

VOLUMEN 14

**NÚMERO 1 JUL-DIC
2019**



**Refrigerios de niños
de educación básica
¿qué alimentos incluyen
sus padres?**

► **61**

**Organogeles como potencial
prometedor en carnes y lácteos**

► **121**

**Propiedades de suelos
cultivados con cacao en Ecuador**

► **155**



Imagen de: Javier González Martínez

Diversidad y caracterización de maíces nativos de la Reserva de la Biósfera “El Cielo”, Tamaulipas, México

Diversity and characterization of native maize from the “El Cielo” Biosphere Reserve, Tamaulipas, Mexico

Javier González-Martínez, Venancio Vanoye-Eligio, Julio Cesar Chacón-Hernández, Mario Rocandio-Rodríguez*

RESUMEN

La diversidad del maíz en México se fundamenta por la presencia de 59 a 64 razas; Tamaulipas como estado productor contribuye a mantener la variabilidad entre razas, especialmente en las regiones aisladas. La reserva de la Biósfera “El Cielo” localizada en una región montañosa, que comprende los municipios de Jaumave, Ocampo, Gómez Farías y Llera de Canales, ha sido escasamente estudiada, a pesar de que existen riesgos de degradación o extinción de poblaciones nativas de maíz, por factores como cambios de uso de suelo y fenómenos naturales. El objetivo de este trabajo fue analizar la diversidad morfológica de poblaciones nativas de maíz de la Reserva de la Biósfera “El Cielo”. Durante los meses de febrero, marzo y abril del 2016, se realizaron recolectas de maíces nativos en los municipios que comprenden la reserva. El tamaño de la muestra varió, entre 20 y 30 mazorcas de cada población, y de estas, se eligieron 10 mazorcas para registrar variables cuantitativas y cualitativas. Se utilizaron los métodos multivariados de análisis de componentes principales y conglomerados. El 62.45 % correspondió a la variación total, la cual fue explicada por los dos primeros componentes principales, y las variables con mayor contribución a la variación fueron longitud de mazorca, número de granos por hilera, peso de mazorca, peso y volumen de 100 granos, diámetro de mazorca y de olote, número de hileras por mazorca y la relación diámetro/longitud de mazorca. En las poblaciones nativas de maíz que aún se cultivan en la Reserva de la Biósfera “El Cielo”, se encontró amplia diversidad morfológica de mazorca, así como variación en la combinación de colores de grano y olote, lo que sugiere que las poblaciones nativas representan un amplio potencial como acervo genético y reservorio de genes.

PALABRAS CLAVE: componentes principales, maíz, poblaciones nativas.

ABSTRACT

The diversity of maize in Mexico is based on the presence of breeds that range from 59 to 64 varieties. Tamaulipas is a corn-producing state that contributes to sustain this enormous variation of breeds, especially in isolated regions. The biosphere ecological reserve “El Cielo” is located in a mountainous region, which comprises Jaumave, Ocampo, Gómez Farías and Llera de Canales municipalities. This region has been scarcely studied in spite of the degradation or extinction risks of native populations of maize due to factors such as changes in land use and natural phenomena. The objective of this work was to analyze the morphologic diversity of native maize varieties of “El Cielo” biosphere ecological reserve. Native maize harvests were collected in the municipalities that comprise the reserve during the months of February, March and April of 2016. The sample size ranged between 20 and 30 cobs of each variety, out of this sample 10 cobs were selected in order to register quantitative and qualitative variables. A multivariate analysis method of main components and conglomerates was used. Results show that 62.45 % of the samples were correspondent with total variation, which was explained by the first two main components. The variables with greater contribution to the variation were cob length, number of grains per row, cob weight, weight and volume of 100 grains, cob diameter, number of rows per cob and the relation of diameter/length in each cob. The native maize populations that are still cultivated at the biosphere ecological reserve “El Cielo” there was a wide morphological diversity of cob, as well as variation in the combination of grain and corncob color. This suggests that native populations possess a substantial potential as a gene pool and gene reservoir.

KEYWORDS: main components, maize, native populations.

*Correspondencia: mrocandio@docentes.uat.edu.mx/ Fecha de recepción: 1 de agosto de 2018/ Fecha de aceptación: 9 de abril de 2019/ Fecha de publicación: 29 de julio de 2019

Universidad Autónoma de Tamaulipas, Instituto de Ecología Aplicada, División del Golfo 356, col. Libertad, Cd. Victoria, Tamaulipas, México, C. P. 87019.

INTRODUCCIÓN

El maíz tiene gran demanda comercial a nivel mundial por sus múltiples usos, tanto en la industria como en el sector pecuario y en la alimentación humana. En gastronomía, se utiliza el grano y el elote para la preparación de platillos muy variados (Diego-Flores y col., 2012).

Una de las ventajas de este cultivo es la enorme diversidad de especies, mismas que se tiene gran interés en conservar, a nivel nacional y mundial a través de bancos de genes (Contreras-Toledo y col., 2018).

Este cultivo tiene el más controvertido origen y, actualmente existen diversas opiniones sobre su posible antecesor. Sin embargo, la mayoría de los genetistas están de acuerdo que el maíz se deriva del *teocintle*, por su gran parentesco cromosómico, de planta y su facilidad de entrecruzamiento. La presencia de parientes silvestres como *teocintle* y *Tripsacum* (Bird, 1978; Matsuoka y col., 2002) y, los registros históricos sobre la primera domesticación, que la sitúan entre los 6 000 y 10 000 años de antigüedad en el suroeste de México (Mangelsdorf y col., 1967; Pérez y col., 2017); así como la existencia aproximada de 59 a 64 razas (Sánchez y col., 2000), son algunos de los factores que han permitido que Mesoamérica y principalmente México, sean consideradas centros de origen, domesticación y diversificación de este cultivo (Hastorf, 2009; Sierra-Macías y col., 2016; Contreras-Toledo y col., 2018).

