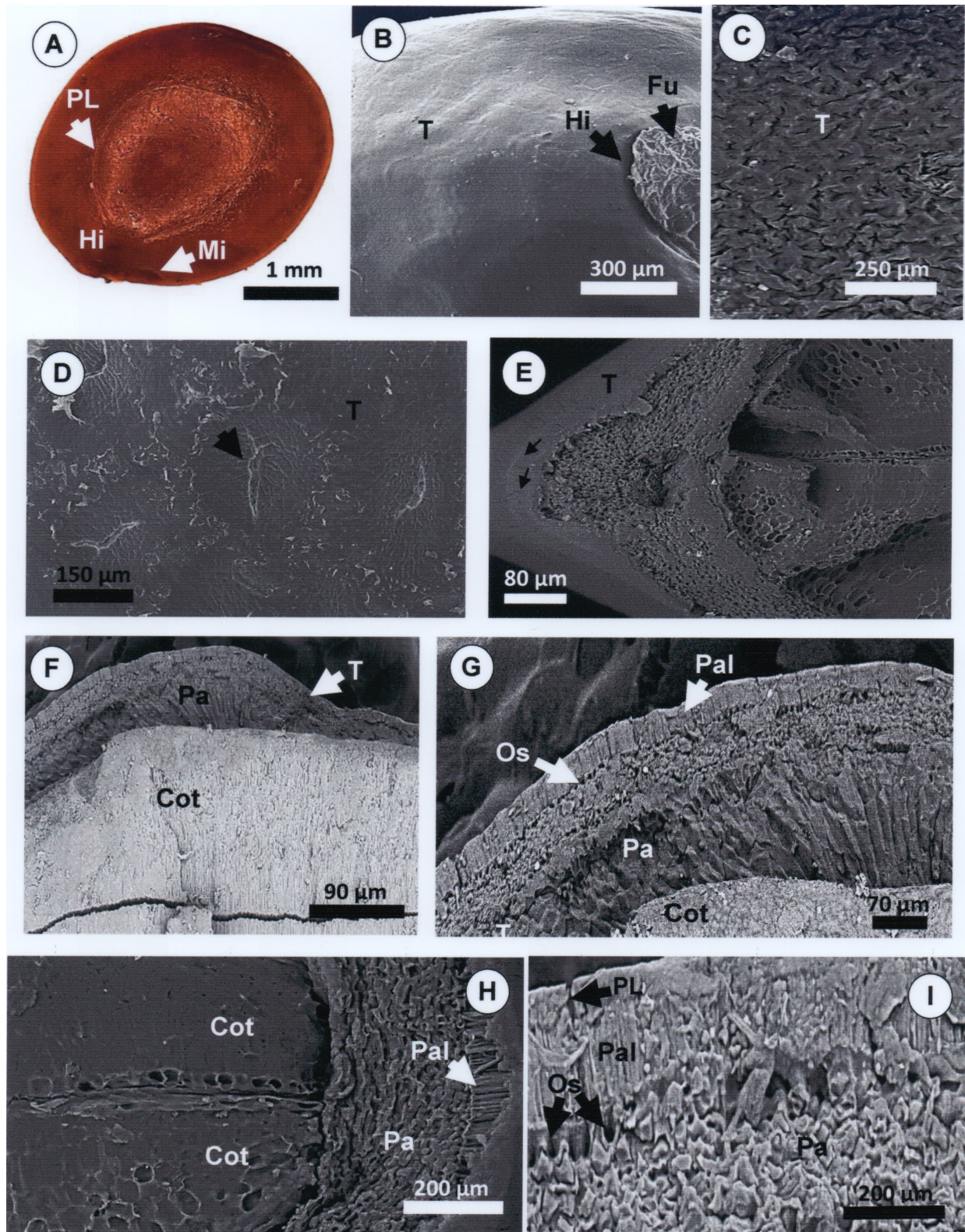


Figura 7: Semilla de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. A. vista superficial de la semilla en el estereomicroscopio; mostrando el pleurograma, micrópilo e hilo; B. vista superficial de la testa en el microscopio electrónico de barrido (MEB), mostrando hilo y restos del funículo; C. superficie rugosa-punteada de la testa observada con MEB; D. detalles de la testa y fisuras (flecha) en vista superficial; E. corte transversal que muestra fisuras (flechas) en la testa; F. corte longitudinal de la semilla mostrando testa, parénquima y cotiledones; G. corte transversal que muestra empalizada con macroesclereidas en la epidermis, osteoesclereidas de la hipodermis y el parénquima subyacente; H. corte longitudinal mostrando la empalizada, parénquima ligeramente colapsado de la testa y los cotiledones. I. detalle de la empalizada, osteoesclereidas y parénquima de la testa. Cot=cotiledones, Fu=funículo, Hi=hilo, Mi=micrópilo, Os=osteoesclereidas, Pa=parénquima, Pal=empalizada, PL=pleurograma, T=testa.

La hipodermis se encuentra debajo de la epidermis; consiste en una capa uniforme de células continuas a través de la epidermis excepto en el área de hilo donde está ausente. La forman células de esclerénquima con paredes de espesor desigual, llamadas osteoesclereidas, que son cuadrangulares con engrosamientos en las paredes radiales; además, presentan grandes espacios intercelulares (Fig. 7G). Subyacente a la hipodermis está el parénquima (Fig. 7F-I), formado por varias capas de células con pared ligeramente engrosada de naturaleza celulósica, tangencialmente alargadas en la dirección hilo-calaza y distribuidas de manera uniforme a lo largo de toda la estructura de la testa, excepto en la región del hilo. En ocasiones, el parénquima puede estar ligeramente colapsado (Fig. 7H, I).

Embrión

Los cortes histológicos de vainas inmaduras mostraron caracteres del desarrollo temprano de la semilla, las estructuras que la constituyen (embrión, funículo) y su conexión con los tejidos del pericarpo (Fig. 8A, B). El embrión es axial, linear, ligeramente oblicuo con un eje corto al que se unen los dos cotiledones alargados cuyo ápice está orientado hacia la región calazal, la cual contiene un haz vascular formado por xilema y floema (Fig. 8C-E). El embrión está protegido por la testa de la semilla en la que, con base en pruebas histoquímicas, se identificó la presencia de almidón y lípidos (Fig. 8F, G).

Los cotiledones son foliáceos, color verde claro, alargados, asimétricos, con ápice ligeramente apiculado, formando una porción interior hueca. Anatómicamente están compuestos de parénquima con paredes delgadas. Tienen 2-3 hileras de parénquima en empalizada sobre la superficie adaxial (debajo de una epidermis uniestratificada). Presentan almidón, polisacáridos insolubles y lípidos (Fig. 8H-K). Pueden observarse remanentes de endospermo con presencia de almidón en las zonas adyacentes a ellos (Fig. 8H). Sin embargo, los contenidos o inclusiones celulares más abundantes, principalmente en el parénquima de la parte central, son estructuras globoides o cuerpos de proteína (Fig. 8L-N). Además de almidón, el endospermo también contiene proteínas, como lo demuestran las pruebas histoquímicas (Fig. 9A, B). El análisis por espectroscopia de rayos X de energía dispersiva mostró la presencia de algu-

nos microelementos, entre ellos C, Al, S, Si, K, Ca y Cu, en los cotiledones del embrión, el parénquima y el endospermo de la semilla (Cuadro 4, Fig. 9C, D).

Discusión

Implicaciones taxonómicas y ecoanatómicas

Fruto

Algunos caracteres morfométricos de los frutos de *P. laevigata* registrados en el presente trabajo son similares a los de otras especies del género; por ejemplo, en *P. vidualiana* A. Naves y *P. yaquiana* R.A. Palacios se documentaron valores máximos de longitud de 20-21 cm; lo mismo ocurre con el ancho, que en la población de *P. laevigata* analizada osciló entre 4.5-10.3 mm, mientras que en *P. odorata* Torr. & Frém. fue de 7-10.1 mm (Palacios, 2006). No obstante, las vainas de *P. laevigata* son de mayor tamaño (media=15.14 cm), comparadas con *P. chilensis* (Molina) Stuntz, que miden 12.2 cm (Estévez et al., 2012; 2013).

Por otro lado, *P. alba* Griseb. se caracteriza por presentar frutos de 17 cm de largo, 5.7 g de peso y 26 semillas en promedio (Sciammaro et al., 2016), valores relativamente altos comparados con los registrados en los individuos de *P. laevigata* analizados en esta investigación. Se esperaba que los frutos o vainas más grandes tuvieran un mayor número de semillas; sin embargo, el análisis de correlación no demostró una asociación significativa entre las variables longitud y ancho del fruto con número de semillas (Cuadro 4).

Este hecho probablemente se debe a que las semillas no culminan su desarrollo o maduración, o tal vez a la depredación provocada por insectos. De acuerdo con Kingsolver et al. (1977) algunos insectos dañan los frutos de *Prosopis* y pueden agruparse en dos tipos: los que comen totalmente los frutos desde afuera (adultos y ninfas de hemípteros), cuando están verdes o inmaduros, y los que los consumen desde adentro (principalmente larvas de lepidópteros y coleópteros) e ingieren algunas semillas de los frutos inmaduros y permanecen en ellos como huéspedes, sin interrumpir su maduración, pero ocasionando daños invisibles en el exterior. Esto último podría explicar la ausencia de correlación significativa entre el tamaño del fruto y número de semillas que contiene.

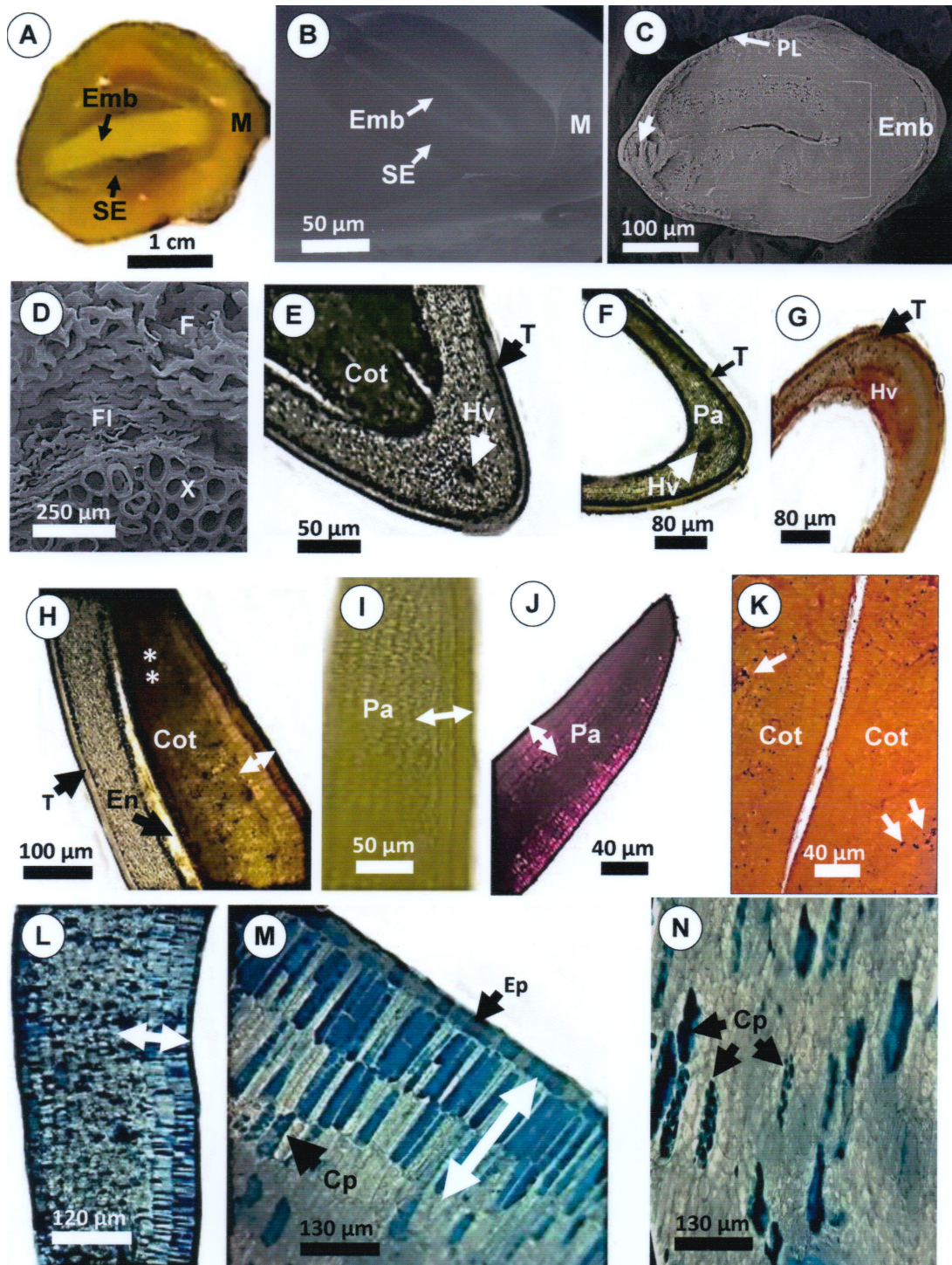


Figura 8: Semilla y embrión de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. A. corte transversal del fruto maduro mostrando el embrión; B. corte transversal de fruto inmaduro visto al microscopio óptico, mostrando el embrión axial al interior de la semilla y parte del mesocarpo; C. corte transversal de semilla madura vista con microscopio electrónico de barrido (MEB) mostrando el embrión, haz vascular de la cálaza (flecha) y pleurograma; D. detalle del haz vascular calazal en corte transversal de semilla madura; E. corte transversal de semilla sin tinción, vista con microscopio óptico mostrando cotiledones asimétricos, testa y haz vascular; F. testa disociada de una semilla madura teñida con lugol mostrando la presencia de almidón en haz vascular y parénquima; G. testa disociada de la semilla teñida con Sudán IV para identificar lípidos (coloración naranja-rojiza); H. corte longitudinal de semilla madura mostrando testa, endospermo y cotiledones con doble empalizada (flecha doble sentido) debajo de la epidermis (la presencia de almidón denotada con asteriscos); I. sección longitudinal de cotiledón sin teñir, mostrando parénquima subyacente a la capa de empalizada (flecha doble sentido); J. sección longitudinal de un cotiledón teñido con APS mostrando acumulación de polisacáridos insolubles (color morado); K. cotiledones mostrando sustancias lipídicas (coloración naranja-rojiza) y algunos cuerpos lipídicos pequeños (flechas); L. corte longitudinal de cotiledón mostrando acumulación de proteínas (coloración azul) en el parénquima y empalizada (flecha doble sentido); M. presencia de proteínas en la epidermis y empalizada (flecha doble sentido) en sección longitudinal del cotiledón; N. cuerpos de proteína (Cp) en el parénquima de cotiledones. APS=ácido peryódico Schiff, Cot=cotiledones, Cp=cuerpos de proteína, Emb=embrión, En=endospermo, Ep=epidermis, F=fibras, Fl=floema, Hv=haz vascular, M=mesocarpo, Pa=parénquima, PL=pleurograma, SE=semilla, T=testa, X=xilema.