En este sentido, los procesos organizados, tanto biológicos como antropocéntricos, además de la selección y adaptación, a través de regiones, condiciones socioeconómicas y biotipos ecológicos diferentes, han generado distintas combinaciones que incrementan la diversidad de maíz (Pérez y col., 2017). Esta diversidad de razas de maíz, conserva, utiliza y sostiene la alimentación básica de México (Kato y col., 2009), lo que indica que las poblaciones nativas son los principales actores de la lógica campesina del país. Lo cual da como resultado que los maíces nati-

vos se seleccionen, produzcan, conserven, diversifiquen y domestiquen en base en las necesidades de los habitantes rurales (Escalante y Trigo, 2018).

Las razas Celaya, Chalqueño y Tuxpeño, destacan por su alta capacidad productiva y forman parte del germoplasma que soporta parte de la producción alimentaria a nivel mundial. Sin embargo, la erosión de la diversidad genética *in situ*, en ciertas regiones del país, ha impactado en estas razas (Bedoya-Salazar y col., 2017). La preocupación de que esto suceda ha dado lugar a múltiples investigaciones, destinadas a describir y comprender los factores que influyen en la diversidad de las poblaciones de maíz de los agricultores mexicanos (Rocandio-Rodríguez y col., 2014).

Tamaulipas se encuentra localizado en el noreste de México y está constituido por 43 municipios, de los cuales, 37 se consideran productores de maíz (Cantú y col., 2010). Distintos estudios han señalado que el maíz nativo de Tamaulipas predomina por su capacidad de adaptación a condiciones agroclimáticas adversas, amplia diversidad genética y características agronómicas sobresalientes (precocidad), además de presentar estabilidad en diferentes ambientes (Reséndiz y col., 2014). Se ha reportado que los municipios de Llera, Hidalgo, Nuevo Morelos y Tula, situados en el centro y sur del estado, destacan por su diversidad y distribución de maíz nativo; con la presencia de las razas Tuxpeño, Tuxpeño Norteño, Ratón, Olotillo y Cónico Norteño (Reséndiz y col., 2014; González-Martínez y col., 2018).

La Reserva de la Biósfera “El Cielo”, forma parte de los municipios de Llera, Gómez Farías, Jaumave y Ocampo. En ella existe diversidad morfológica de maíces locales y la presencia de *Tripsacum*, ambos factores son evidencias botánicas y arqueológicas que han contribuido a definirla como parte del área filogeográfica de origen y domesticación del maíz (MacNeish, 1958; Smith, 1997). Uno de los problemas en el pasado de la región montaño-

sa del estado de Tamaulipas, era su restringido acceso, lo que en años recientes se ha solucionado, debido a que ahora se ubica la Reserva de la Biósfera “El Cielo”, la cual, brinda la oportunidad de evaluar la diversidad de maíz nativo desarrollado, mantenido y aprovechado en dicho lugar. Sin embargo, se requiere de información actualizada de su estado de conservación, ya que la diversidad del germoplasma de maíz fue estudiada a fines del siglo pasado (Ortega y col., 1991).

El objetivo de este trabajo fue analizar la diversidad morfológica de las poblaciones nativas de maíz de la Reserva de la Biósfera “El Cielo”, Tamaulipas, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectaron 44 poblaciones nativas de maíz (Tabla 1) durante febrero, marzo y abril de 2016, en los municipios que comprenden la Reserva de la Biósfera “El Cielo”, la cual, es considerada como parte del área central de

■ **Tabla 1. Datos pasaporte de las 44 poblaciones nativas de maíz.**

Table 1. Passport data of 44 native maize populations.

Recolecta	Donador	Municipio	Altitud (m)	Latitud N	Longitud W
IEA-1	Norma Bolaños	Gómez Farías	920	23.0615306	- 99.1995111
IEA-2	Adelfo Serrano	Gómez Farías	940	23.0597167	- 99.1984611
IEA-3	Adelfo Serrano	Gómez Farías	920	23.0580806	- 99.1967528
IEA-4	Cruz Rodríguez	Gómez Farías	350	22.8837389	- 99.0248444
IEA-5	Rosalio Solís	Gómez Farías	922	23.05525	- 99.1975833
IEA-6	Víctor Berrones	Gómez Farías	922	23.0579972	- 99.1956472
IEA-7	Cipriano Arvizu	Gómez Farías	160	22.9854583	- 99.13035
IEA-8	Lino Arvizu	Gómez Farías	160	22.9831528	- 99.1273917
IEA-9	Lino Arvizu	Gómez Farías	160	22.9860278	- 99.1326139
IEA-10	Elías Esquivel	Gómez Farías	402	24.3090611	- 99.5091611
IEA-11	Ignacio Esquivel	Gómez Farías	403	24.3091278	- 99.5108944
IEA-12	Norma Solís	Jaumave	770	23.4493444	- 99.35385
IEA-13	Arón Velázquez	Jaumave	1 202	23.0636389	- 99.4718889
IEA-14	Arón Velázquez	Ocampo	1 202	23.0629639	- 99.4710306
IEA-15	Saúl Velázquez	Ocampo	1 202	23.0622639	- 99.4740167
IEA-16	Mariano Velázquez	Ocampo	1 202	23.0648139	- 99.4733861
IEA-17	Guadalupe Velázquez	Ocampo	1 167	23.0608417	- 99.4733444
IEA-18	Silverio Velázquez	Ocampo	1 211	23.0620583	- 99.4751611
IEA-19	Pedro Velázquez	Ocampo	1 211	23.0637583	- 99.4742139
IEA-20	Pedro Velázquez	Ocampo	1 211	23.0622556	- 99.4729139
IEA-21	Mariano Velázquez	Ocampo	1 257	23.0631278	- 99.4746611
IEA-22	Juan Velázquez	Ocampo	1 207	23.062825	- 99.4739528
IEA-23	Silvino Velázquez	Ocampo	1 213	23.06415	- 99.4735472
IEA-24	Manuel Velázquez	Ocampo	1 213	23.0627917	- 99.4749889
IEA-25	Manuel Velázquez	Ocampo	1 213	23.0638389	- 99.4727806
IEA-26	Severiano Martínez	Jaumave	1 027	23.1078806	- 99.46225
IEA-27	Isidro Mureño	Jaumave	681	23.4495972	- 99.33945
IEA-28	Bernardo Castillo	Jaumave	820	23.3705111	- 99.405425
IEA-29	Cipriano Rico	Jaumave	629	23.4783861	- 99.3093222
IEA-30	Benito Contreras	Jaumave	629	23.4765944	- 99.3089972
IEA-31	Juan José Rodríguez	Jaumave	643	23.4232083	- 99.3152056
IEA-32	Alfonso Reyes	Jaumave	686	23.4507056	- 99.3382694
IEA-33	Anacleto Ibarra	Jaumave	686	23.4485722	- 99.3404972
IEA-34	Román Moreno	Jaumave	704	23.4493444	- 99.35385