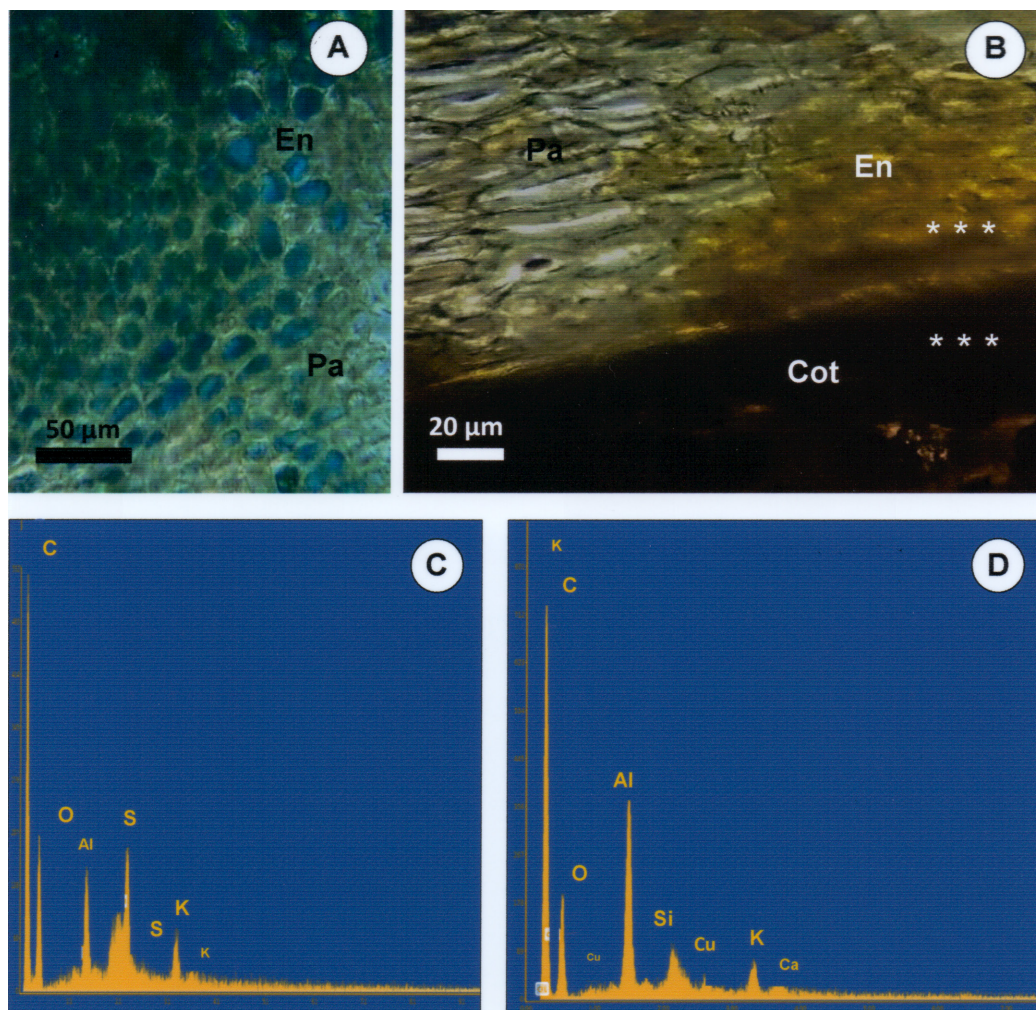


Figura 9: A. corte longitudinal de una semilla de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst., mostrando el parénquima del endospermo con proteínas (teñidas de color azul); B. presencia de almidón en los cotiledones y endospermo de una sección longitudinal de la semilla; C. espectro EDS de la composición microelemental de la testa de la semilla; D. espectro EDS de la composición microelemental del embrión. Al=aluminio, C=carbono, Ca=calcio, Cot=cotiledones, Cu=cobre, En=endospermo, K=potasio, O=oxígeno, Pa=parénquima, S=azufre, Si=silicio.

De acuerdo con Fontana et al. (2018), los frutos de *Prosopis* varían considerablemente en tamaño ya sea entre especies, individuos o poblaciones de una misma especie. Los frutos de taxones afro-asiáticos miden 3-12 cm de longitud, mientras que en los americanos se reconocen dos grupos: uno con vainas pequeñas y espiraladas de 2-10 cm de largo que pertenecen a las secciones *Strombocarpa* (Benth.) Engelm & A. Gray y *Monilicarpa* Ruiz Leal ex Burkart, y otro con vainas lineares o rectas con 10-45 cm de longitud de la sección *Algarobia* DC., en la cual se clasifica *P. laevigata*.

La estructura anatómica del fruto de *P. laevigata* presentó pericarpo constituido por epicarpo, mesocarpo y endocarpo septado con esclerénquima (fibras), caracteres comunes en *Prosopis* y otras Fabaceae (Meyer y Morton,

1971; Chauhan y Pandey, 2014; Fontana et al., 2018). Además, en los frutos de *P. laevigata* fue evidente la presencia de estomas anomocíticos en el epicarpo, cuya significancia fisiológica ha sido escasamente documentada; aunque Cach-Pérez et al. (2014) establecen que su presencia en especies con distribución en zonas áridas es una adaptación relacionada con características de esclerofilia, ya que contribuyen a regular la economía hídrica (Chaves et al., 2016; Chávez-Güitron et al., 2019). Esto explicaría su función en las vainas de *P. laevigata*; sin embargo, se requieren estudios fisiológicos posteriores para corroborarlo. Khan y Sahito (2017) mencionan la presencia de estomas en los frutos de algunas especies de Fabaceae; por ejemplo, *Acacia stenophylla* A. Cunn. ex Benth., que posee estomas

anomocíticos en el epicarpo de los frutos. Por tanto, esta característica no representaría un atributo con utilidad taxonómica.

En lo que se refiere a la presencia de cristales, Jana y Mukherjee (2014) plantearon que en las angiospermas el oxalato de calcio (CaC_2O_4) parece encontrarse en diferentes partes de las plantas, como estructuras vegetativas (hojas, tallos, raíces) o reproductivas (flores, frutos y semillas). La mayoría de los cristales tienen forma prismática, hexagonal o rectangular (Cuéllar-Cruz et al., 2020) y se le atribuye la regulación de los niveles de calcio, brindar soporte en células y tejidos, protección contra herbívoros, detoxificación de metales pesados, precipitación de sales de calcio, regulación de la intensidad de luz y resistencia al estrés salino, entre otras (Kuo-Huang et al., 2007).

Aunque la formación de cristales está controlada genéticamente, se ha mencionado que factores como temperatura, presión atmosférica, intensidad de luz y pH del suelo, entre otros, pueden afectarla (Brown et al., 2013). En especies de *Acacia* Mill., por ejemplo, su morfología no se ve alterada por el clima, pero sí su abundancia y distribución, ya que aumentan con la aridez; además, la concentración de calcio en las hojas también es mayor por lo que se ha concluido que tanto la aridez como los niveles de calcio en el suelo tienen un papel relevante en la precipitación del oxalato de calcio y la formación de cristales (Brown et al., 2013). En el caso de *P. laevigata* se encontraron cristales de oxalato de calcio en el mesocarpo y endocarpo del fruto mediante el análisis EDS. Sin embargo, es necesario realizar estudios detallados para conocer su cantidad y distribución, y también para comprender su significado ecofisiológico. Asimismo, será necesario comparar con otras especies del género y determinar las posibles implicaciones taxonómicas que pudieran tener, ya que también han sido observados en las vainas de *P. cineraria* (Vyas y Jadeja, 2016) y *P. alba* (Rodríguez et al., 2019).

Semillas

En especies de *Prosopis*, las semillas se han descrito con formas ovadas, elípticas o irregulares, de 6-10 mm de largo, 3.5-6 mm de ancho y 2.5-4 mm de grosor (Gunn, 1984). En los individuos analizados de *P. laevigata* se registraron valores promedio de $6.54 \times 4.35 \times 1.86$ mm, los cuales son

similares a los de *P. juliflora* (Sw.) DC., *P. velutina* Wootton, *P. tamaulipana* A. Burkart, *P. glandulosa* Torr., *P. mayana* R.A. Palacios, *P. odorata* Torr. & Frém. y *P. yaquiiana* R.A. Palacios (Palacios, 2006; Villarreal-Garza et al., 2013). Sin embargo, en *P. cineraria* (L.) Druce, las semillas son de mayor tamaño que las de las especies anteriores, ya que pueden medir hasta 7.9 mm de largo y 4.9 mm de ancho (Villarreal-Garza et al., 2013). Lo mismo ocurre al contrastar las de *P. laevigata* con las de *P. alba* (longitud y ancho promedio de 5.61 ± 0.56 mm y 3.27 ± 0.34 mm, respectivamente) (Sciammaro et al., 2016); también son más grandes que las de *P. odorata*, las cuales miden $2.5 \times 1.8 \times 0.9$ mm (Kopooshian, 1963). En lo que respecta al peso de las semillas, en *P. laevigata* fue de 0.41 g en promedio, siendo mayor comparado con las de *P. africana* Taub., con 0.3 g (Houëtchégnon et al., 2015); mientras que en *P. glandulosa* pesan ca. 0.69 g (Villarreal-Garza et al., 2013).

Posiblemente las variaciones en el tamaño de las semillas de *P. laevigata*, comparadas con las de otras especies del género, están relacionadas con diferencias en la disponibilidad de nutrientes. En el caso del peso, se considera que la variación es resultado de factores como un suministro parental diferencial relacionado principalmente con la calidad genética de las semillas y su posición dentro del fruto (Khurana y Singh, 2001). Para el mezquite, se ha investigado cómo operan los factores y procesos que originan la variación morfológica de frutos y semillas observable a diferentes niveles, ya sean especies, poblaciones, individuos e incluso dentro de un mismo individuo (Fontana et al., 2018; Castillo et al., 2021), como ocurre en especies de *Quercus* L. (Fagaceae) y *Cyphomandra betacea* Cav. Sendtn. (Solanaceae) (Rubio-Licona et al., 2011; Lagos Santander et al., 2013).

En la presente investigación se observaron a nivel intrapoblacional diferencias en el número de semillas por fruto, aunque no fueron significativas ($F=1.57$; $p=0.1616$). Por tanto, no reflejan la variabilidad de la especie dado que el número de muestras ($n=20$ árboles) analizadas fue bajo. De acuerdo con Konarska (2018), el número de semillas puede estar determinado por factores genéticos y por condiciones ambientales prevalecientes durante el periodo de floración y polinización. Sin embargo, cabe destacar que la longitud y el ancho tuvieron diferencias estadísticas significativas

(ANOVA, $p < 0.05$) al comparar las muestras provenientes de diferentes árboles (Cuadro 2, Fig. 3). Además, se registraron coeficientes de correlación inversos luego de confrontar número de semillas con caracteres como peso y ancho del fruto, entre otros, lo que podría reflejar variabilidad intrapoblacional de esta característica en *P. laevigata*. Por lo anterior, es necesario estudiar poblaciones adicionales e incluso otras especies de *Prosopis* para corroborar su valor taxonómico, en conjunto con otros caracteres morfológicos tanto vegetativos como reproductivos, como han mencionado Mohamed y Azer (2015).

Los caracteres micromorfológicos y anatómicos de las semillas han sido utilizados como herramientas importantes en estudios taxonómicos de las Fabaceae (Turki et al., 2013; Noori et al., 2014; Mirzaei, et al., 2015), particularmente al examinar su forma, tamaño, color, anatomía, topografía o relieve de la testa, entre otras. En el presente trabajo, el microscopio electrónico de barrido permitió observar que la testa de la semilla de *P. laevigata* tiene superficie rugoso-punteada, que es característica en otras especies, como *P. farcta* y *P. juliflora* (George et al., 2016), y otros géneros de Fabaceae como *Indigofera* L. (Murthy y Sanjappa, 2002), *Colutea* L. (Mirzaei et al., 2015), *Oxytropis* D.C. (Erkul et al., 2014) y *Crotalaria* L. (Subramaniam et al., 2015). Por ello, es necesario realizar estudios que incluyan análisis de las semillas de otros *Prosopis*, con la finalidad de identificar su posible significado o importancia taxonómica, para establecer similitudes y diferencias entre distintos taxones (Leython y Jáuregui, 2008).

También fue notoria la presencia de un pleurograma en *P. laevigata*, que es una estructura que solamente se encuentra en las familias Cucurbitaceae y Fabaceae, y tiene valor taxonómico ya que su presencia, ausencia y forma (elíptica, en forma de "O", "U", etc.), junto con otros caracteres de la semilla (color, tamaño, forma del hilo, relieve de la testa, entre otros), permite separar e identificar especies (Gunn, 1984; Leython y Jáuregui, 2008). En Fabaceae, está presente en las subfamilias Mimosoideae y Caesalpinioideae; en la primera, tiene forma de "U" invertida, mientras que en Caesalpinioideae es cerrada y circular (Barroso et al., 1999). En Mimosoideae, el pleurograma consiste en una ruptura en las células de empalizada, que forman una ranura similar a la observada en *P. laevigata*; otras espe-

cies que también la presentan son *P. juliflora*, *P. articulata*, *P. velutina* y *P. glandulosa* (Palacios y Bravo, 1975; Irving, 1984; Irving y Beckler, 1985; Serrato-Valenti et al., 1990).

El pleurograma permite la entrada de agua para hidratar al embrión y desencadenar la germinación (Rodrigues-Junior et al., 2019). Su presencia en *P. laevigata* representaría una característica importante, ya que puede tener una función relevante durante la germinación. Dada la dificultad que tienen sus semillas para germinar, el pleurograma facilitaría la rehidratación cuando la humedad relativa del ambiente o disponibilidad de agua es baja, por lo que la entrada de agua a través de él permitiría el reinicio de la actividad metabólica de la semilla y completar la germinación (López-Martínez et al., 2014; Morales-Domínguez et al., 2019).

Con relación a la anatomía de la testa de la semilla, en *P. laevigata* se registraron caracteres similares a los de *P. juliflora*, que presenta una capa de macroesclereidas en empalizada que la hace impermeable y le otorga latencia (atribuida exclusivamente a la dureza), como mencionan Serrato-Valenti et al. (1990). También es similar a otras Fabaceae, entre ellas, *Calliandra* Benth. (Leython y Jáuregui, 2008), *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub., *Mimosa bimucronata* (D.C.) Kuntze (Geisler et al., 2017), *Ormosia paraensis* Ducke, *Peltophorum pterocarpum* (D.C.) Backer ex Heyne y *Pentaclethra macroloba* (Willd.) Kuntze (Marques da Silva e Silva et al., 2015; Neto-Soares et al., 2019; Parra-Rivero et al., 2020).

La impermeabilidad de la testa de la semilla, *sensu* latencia física, ocurre en 15 familias de Angiospermas y es particularmente común en Fabaceae (Figueroa y Jaksic, 2004; García de Santana et al., 2015, Sánchez-Soto et al., 2016). Las especies con este tipo de latencia tienen cubiertas seminales que previenen la imbibición de agua aún bajo condiciones ambientales favorables. Así, el tiempo en que las semillas llegan a ser permeables juega un papel importante para controlar y sincronizar la germinación bajo condiciones naturales con el subsecuente establecimiento exitoso de las plántulas (Sobrevilla-Solís et al., 2013). Por lo tanto, la latencia física es de gran importancia ecológica y está relacionada con las características histológicas de la testa, tales como células epidérmicas en empalizada fuertemente unidas (Venier et al., 2012; Geisler et al., 2017).



En *P. laevigata* se observaron macroesclereidas, lo cual podría representar la barrera principal a la captación de agua e inicio de la germinación, como se ha mencionado también para el género *Acacia* (Venier et al., 2012) y para *Anadenanthera colubrina* Vell. Brenan var. *cebil* (Griseb.) Altschul (Varela y Albornoz, 2013). Lo anterior no necesariamente significa que la semilla sea impermeable al agua; sin embargo, el arreglo celular en empalizada determinaría la posibilidad, o no, de imbibición para iniciar la germinación (Pavón et al., 2011; Galussi et al., 2015; Morales-Santos et al., 2017; Flores de la Cruz et al., 2018). Aunque la testa dura e impermeable permite que la semilla perdure en un ambiente estresante con altas temperaturas en sitios abiertos, regiones áridas o semiáridas, con precipitaciones pluviales variables e impredecibles, donde generalmente crece *P. laevigata* (González-Medrano, 2012).