Continúa...

IEA-35	Marcos Castañez	Jaumave	620	23.4654833	- 99.3039639
IEA-36	Xenón Ibarra	Jaumave	622	23.4633333	- 99.3029667
IEA-37	Alberto Martínez	Jaumave	701	23.4704278	- 99.3440694
IEA-38	Agustín Márquez	Jaumave	755	23.4166139	- 99.3833083
IEA-39	Francisco Reyes	Jaumave	755	23.4164472	- 99.3834833
IEA-40	Juan Gallardo	Jaumave	847	23.3481139	- 99.4241333
IEA-41	Juan Gallardo	Jaumave	853	23.3486722	- 99.4276222
IEA-42	Martín Grimaldo	Jaumave	624	23.4653778	- 99.30265
IEA-43	José Leonel Tinajero	Jaumave	645	23.4235944	- 99.3141972
IEA-44	Hermelindo Juárez	Jaumave	645	23.4239278	- 99.3159778

IEA = Instituto de Ecología Aplicada (clave interna de identificación de recolectas en el banco de germoplasma).

diversidad genética de maíces nativos y parientes silvestres en el estado de Tamaulipas (Mangelsdorf y col., 1967). Cada recolecta fue definida con base en el número de mazorcas proporcionadas por el productor (entre 20 y 30) para después recabar antecedentes como coordenadas geográficas del sitio (expresadas en grados decimales), características y condiciones sobre el manejo del cultivo, así como el nombre del agricultor, entre otros (datos pasaporte) (Taba, 1999).

Variables evaluadas

Para la caracterización morfológica, se midieron 10 mazorcas representativas de cada recolecta, en las cuales, se midieron las variables cuantitativas: longitud de mazorca (LM), medida en cm, con un estadal registrado, desde la base de la mazorca hasta el ápice de la misma; diámetro de mazorca (DM), se tomó como el grosor de la mazorca en la parte central, medido con vernier digital (Mitutoyo, Modelo CD-8"AX, Kanagawa Japón) y expresado en cm; número de hileras (NH), contabilizados en la parte central de cada mazorca muestreada, se obtuvo el promedio; número de granos (NG), estos fueron medidos en una hilera representativa de cada mazorca muestreada tomándose el promedio; peso de mazorca (PM), se obtuvo de cada una de las mazorcas muestreadas de cada recolecta, y se registró el peso seco de las mismas, expresado en gramos; diámetro de olate (DO), se tomó como el grosor del olate en la parte central, medido con vernier y expresado en cm; se eligieron 10 granos de la parte media de cada mazorca muestreada

para medirles en mm longitud de grano (LG), ancho de grano (AG) y grosor de grano (GG), documentando el promedio de los 10 granos; con los datos obtenidos se estimaron las relaciones diámetro de mazorca/longitud de mazorca (DM/LM), ancho de grano/longitud de grano (AG/LG), grosor de grano/longitud de grano (GG/LG). Así mismo, se formó una muestra con 100 granos de las 10 mazorcas muestreadas y se obtuvo su peso (P100G) en gramos, los mismos 100 granos se colocaron en una probeta y se registró el volumen (V100G) en mm. Y de acuerdo con el descriptor para maíz (IBPGR, 1991), se documentaron las variables cualitativas: disposición de hileras de mazorca (DHM), tipo de grano (TG), color de grano (CG), color de olate (CO) y forma de mazorca (FM) (Tabla 2).

Análisis estadístico

Se obtuvo la estructura de la correlación de cada población (recolecta) y las variables morfológicas con el Análisis de Componentes Principales (ACP) (Rawlings, 1988). La estimación del número ideal de agrupaciones se definió con base en el método no paramétrico de agrupación MODECLUS y, se realizó el análisis de conglomerados con la matriz de distancias euclidianas y el método de agrupamiento de mínima varianza dentro de grupos de Ward. Todos los análisis estadísticos fueron efectuados en SAS V.9.0 (SAS, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En Jaumave se ubicó el 48 % de las 44 recolectas de poblaciones nativas de maíz, dentro

■ Tabla 2. Variables cualitativas de las 44 poblaciones nativas de maíz.