En los cotiledones del embrión de *P. laevigata* fue evidente la presencia de proteínas, visibles como una matriz en las células de parénquima del embrión en estructuras bien delimitadas (cuerpos de proteína). De acuerdo con Irving (1984), Irving y Beckler (1985) y Burghardt (2000), estos compuestos son la principal reserva de almacenamiento en las semillas de *Prosopis*. Su presencia en los cotiledones de *P. laevigata*, junto con el almidón, representan una fuente de reservas importante para que la plántula se desarrolle en etapas tempranas de crecimiento en condiciones naturales (Idu y Onybe, 2008; Kazlowski et al., 2013; Bakhshy et al., 2020).

En otras especies de *Prosopis* también se ha mencionado la presencia de endospermo (Irving, 1984; Irving y Beckler, 1985), que no es constante en eudicotiledóneas; en Fabaceae, por ejemplo, puede o no estar presente y rara vez es abundante, aunque comúnmente se relaciona con mayor tamaño de la semilla y germinación más rápida (Valencia-Díaz et al., 2015).

Composición micro elemental de la semilla

En las semillas de los individuos de *P. laevigata* analizados se registró la presencia de S, Al, K, Ca, Cu, Mg y Si. En una planta las cantidades de calcio y potasio tienen una correlación positiva con su disponibilidad en el suelo (Kheloufi et al., 2020) En otras especies, por ejemplo *P. africana*,

también se ha documentado que las semillas contienen K, Ca, S, P, Cl y trazas de Mn, Zn, Cd y Sb; siendo azufre y potasio los elementos presentes en mayor proporción (Anhwange et al., 2020). Esto concuerda con los resultados del presente trabajo, ya que el azufre tuvo una proporción de 2.24% y el potasio de 0.61% (Cuadro 3). De acuerdo con Granados-Sánchez et al. (2010), para las plantas las principales fuentes naturales de azufre son la materia orgánica, los minerales del suelo y los gases atmosféricos. En el caso del potasio, la absorción usualmente depende de la cantidad que haya en el suelo; mientras que el calcio, por lo general, se encuentra en los tejidos de plantas que crecen en regiones semiáridas donde predominan los suelos calizos (Duniway et al., 2010; Abdelfattah, 2013; Wahba et al., 2019), lo cual podría ser el caso de *P. laevigata*, dada su distribución. En *P. juliflora*, Kathirvel y Kumudha (2011) encontraron que el potasio también es abundante en la semilla; además, mencionan que la variación en el contenido de minerales puede estar relacionado con el origen genético, región geográfica, fertilidad del suelo y eficiencia de captación.

Conclusiones

Los caracteres morfológicos de frutos y semillas de *P. laevigata* presentaron variabilidad intrapoblacional. La estructura morfológica y anatómica de los frutos fue similar a otras especies de *Prosopis*, con estomas en el epicarpo y cristales prismáticos de oxalato de calcio en el mesocarpo y endocarpo. En el caso de las semillas, su morfología es semejante a la de otros *Prosopis* (pleurograma, hilo y micrópilo subapicales), testa con cuatro capas o estratos bien definidos (cutícula, epidermis con empalizada de macroesclereidas, hipodermis con osteoesclereidas y parénquima). Estos caracteres ecofisiológicos podrían ser importantes para entender los mecanismos que determinan la intensidad de la latencia física de dichas semillas y su influencia en la modulación de la relación ambiente-semilla, que es crucial en ecología de la restauración de *P. laevigata* en ambientes áridos y semiáridos. En el caso de las posibles implicaciones taxonómicas, se requieren estudios más detallados sobre la morfo-anatomía de frutos y semillas y comparar con otras especies del género *Prosopis* para concluir al respecto.

Contribución de autores

LGA participó en el diseño de la investigación, la recolección de muestras de material vegetal y su procesamiento para análisis anatómico e histoquímico. GJLD coordinó el estudio anatómico de las muestras mediante microscopía electrónica de barrido y análisis de composición elemental mediante espectroscopia de rayos X de energía dispersiva. EMG participó en la revisión, estructura y correcciones del manuscrito. SLC concibió y diseñó el estudio, realizó el análisis estadístico y estructuró el documento. LGA, GJLD, EMG y SLC revisaron y aprobaron el documento final.

Financiamiento

La investigación fue realizada con recursos propios de los autores.

Agradecimientos

Las autoras agradecen a Ana Iris Peña Maldonado e Ignacio Becerril Juárez, por su apoyo en el análisis de muestras en el microscopio electrónico de barrido, y al Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología (LINAN) del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), por facilitar el uso de sus instalaciones. También nuestro agradecimiento a Artemisa Bernal Alcocer, por la elaboración del mapa y a José Donald Contreras Mares, por su colaboración en el estudio anatómico-histoquímico. A los revisores anónimos y al equipo editorial de *Acta Botanica Mexicana* por todas las sugerencias para mejorar el manuscrito.

Literatura citada

- Abdalla, M., I. Babiker, J. Al-Brahim, A. Mohammed, M. El-Kordufani y M. Eloheid. 2014. Potential of *Prosopis chilensis* (Molina) Stuntz as a non-conventional animal feed in the dry lands of Sudan. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences* 4(2): 673-676.
- Abdelfattah, M. 2013. Pedogenesis, land management and soil classification in hyper-arid environments: results and implications from a case study in the United Arab Emirates. *Soil Use and Management* 29: 279-294. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12031>
- Aguirre-Dugua, X., L. E. Eguarte, A. González-Rodríguez y A. Casas. 2012. Round and large: morphological and genetic consequences of artificial selection on the gourd tree *Crescentia cujete* by the Maya of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Annals of Botany* 109: 1297-1306. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcs068>
- Anhwange, B. A., R. E. Kyenge y B. Ishwa. 2020. Chemical analysis of *Prosopis africana* seeds. *Nigerian Annals of Pure and Applied Sciences* 3(2): 129-140. DOI: <https://doi.org/10.46912/napas.141>
- Armijo-Nájera, M. G., A. Moreno-Résendez, E. Blanco-Contreras, V. J. Borroel-García y J. L. Reyes-Carrillo. 2019. Vaina de mezquite (*Prosopis* spp.) alimento para el ganado caprino en el semidesierto. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(1): 113-122. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1728>
- Bakhshy, E., F. Zarinkamar y M. Nazari. 2020. Structural and quantitative changes of starch in seed of *Trigonella persica* during germination. *International Journal of Biological Macromolecules* 164: 1284-1293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.262>
- Barroso, G. M., M. P. Morim, A. L. Peixoto y C. L. F. Ichaso. 1999. Frutos e sementes: morfologia aplicada á sistemática de dicotiledónea. *Taxon* 48(4): 856-857. DOI: <https://doi.org/10.2307/1223672>
- Boelcke, O. 1946. Estudio morfológico de las semillas de leguminosas Mimosoideas y Caesalpiniodeas de interés agronómico en Argentina. *Darwiniana* 7(2): 240-322.
- Brown, S. L., N. W. M. Warwick y C. J. Prychid. 2013. Does aridity influence the morphology, distribution and accumulation of calcium oxalate crystals in *Acacia* (Leguminosae: Mimosoideae)? *Plant Physiology and Biochemistry* 73: 219-228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.10.006>
- Burghardt, A. D. 2000. Estudio electroforético de proteínas de semilla en *Prosopis* (Leguminosae) II: sección *Strombocarpa*. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 35(1-2): 149-156.
- Cach-Pérez, M. J., J. L. Andrade y C. Reyes-García. 2014. La susceptibilidad de las bromeliáceas epífitas al cambio climático. *Botanical Sciences* 92(2): 157-168. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.55>
- Carrillo, F., L. Gómez y A. Arreola. 2014. Efecto de poda sobre potencial productivo de mezquites nativos en la comarca lagunera, México. *Revista Chapingo, serie Zonas Áridas* 6: 47-54.



- Castillo, M. L., U. Schaffner, B. W. van Wilgen, N. M. Montaña, R. O. Bustamante, A. Cosacov, M. J. Mathese y J. J. Le Roux. 2021. Genetic insights into the globally invasive and taxonomically problematic tree genus *Prosopis*. *AoBP Plants* 13(1): 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1093/aobpla/plaa069>
- Chauhan, V. y A. K. Pandey. 2014. Structure and evolution of the pod in *Indigofera* (Fabaceae) reveals a trend towards small thin indehiscent pods. *Botanical Journal of the Linnean Society* 176(2): 260-276. DOI: <https://doi.org/10.1111/boj.12203>
- Chaves, M. M., J. M. Costa, O. Zarrouk, C. Pinheiro, C. M. Lopes y J. S. Pereira. 2016. Controlling stomatal aperture in semi-arid-regions—the dilemma of saving water or being cool. *Plant Science* 251: 54-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.06.015>
- Chávez-Güitrón, L. E., F. C. Salinas-Pérez, E. A. Pérez-Salinas, J. Caballero, A. Vallejo-Zamora y E. Sandoval-Zapotitla. 2019. Variación de caracteres epidérmico-foliares de *Agave salmiana* subsp. *salmiana* (Asparagaceae) en el centro de México. *Botanical Sciences* 97(4): 711-724. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.2159>
- Cuéllar-Cruz, M., K. S. Pérez, M. E. Mendoza y A. Moreno. 2020. Biocrystals in plants: A short review on biomineralization processes and the role of phototropins into the uptake of calcium. *Crystals* 10(591): 1-23 <https://doi.org/10.3390/cryst10070591>
- Dübbern de Souza, F. H. y J. Marcos-Filho. 2001. The seed coat as a modulator of seed-environment relationships in Fabaceae. *Brazilian Journal of Botany* 24: 365-375. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-84042001000400002>
- Duniway, M. C., J. E. Herrick y H. C. Monger. 2010. Spatial and temporal variability of plant-available water in calcium carbonate-cemented soils and consequences for arid ecosystem resilience. *Oecologia* 163: 215-226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1530-7>
- Erkul, S. K., F. Celep y Z. Aytaç. 2014. Seed morphology and its systematic implications for genus *Oxitropis* D. C. (Fabaceae). *Plant Biosystems* 149(5): 1-9 DOI: <https://doi.org/10.1080/11263504.2014.969353>
- Estévez, A. M., B. Escobar y M. Sepúlveda. 2012. Physical and rheological characterization of seed of three legume species. *IDESIA (Chile)* 30(1): 83-90.
- Estévez, A. M., F. Figuerola, E. Benuy y C. Sáenz. 2013. Dietary fibre concentrate from Chilean Algarrobo (*Prosopis chilensis* (Mol.) Stuntz) pods. Purification and characterization. *Food Science and Technology International* 20(8): 629-635. DOI: <https://doi.org/10.1177%2F1082013213499769>
- Felker, P., G. Takeoka y L. Dao. 2013. Pod mesocarp flour of North and South American species of leguminous tree *Prosopis* (mesquite): composition and food applications. *Food Reviews International* 29: 49-66. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2012.692139>
- Figueroa, J. A. y F. M. Jaksic. 2004. Latencia y banco de semillas en plantas de la región mediterránea de Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural* 77: 201-205. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2004000100016>
- Flores de la Cruz, M. J., A. García-Esteva, J. R. García-Nava, J. Kohashi Shibata y M. C. Ybarra-Moncada. 2018. Phenological, morphological and yield component differences between a wild and domesticated form of common bean. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9(1): 137-149.
- Fontana, M. L., V. R. Pérez y C. V. Luna. 2018. Características evolutivas en *Prosopis* spp.: citogenética, genética e hibridaciones. *Rodriguésia* 69(2): 409-421. DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-7860201869212>
- Galussi, A. A., J. A. Argüello, M. M. Cerana, M. Maximino y M. E. Moya. 2015. Características anatómicas del tegumento seminal de *Medicago sativa* L. (alfalfa) cv. Baralfa 85 y su asociación con la dormición. *Revista Internacional de Botánica Experimental* 84: 163-175.
- García de Santana, D., V. J. Pereira, N. A. L. Brandão, G. A. Lobo y M. C. Martins. 2015. Intensidade da dormência de sementes de *Parkia pendula*. *Interciencia* 40(10): 710-715.
- García-López, J. C., H. M. Durán-García, J. A. de-Nova, G. Álvarez-Fuentes, J. M. Pinos-Rodríguez, H. A. Lee-Rangel, S. López-Aguirre, D. Ruiz-Tavares, J. A. Rendón-Huerta, J. G. Vicente-Martínez y M. Salinas-Rodríguez. 2019. Producción y contenido nutrimental de vainas de tres variantes de mezquite (*Prosopis laevigata*) en el Altiplano Potosino, México. *Agrociencia* 53: 821-831.
- Geisler, G. E., T. T. Pinto, M. Santos y M. T. Silveira Paulilo. 2017. Seed structures in water uptake, dormancy release, and germination in two tropical forest Fabaceae species with physically dormant seeds. *Brazilian Journal of Botany* 40(1): 67-77. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40415-016-0334-3>



- George, N. M., H. A. Hussein, A. Ghareeb y M. M. El-Demerdash. 2016. Taxonomic implications of seed morphology and seed protein electrophoresis of some Egyptian taxa of the Mimosoideae-Leguminosae. *Egyptian Journal of Botany* 56(1): 49-65.
- González-Medrano, F. 2012. Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)-Instituto Nacional de Ecología (INE). México, D.F., México. 173 pp.
- Granados-Sánchez, D., G. F. López-Ríos y M. A. Hernández-García. 2010. La lluvia ácida y los ecosistemas forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16(2): 187-206. DOI: <https://doi.org/10.5154/rchscfa.2010.04.022>
- Gunn, R. C. 1984. Fruits and seeds of genera in the subfamily Mimosoideae (Fabaceae). Technical Bulletin number 1681. United States Department of Agriculture Research Service. 204 pp.
- Hernández, H. M., M. Ricker, S. Rodríguez Rivera, M. A. Castillo Santiago, R. A. Hernández Juárez y D. Hernández. 2020. Atlas de las leguminosas arbóreas de México: clado *Mimosoideae*. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México y Petróleos Mexicanos. Cd. Mx., México. 417 pp.
- Houëtchégnon, T., G. D. S. J. Charlemagne, O. Christine y S. Nestor. 2015. Morphological variability of *Prosopis africana* (Guill. Perrott. et Rich.) Taub in Benin, West Africa. *American Journal of Plant Sciences* 6: 1069-1079. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2015.67111>
- Idu, M. y H. I. Onybe. 2008. Nature of ergastic substances in some Fabaceae seeds. *Research Journal of Botany* 3(1): 23-28.
- IIEG. 2018. Diagnóstico del municipio Lagos de Moreno. Instituto de Información Estadística y Geográfica. Jalisco, México. <https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2019/06/Lagos-de-Moreno.pdf> (consultado febrero de 2021).
- IIEG. 2019. Diagnóstico del municipio Lagos de Moreno. Instituto de Información Estadística y Geográfica. Jalisco, México. <https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2019/06/Lagos-de-Moreno.pdf> (consultado febrero de 2021).
- Irving, D. W. 1984. Seed structure and chemistry of *Prosopis velutina* (Leguminosae). *Botanical Gazette* 145(83): 340-345.
- Irving, D. W. y R. Beckler. 1985. Seed structure and composition of potential new crops. *Food Microstructure* 4: 43-53.
- Jana, B. K. y S. K. Mukherjee. 2014. Calcium oxalate crystals as an important character of pericarp in Compositae—a short communication. *Journal of Plant Development Sciences* 6(2): 311-313.
- Kathirvel, P. y P. Kumudha. 2011. Chemical composition of *Prosopis juliflora* (SW.) D. C. mosquito bean. *International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology* 2(4): 199-209.
- Kazlowski, B., M. R. Chen, P. M. Chao, C. C. Lai e Y. T. Ko. 2013. Identification and roles of proteins for seed development in mungbean (*Vigna radiata* L.) seed proteomes. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 61(27): 6650-6659. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf401170g>
- Khan, D. y Z. A. Sahito. 2017. Pods, seeds and seedlings of shoe string *Acacia* (*Acacia stenophylla* A. Cunn. ex. Benth.) growing in Karachi. Pakistan. *International Journal Biology and Technology* 14(3): 397-410.
- Kheloufi, A., L. M. Mansouri, M. Djelilate, M. Touka, A. Chater y C. Dekhinet. 2020. Nutritional characteristics and seed germination improvement of the forage shrub *Retama sphaerocarpa* (L. Boiss.) *Contemporary Agriculture* 69(3-4): 53-60. DOI: <https://doi.org/10.2478/contagri-2020-0008>
- Khurana, E. y J. Singh. 2001. Ecología del crecimiento de semillas y plántulas para la conservación y restauración del bosque seco tropical: Una revisión. *Conservación del Medio Ambiente* 28(1): 39-52.
- Kingsolver, J. M., C. D. Johnson, S. R. Swier y A. Terán. 1977. *Prosopis* fruits as a Resource for Invertebrates. In: Simpson, B. B. (ed.). *Mesquite, its biology in two desert shrub ecosystems*. Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pensilvania y Academic Press. Nueva York, USA. pp. 108-122.
- Konarska, A. 2018. Microstructural and histochemical characteristics of *Lycium barbarum* L. fruits used in folk herbal medicine and functional food. *Protoplasma* 255: 1839-1854. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00709-018-1277-2>
- Kopooshian, H. 1963. Seed character relationships in the Leguminosae. Ph. D. Retrospective Theses and Dissertations 2480. 165 pp. DOI: <https://doi.org/10.31274/rtd-180813-533>
- Kostlin, M. R. 2017. Identificación de Leguminosae-Caesalpinioideae arbustivas-arbóreas y lianas de la selva