Table 2. Qualitative variables of 44 native maize populations.

Recolecta	FM	DHM	TG	CG	CO	Recolecta	FM	DHM	TG	CG	CO
IEA-1	3	1	2	4	1	IEA-23	3	3	4	3	1
IEA-2	3	1	3	2	1	IEA-24	3	3	4	3	1
IEA-3	3	3	3	3	1	IEA-25	2	3	4	3	1
IEA-4	2	1	4	5	8	IEA-26	3	3	4	3	8
IEA-5	3	3	4	5	1	IEA-27	3	3	6	3	1
IEA-6	3	1	2	4	1	IEA-28	3	3	2	3	1
IEA-7	3	1	4	2	8	IEA-29	3	3	3	2	1
IEA-8	3	1	4	2	8	IEA-30	3	3	3	10	8
IEA-9	3	3	3	2	1	IEA-31	2	3	3	2	8
IEA-10	2	3	4	2	1	IEA-32	3	3	4	4	1
IEA-11	3	3	4	2	1	IEA-33	3	3	2	8	8
IEA-12	3	1	4	2	8	IEA-34	3	3	4	2	1
IEA-13	3	3	2	3	1	IEA-35	3	3	3	2	1
IEA-14	3	3	2	5	1	IEA-36	3	3	4	2	1
IEA-15	3	3	4	3	8	IEA-37	3	3	3	2	1
IEA-16	3	3	3	6	1	IEA-38	3	3	3	2	8
IEA-17	3	3	3	2	1	IEA-39	3	3	3	2	1
IEA-18	3	3	4	3	1	IEA-40	3	1	3	2	1
IEA-19	3	3	4	2	1	IEA-41	3	3	3	2	1
IEA-20	3	3	4	3	1	IEA-42	3	3	4	2	1
IEA-21	3	3	4	5	5	IEA-43	3	3	4	2	1
IEA-22	2	3	2	5	1	IEA-44	2	3	4	2	1

FM = forma de mazorca: 1 = cónica, 2 = cónica-cilíndrica, 3 = cilíndrica. DHM = disposición de hileras de mazorca: 1 = regular, 2 = irregular, 3 = recta, 4 = espiral. TG = tipo de grano: 1 = harinoso, 2 = dentado, 3 = semi-dentado, 4 = semi-cristalino, 5 = cristalino, 6 = reventador, 7 = dulce, 8 = ceroso, 9 = semi-harinoso. CG = color de grano: 1 = blanco, 2 = blanco cremoso, 3 = amarillo claro, 4 = amarillo medio, 5 = amarillo naranja, 6 = naranja, 7 = rojo naranja, 8 = rojo, 9 = rojo oscuro, 10 = azul, 11 = azul oscuro, 12 = negro, 13 = café. CO = color de olote: misma escala que los colores de grano.

de la zona de la Reserva de la Biósfera “El Cielo”, Tamaulipas, por lo que se consideró como el municipio con mayor distribución de maíces nativos, seguido de Ocampo 27 % y Gómez Farías 25 %. Se obtuvo una mayor frecuencia de recolectas (30) en las zonas de altitudes bajas (< 1 000 msnm) con respecto a las poblaciones localizadas (14) en altitudes intermedias (1 001 msnm a 1 800 msnm) en una relación ~2:1. Los maíces presentaron diferencia significativa ($P < 0.05$) en 8 de los 14 parámetros evaluados (57.14 %), encontrándose poca variabilidad entre los maíces muestreados en Gómez Farías y Jaumave, pero estos fueron diferentes a los obtenidos de Ocampo (Tabla 3). Lo anterior po-

dría deberse a que, en los primeros dos municipios, los agricultores tuvieran una relación de intercambio de semillas, pese a que la distancia entre Gómez Farías y Jaumave es mayor que la distancia entre Gómez Farías y Ocampo. Otro factor que puede estar influyendo es la condición de altitud similar en las que se encontraron las recolectas en los municipios mencionados con respecto a Ocampo (Diego-Flores y col., 2012; Rocandio-Ramírez y col., 2014) (Tablas 1 y 3).

Análisis de componentes principales

Los valores y vectores del análisis de los 3 primeros componentes principales (CP) muestran que el CP1 explicó el 30.58 %, el CP2

■ Tabla 3. Cuadrados medios y significancia estadística del análisis de varianza entre los municipios de Gómez Farías, Jaumave y Ocampo de 44 poblaciones nativas de maíz.

Table 3. Mean squares and statistical significance of the analysis of variance between 44 native populations of maize in Gómez Farías, Jaumave and Ocampo municipalities.

Variable	Poblaciones	Municipios	Gómez Farías	Jaumave	Ocampo	CV
LM (cm)	11.49 **	74.03 **	15.47 b	15.52 b	19.62 a	11.68
DM (cm)	0.84 **	0.57 *	4.00 a	4.23 a	3.86 b	10.83
NH	10.71 **	0.032 **	11.23 ab	12.09 a	10.15 b	11.20
NG	86.05 **	14.46 **	38.78 b	38.30 b	49.66 a	12.70
PM (g)	2479 **	547.99 *	146.65 ab	138.80 b	181.00 a	29.20
DO (cm)	0.64 **	7 032.38 **	2.15 ab	2.35 a	1.75 b	21.52
LG (mm)	3.47 **	1.37 ns	12.06 a	12.61 a	13.06 a	10.79
AG (mm)	0.004 2 **	2.89 ns	9.21 a	9.38 a	9.74 a	9.14
GG (mm)	0.05 **	0.84 ns	3.80 a	3.84 a	3.70 a	12.33
DM/LM	0.0031 **	0.074 **	0.27 a	0.29 a	0.20 b	16.89
AG/LG	0.013 **	0.000 6 ns	0.76 a	0.75 a	0.75 a	11.85
GG/LG	0.003 4 **	0.008 7 ns	0.32 a	0.32 a	0.28 a	31.31
P100G (g)	35.93 **	120.94 *	31.70 a	29.52 b	35.15 a	20.87
V100G (g)	5.63 **	192.45 ns	45.72 a	44.85 a	51.70 a	21.01

^{ab}Promedios con distinta literal por columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$); LM: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; NH: número de hileras por mazorca; NG: número de granos por hilera de mazorca; PM: peso de mazorca; DO: diámetro de olote; LG: longitud de grano; AG: ancho de grano; GG: grosor de grano; DM/LM: diámetro de mazorca/longitud de mazorca; AG/LG: ancho de grano/longitud de grano; GG/LG: grosor de grano/longitud de grano; P100G: peso de 100 granos; V100G: volumen de 100 granos.

19.78 % y el CP3 12.09 %, dando como resultado la explicación, en forma acumulada, del 62.45 % de la variación total (Tabla 4). Con base en el valor de sus vectores, las variables de mayor importancia en el CP1, fueron LM, NG, PM, LG, P100G y V100G, lo cual permite identificar poblaciones nativas con los componentes de rendimiento de grano mayores. Mientras que para el CP2, lo definieron variables de DM, DO, NH y DM/LM, asociadas con la morfología de los maíces. En tanto que, en el CP3, las características de GG y la relación de AG/LG y GG/LG, asociadas a la morfología del grano, fueron las más destacables.

Con base al análisis MODECLUS, cuya definición se basó en un radio de la hiper-esfera de exploración $R = 0.9$ (SAS, 2002), se identificaron 5 grupos poblacionales distintos. La dispersión de las poblaciones muestra un continuo, distribuyéndose a lo largo y ancho

de la Figura 1. Así mismo, las recolectas 2, 3, 4, 8, 10, 11, 12, 14, 20, 25, 27, 30, 31 y 40 no fueron asociadas a ningún grupo poblacional. Estos resultados indican la amplia diversidad que existe en los maíces nativos, distribuidos en la reserva de “El Cielo” (Flores-Pérez y col., 2015; Pecina-Martínez y col., 2009).

El Grupo 1, se integró por 14 poblaciones de Jaumave y 4 de Gómez Farías (Figura 1); el total de las poblaciones fueron provenientes de altitudes bajas ($< 1\,000$ m) Tabla 1; cabe destacar que este grupo mostró la mayor variación y heterogeneidad. Además, se observó que las variables de mayor importancia en su asociación y distribución fueron la relación DM/LM, NH, DO y DM. Con FM c cristalino en su gran mayoría, TG semi-cristalino, dentado y semi-dentado, y de CG blanco cremoso, principalmente (Tabla 2).

■ Tabla 4. Valores y vectores propios de los tres primeros componentes principales (CP) que describen la variación morfológica de mazorca de las 44 poblaciones nativas de maíz.

Table 4. Values and eigenvectors of the first three main components (CP) that describe the morphological variation of each of the 44 native maize populations.

Variables	CP1	CP2	CP3
LM (cm)	0.370	- 0.146	0.084
DM (cm)	0.153	0.458	- 0.098
DM/LM	- 0.228	0.368	- 0.097
NH	- 0.135	0.371	- 0.217
NG	0.312	0.269	- 0.062
PM (g)	0.383	0.099	- 0.062
DO (cm)	- 0.079	0.405	0.035
LG (mm)	0.309	0.130	- 0.261
AG (mm)	0.283	0.076	0.317
GG (mm)	- 0.001	0.282	0.423
AG/LG	- 0.090	- 0.053	0.560
GG/LG	- 0.142	0.122	0.418
P100G (g)	0.344	0.145	0.136
V100G (g)	0.347	0.182	0.139
FM	0.115	0.109	- 0.155
DHM	0.075	- 0.140	0.006
TG	- 0.159	- 0.187	0.079
CG	0.133	- 0.037	0.028
CO	- 0.106	- 0.066	- 0.101
Valor propio	5.81	3.79	2.29
Varianza explicada (%)	30.58	19.78	12.09
Varianza acumulada (%)	30.58	50.36	62.45

LM: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; NH: número de hileras por mazorca; NG: número de granos por hilera de mazorca; PM: peso de mazorca; DO: diámetro de olote; LG: longitud de grano; AG: ancho de grano; GG: grosor de grano; DM/LM: diámetro de mazorca/longitud de mazorca; AG/LG: ancho de grano/longitud de grano; GG/LG: grosor de grano/longitud de grano; P100G: peso de 100 granos; V100G: volumen de 100 granos; DHM: disposición de hileras de mazorca; TG: tipo de grano; CG: color de grano; CO: color de olote; FM: forma de mazorca.

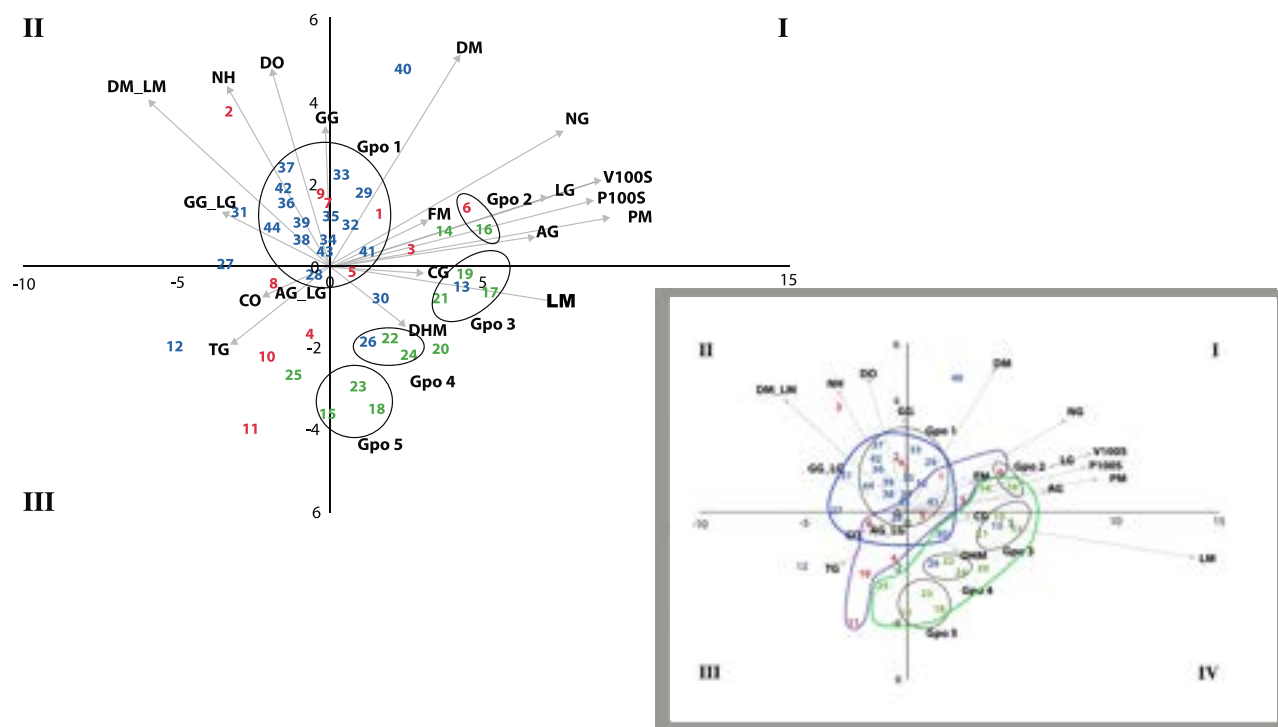
El Grupo 2, se conformó con 2 poblaciones (Figura 1), que fueron las de mayor TG, de las cuales, una procede de altitudes bajas (< 1 000 m) del municipio de Gómez Farías, y la otra de Ocampo, de altitudes intermedias (1 001 m a 1 800 m) (Tabla 1). Con FM cónica-cilíndrica, TG dentado y semi-dentado, así como CG naranja y amarillo medio (Tabla 2).

El Grupo 3, se integró con 3 poblaciones de Ocampo y 1 de Jaumave (Figura 1), pertenecientes a altitudes intermedias (1 001 m a 1 800 m) (Tabla 1). Este grupo mostró mayor

FM cilíndrica, de grano dentado, semi-dentado y semi-cristalino y CG amarillo claro, blanco cremoso y amarillo naranja (Tabla 2).

El Grupo 4, se conformó con 2 poblaciones de Ocampo y 1 de Jaumave (Figura 1); el total de las poblaciones se encontraron en altitudes intermedias (1 001 m a 1 800 m) (Tabla 1). Con FM cónica-cilíndrica y cilíndrica, TG dentado, y un CG amarillo-naranja y amarillo claro (Tabla 2).

El Grupo 5, se formó con 3 poblaciones de Ocampo (Figura 1), donde el total de las po-



■ Figura 1. Dispersión de las 44 poblaciones nativas de maíz.

Figure 1. Dispersion of 44 native maize populations.

blaciones se encontraron en altitudes intermedias (1 001 m a 1 800 m) (Tabla 1). Con FM cilíndrica, TG semi-cristalino y CG amarillo claro (Tabla 2).

Es importante observar que las poblaciones muestreadas en Ocampo se ubican hacia fuera en los cuadrantes IV, I y III, en tanto que las poblaciones de Jaumave tienden a ubicarse más hacia el centro, en el cuadrante II y I. Las poblaciones de Gómez Farías se ubican principalmente en un sitio intermedio de las otras dos poblaciones.

Análisis de conglomerados

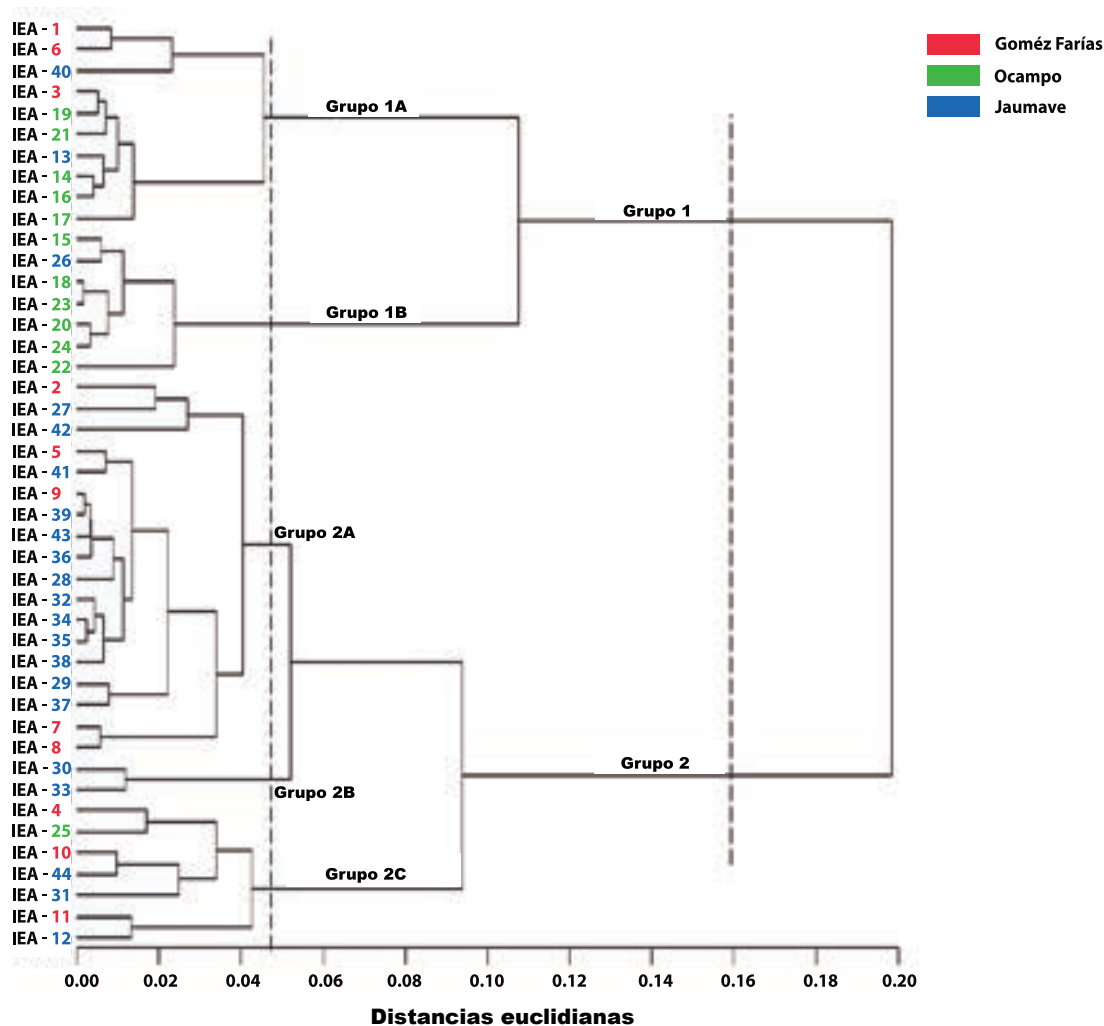
El agrupamiento con base en los CP (Figura 1) concordó con el análisis de conglomerados (Figura 2), donde se puede apreciar que a una distancia euclidiana de 0.16 unidades, separa a las poblaciones en 2 grandes grupos; estos a su vez a una distancia euclidiana de 0.05 unidades definieron 5 sub-grupos. La separación dentro de los Grupos 1 y 2, se asoció al origen geográfico. En el grupo I, se ubicaron la mayoría de las poblaciones de

Ocampo, y en el grupo 2, las de Jaumave. La morfología de grano suele influir en este tipo de agrupamiento (Hortelano y col., 2012).

El grupo 1A se conformó por 5 de Ocampo, 3 de Gómez Farías y 2 de Jaumave (Figura 1); tuvo los mayores promedios de PM (215.13 g), AG (10.46 mm), P100G (40.60 g) y V100G (60.60 mm) (Tabla 5). Dichas poblaciones mostraron mazorcas cilíndricas, DH rectas, TG semi-dentado y CG blanco cremoso como rasgos característicos (Tabla 2).

Por su parte, el grupo 1B se formó por 6 poblaciones, pertenecientes al municipio de Ocampo y 1 de Jaumave (Figura 2); este conglomerado mostró los menores promedios de NH (10.24), DO (1.56 mm) y GG (3.22 mm) (Tabla 5). Por otra parte, sus mazorcas fueron cilíndricas, DH rectas, TG semicristalino y CG amarillo claro (Tabla 2).

El grupo 2A, relacionó 18 poblaciones, 13 de Jaumave y 5 de Gómez Farías; presentó los más altos promedios de DM/LM (0.30), y se



■ Figura 2. Dendrograma de las 44 poblaciones nativas de maíz. Construido mediante el método de WARD.

Figure 2. Dendrogram of 44 native maize populations. Built using the WARD.

caracterizó por presentar mazorcas cilíndricas, DH rectas, TG semi-cristalino y CG blanco cremoso.

El grupo 2B se integró únicamente por 2 poblaciones, ambas originarias de Jaumave (Figura 1); este conglomerado mostró los mayores promedios en DM (4.50), NH (12.80) y DO (2.45) (Tabla 5); presentó mazorcas cilíndricas, DH rectas, TG semi-dentado y CG blanco cremoso (Tabla 2).

Por su parte, el grupo 2C se conformó por 7 poblaciones, una procedente de Ocampo, 3 de Gómez Farías y 3 de Jaumave (Figura 1); cabe resaltar que este grupo mostró los valores

más bajos de LM (14.4 cm), PM (89.00 g), LG (10.84 mm), AG (8.88 mm), P100G (24.02 g) y V100G (36.28 mm) (Tabla 5). La descripción morfológica obtenida permite inferir que estas poblaciones pudieran pertenecer a las razas Tuxpeño, Vandeno, Cónico u Olotillo (Wellhausen y col., 1952) (Tabla 6). Sin embargo, un análisis molecular podría corroborar la existencia de las razas mencionadas.

La diversidad racial y variación morfológica de las poblaciones locales de maíz podría estar asociada a criterios de selección, uso de sistemas de producción, intercambio de semilla entre los agricultores, y la influencia de la interacción ecológica, representada por

■ Tabla 5. Promedios de grupos y subgrupos del dendrograma donde se incluyeron 14 variables cuantitativas, así como 44 poblaciones de maíz nativo.

Table 5. Averages of groups and subgroups of the dendrogram where 14 quantitative variables were included, as well as 44 populations of native maize.

Variable	Grupos		Grupos				
	1	2	1A	1B	2A	2B	2C
LM (cm)	19.30	14.94	19.68	18.77	15.05	15.85	14.41
DM (cm)	4.08	4.07	4.39	3.66	4.24	4.50	3.50
NH	10.49	11.88	10.67	10.24	12.31	12.80	10.52
NG	48.52	37.11	46.35	51.64	36.98	40.20	36.55
PM (g)	192.28	127.08	215.13	159.63	137.64	165.30	89.00
DO (cm)	1.94	2.25	2.20	1.56	2.28	2.45	2.13
LG (mm)	13.46	12.05	13.51	13.40	12.41	13.15	10.84
AG (mm)	9.90	9.14	10.46	9.11	9.27	8.95	8.88
GG (mm)	3.70	3.85	4.04	3.22	3.88	3.70	3.82
DM/LM	0.21	0.28	0.23	0.20	0.30	0.25	0.25
AG/LG	0.76	0.73	0.78	0.67	0.75	0.70	0.81
GG/LG	0.27	0.34	0.30	0.22	0.34	0.30	0.35
P100G (g)	36.29	28.65	40.60	30.05	30.34	29.60	24.02
V100G (g)	53.88	42.59	60.60	44.28	44.94	43.50	36.28

LM: longitud de mazorca; DM: diámetro de mazorca; NH: número de hileras por mazorca; NG: número de granos por hilera de mazorca; PM: peso de mazorca; DO: diámetro de olote; LG: longitud de grano; AG: ancho de grano; GG: grosor de grano; DM/LM: diámetro de mazorca/longitud de mazorca; AG/LG: ancho de grano/longitud de grano; GG/LG: grosor de grano/longitud de grano; P100G: peso de 100 granos; V100G: volumen de 100 granos.

■ Tabla 6. Promedios de las características más representativas de las razas Tuxpeño, Vandeño, Cónico, Olotillo y Chalqueño (Wellhausen y col., 1952).

Table 6. Averages the most representative characteristics of races Tuxpeño, Vandeño, Cónico, Olotillo y Chalqueño (Wellhausen y col., 1952).

Características	Razas				
	Tuxpeño	Vandeño	Cónico	Olotillo	Chalqueño
LM (cm)	19.7	17.2	13	19.8	16
DM (cm)	4.6	5.3	4.24	3.63	5.1
NH	12	14	16	8	16
NG	56	44	34	45	47
DO (cm)	2.65	3.23	1.9	2.1-2.4	2.8
LG (mm)	12.8	13.9	14.8	11.7	15.4
AG (mm)	9.3	9.1	7.5	10.8	7.2
GG (mm)	3.7	3.6	3.9	3.9	3.9
FM	Cilíndrica	Cilíndrica	Cónica	Cilíndrica	Cónica
DHM	Recta	Recta	Regular	Recta	Regular
TG	Semi-dentado	Dentado	Semi-dentado	Semi-harinoso	Semi-cristalino
CG	Blanco	Blanco	Blanco	Blanco	Blanco
CO	Blanco	Blanco	Blanco	Rojo-Blanco	Blanco

factores como altitud y aislamiento geográfico (Reséndiz y col., 2014). En consecuencia, las poblaciones nativas de Tamaulipas exhiben una amplia diversidad de componentes de rendimiento de grano, por lo que su variación genética puede ser aprovechada en la producción de este (Pecina y col., 2011). Además, de que el conocimiento de dicha variación permitiría implementar métodos de mejoramiento participativo (Hortelano y col., 2012; Flores-Pérez y col., 2015), en términos de uso de la variabilidad de las razas Tuxpeño, Cónico y Chalqueño (Tabla 6).

CONCLUSIONES

Se encontró una amplia variación de maíces en los municipios de Jaumave y Ocampo, tanto en las características de mazorca como de grano. Los maíces nativos mostraron una ten-

dencia hacia colores de grano blanco-cremoso y amarillo-claro, con granos semi-dentados y semi-cristalinos, así como mazorcas cilíndricas. La altitud y el aislamiento geográfico parecieron influir en la diversidad morfológica encontrada entre municipios. Las poblaciones de maíz nativo que se siembran en los municipios que comprenden la Reserva de la Biósfera “El Cielo”, representan un amplio potencial como acervo genético, que pudiera servir como base en programas de selección recurrente, para mejoramiento participativo con agricultores.

AGRADECIMIENTOS

Al apoyo económico otorgado a través del proyecto de Investigación PFI2015-05 de la Universidad Autónoma de Tamaulipas.

REFERENCIAS

- Bedoya-Salazar, C. A., Dreisigacker, S., Hearne, S., Franco, J., Mir, C., Prasanna, B. M., and Warburton, M. L. (2017). Genetic diversity and population structure of native maize populations in Latin America and the Caribbean. *PLOS ONE*. 12(4): e0173488.
- Bird, R. M. (1978). A name change for Central American teosinte. *Taxon*. 27(4): 361-363.
- Cantú, A. M. A., Reyes, M. C. A. y Rodríguez, B., L. A. (2010). *La fecha de siembra: Una alternativa para incrementar la producción de maíz*. Folleto Técnico 44. México. CERIB-CIRNE-INIFAP. 40 