- Paranaense (Misiones, Argentina) utilizando caracteres vegetativos. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica 52(3): 597-615. DOI: <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v52.n3.18035>
- Kuo-Huang, L. L., M. S. Ku y V. R. Franceschi. 2007. Correlations between calcium oxalate crystals and photosynthetic activities in palisade cells of shade-adapted *Peperomia glabella*. Botanical Studies 48: 155-164.
- Lagos Santander, L. K., F. A. Vallejo, T. C. Lagos Burbano y D. E. Duarte Alvarado. 2013. Genotypic correlations, phenotypic, environmental and path analysis in tree tomato (*Cyphomandra betacea* Cav. Sendt.). Acta Agronómica 62(3): 217-224.
- Leython, S. y D. Jáuregui. 2008. Morfología de semilla y anatomía de la cubierta seminal de cinco especies de *Calliandra* (Leguminosae-Mimosoideae) de Venezuela. Revista de Biología Tropical 56(3): 1075-1086.
- López Cravioto, D., S. Sandoval Torres, J. Rodríguez Ramírez y L. V. Aquino Gonzáles. 2018. Secado convectivo de vainas de mezquite (*Prosopis laevigata*). Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca 2(2): 115-120.
- López Curto, M. L., J. Márquez Guzmán y G. Murguía Sánchez. 1998. Técnicas para el estudio del desarrollo en angiospermas. Las prensas de Ciencias, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Mx., México. Pp. 33-40.
- López-Martínez, P. L., H. Villalón Mendoza, J. I. Yerena Yamallel, J. Jiménez Pérez, J. A. Guevara González y R. A. Martínez Barrón. 2014. Sistemas de riego para la producción de planta de *Prosopis laevigata* (Humb & Bonpl. ex Wild), M. C. Johnst. en vivero forestal. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales 10(2): 45-51.
- Lovey, R. J., P. Perissé, C. Vieyra y J. C. Coraglio. 2010. Caracterización de semilla, germinación y plántula de *Cologania broussonetii* (Balb.) DC. Phytón 79: 5-10.
- LPWG. 2017. A new subfamily classification of the Leguminosae: a taxonomically comprehensive phylogeny. Taxon 66(1): 44-77. DOI: <https://doi.org/10.12705/661.3>
- Marques da Silva e Silva, B., C. de Oliveira e Silva, F. Vitti Mouro y R. Daiton Vieira. 2015. Morphoanatomy of fruit, seed and seedling of *Ormosia paraensis* Ducke. Journal of Seed Science 37(4): 192-198. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v37n4151436>
- Marzouk, R. I. 2006. Taxonomic consequences of seed morphology and anatomy in three *Lupinus* species (Fabaceae-Genisteae). The International Journal of Environmental Sciences 1(2): 1-8.
- McRostie, V. B., E. M. Gayo, C. M. Santoro, R. De Pol-Holz y C. Latorre. 2017. The pre-Columbian introduction and of Algarrobo (*Prosopis*, Section Algarobia) in the Atacama Sudameric northern Chile. PloS ONE 12(7): e0181759 DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181759>
- Meyer, R. E. y H. L. Morton. 1971. Morphology and anatomy of honey mesquite. Technical Bulletin No. 1423, Agricultural Research Service United States, Department of Agriculture. Austin, U.S.A. 194 pp.
- Mirzaei, L., M. Assadi, T. Nejadstari e I. Mehregan. 2015. Comparative seed and leaf micromorphology of *Colutea* species (Fabaceae) from Iran. Environmental and Experimental Biology 13: 183-187.
- Mohamed, A. y A. Azer. 2015. Taxonomy of genus *Prosopis* L. in Egypt. International Journal of Environment 4(1): 13-20.
- Morales-Domínguez, J. F., D. C. Sabás-Díaz de León, C. Garcidueñas-Piña y E. Pérez-Molphe-Balch. 2019. Germination, *in vitro* propagation and soil acclimatization of *Acacia farnesiana* and *Prosopis laevigata*. South African Journal of Botany 124: 345-349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.034>
- Morales-Santos, M. E., C. B. Peña-Valdivia, A. García-Esteva, G. Aguilar-Benítez y J. Kohashi-Shibata. 2017. Características físicas y de germinación en semillas y plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) silvestre, domesticado y su progenie. Agrociencia 51: 43-62.
- Munsell, A. H. 2000. Soil color charts. Revised washable edition Ed. Gretagmacbeth. New Winsor, USA. 55 pp.
- Murthy, G. V. S. y M. Sanjappa. 2002. SEM studies on seed morphology of *Indigofera* L. (Fabaceae) and its taxonomic utility Rheeda 12(1): 21-51.
- Negrete-Sánchez, L. O., J. Pinos-Rodríguez, A. Grajales-Lagunes, J. Morales, J. García-López y H. Lee-Rangel. 2017. Effects of increasing amount of dietary *Prosopis laevigata* pods on performance, mean quality and fatty acid profile in growing lambs. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 101: 303-311. DOI: <https://doi.org/10.1111/jpn.12606>



- Neto-Soares, R., R. Oliveira dos Santos y B. Marques da Silva e Silva. 2019. Morphological aspects and anatomy of the fruit, seeds and seedlings of *Pentaclethra macroloba* (Willd.) Kuntze. *Journal of Seed Science* 41(4): 452-460. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v41n4222721>
- Noori, M., D. Mohammad-Mehdi y M. Sharifi. 2014. Numerical taxonomy of *Onobrychis* Miller (Hedysareae, Fabaceae) from Markazi Province, Iran using pod and seed morphological characters. *International Journal of Modern Botany* 4(2): 40-47.
- Palacios, R. A. 2006. Los mezquites mexicanos: Biodiversidad y distribución geográfica. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 41: 99-121.
- Palacios, R. A. y L. D. Bravo. 1975. Estudio morfológico de las semillas de *Prosopis*, II: Algunas especies norteamericanas y neotropicales. *Darwiniana* 19(2-4): 357-372.
- Parra-Rivero, S., N. Maciel De Souza, M. Sanabria-Chopite y R. Valera. 2020. Dormancia física de la semilla de *Peltophorum pterocarpum* (DC.) Backer ex Heyne: Estudio morfoanatómico, germinación y emergencia de la plántula. *Revista Bases de la Ciencia* 5(83): 73-89. DOI: https://doi.org/10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v5i3.2489
- Pavón, N. P., J. Ballato-Santos y C. Pérez-Pérez. 2011. Germinación y establecimiento de *Mimosa aculeaticarpa* var. *biuncifera* (Fabaceae-Mimosoideae). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 82: 253-661.
- Peña-Avelino, L. Y., J. Pinos-Rodríguez, L. Yañez-Estrada, B. Juárez-Flores, R. Mejía y H. Andrade-Zaldivar. 2014. Chemical composition and *in vitro* degradation of red and white mesquite (*Prosopis laevigata*) pods. *South African Journal of Animal Science* 44: 298-306. DOI: <https://doi.org/10.4314/sajas.v44i3.12>
- Peña-Avelino, L. Y., J. Pinos-Rodríguez, B. Juárez-Flores y L. Yañez-Estrada. 2016. Effects of *Prosopis laevigata* pods on growth performance, ruminal fermentation and blood metabolites in finishing lambs. *South African Journal of Animal Science* 46: 360-365. DOI: <https://doi.org/10.4314/sajas.v46i4.3>
- Rodrigues-Junior, A. G., A. C. M. P. Mello, C. Baskin, J. M. Baskin, D. M. T. Oliveira y Q. S. Garcia. 2019. A function for the pleurogram in physically dormant seeds. *Annals of Botany* 123: 867-876. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcy222>
- Rodríguez, I. F., M. J. Pérez, F. Cattaneo, I. C. Zampini, A. S. Cuello, M. I. Mercado, G. Ponessa y M. I. Isla. 2019. Morphological, histological, chemical and functional characterization of *Prosopis alba* flours of different particle sizes. *Food Chemistry* 274: 583-591. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.024>
- Rodríguez-Sauceda, E. N., G. E. Rojo-Martínez, B. Ramírez-Valverde, R. Martínez-Ruiz, M. C. Cong-Hermida, S. M. Medina-Torres y H. H. Piña-Ruiz. 2014. Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.) en México. *Ra Ximhai* 10(3): 173-193.
- Romero-Hernández, C. 2019. Sinopsis de las especies del género *Abarema* Pittier (Leguminosae: Caesalpinioideae) que crecen en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 43(169): 705-727. DOI: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.793>
- Rubio-Licon, L. E., S. Romero-Rangel, E. C. Rojas-Zenteno, A. Durán-Díaz y J. C. Gutiérrez-Guzmán. 2011. Variación del tamaño de frutos y semillas en siete especies de encino (*Quercus*, Fagaceae). *Polibotánica* 32: 135-151.
- Ruiz-Corral, J. A., S. H. Contreras-Rodríguez, G. E. García-Romero y R. Villavicencio García. 2021. Climas de Jalisco según el sistema Köppen-García con ajuste por vegetación potencial. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12(5): 1-17. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2988>
- Sánchez-Soto, B. H., E. Pacheco-Aispuro, A. Reyes-Olivas, G. A. Lugo-García, P. Casillas-Álvarez y C. P. Saucedo-Acosta. 2016. Ruptura de latencia física de semillas de *Caesalpinia platyloba* S. Watson. *Interciencia* 41(10): 691-695.
- Sandoval Zapotitla, E. 2005. Técnicas aplicadas al estudio de la anatomía vegetal. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Mx., México. 278 pp.
- SAS. 2002. SAS/STAT ver. 9.4 user's Guide. SAS Institute. Cary, USA. https://www.sas.com/es_mx/software/stat.html (consultado julio de 2022).
- Sciammaro, L., C. Ferrero y M. C. Puppo. 2016. Chemical and nutritional properties of different fractions of *Prosopis alba* pods and seeds. *Food Measure* 10: 103-112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11694-015-9282-z>
- Serrato-Valenti, G., M. Ferro y P. Modenesi. 1990. Structural and histochemical changes in palisade cells of *Prosopis juliflora* seed coat in relation to its water permeability. *Annals*



- of Botany 65: 529-532. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087965>
- Sobrevilla-Solís, J. A., M. López-Herrera, A. L. López-Escamilla y L. Romero-Bautista. 2013. Evaluación de diferentes tratamientos pregerminativos y osmóticos en la germinación de semillas de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd) M.C. Johnston. In: Pulido-Flores, G. y S. Monks (eds.). Estudios Científicos en el Estado de Hidalgo y Zonas Aledañas. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca de Soto, México. 146 pp.
- Subramaniam, S., A. K. Pandey y S. A. Rather. 2015. Systematic and adaptive significance of seed morphology in *Crotalaria* L. (Fabaceae). The International Journal of Plant Reproductive Biology 7(2): 135-146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2022.152059>
- Thiers, B. 2021. Index Herbariorum: A Global Directory of Public Herbaria and Associated Staff. New York Botanical Garden's Virtual Herbarium. <http://sweetgum.nybg.org/science/ih/> (consultado noviembre de 2021).
- Turki, Z., F. El-Shayeb y A. Abozeid. 2013. Seed morphology of some *Trigonella* L. species (Fabaceae) and its taxonomic significance. International Journal of Science and Research 3(12): 940-948.
- Ubierno, P. y M. Lapp. 2007. Caracterización morfológica de semillas de algunas especies de los géneros *Cassia* L. y *Senna* Mill. (Leguminosae Juss.). Revista de la Facultad de Agronomía 24(3): 426-441.
- Ulibarri, E. 2008. Los géneros de Caesalpinioideae (Leguminosae) presentes en Sudamérica. Darwiniana 46(1): 69-163.
- Valencia-Díaz, S., A. Flores-Morales, A. Flores-Palacios e I. Perea-Arango. 2015. How does the presence of endosperm affect seed size and germination? Botanical Sciences 93(4): 783-789. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.251>
- Valenzuela, N. L. M., J. C. Ríos, C. Trucíos y S. Rosales. 2011. Diversidad genética en poblaciones naturales de mezquite del norte-centro de México. 1er Simposio Presente y Futuro de los Bosques-Instituto Tecnológico del Salto. El Salto. Durango, México. 6 pp.
- Varela, R. O. y P. L. Albornoz. 2013. Morpho-anatomy, imbibition, viability and germination of the seed of *Anadenanthera colubrina* var. Cabil (Fabaceae). Revista de Biología Tropical 61(3): 1109-1118. DOI: <https://doi.org/10.15517/rbt.v61i3.11907>
- Venier, P., G. Funes y C. Carrizo-García. 2012. Physical dormancy and histological features of seeds of five *Acacia* species (Fabaceae) from xerophytic forest in central Argentina. Flora 207: 39-46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2011.07.017>
- Villarreal-Garza, J. A., A. Rocha-Estrada, M. L. Cárdenas-Ávila, S. Moreno-Limón, M. González-Álvarez y V. Vargas-López. 2013. Caracterización morfológica, viabilidad y germinación de semillas de mezquite y huizache en el noreste de México. Revista Internacional de Botánica Experimental 82: 169-174.
- Villegas-Espinoza, J. A., P. E. O. Rueda, A. B. Murillo, M. E. Puente, E. F. H. Ruiz, S. S. Zamora y F. A. Beltrán-Morales. 2014. Bacterias promotoras de crecimiento de plantas autóctonas y su efecto en *Prosopis chilensis* (Molina) Stunz. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 5(6): 1041-1053.
- Vyas, R. V. y B. A. Jadeja. 2016. Pharmacognostical study of *Prosopis cineraria* (L.) Druse root, stem, leaflet, bark, seed, pod and powder. Pharma Science Monitor 7(4): 125-131.
- Wahba, M. M., F. Labib y A. Zaghoul. 2019. Management of calcareous soils in arid region. International Journal of Environmental & Environmental Modelling 2(5): 248-258.

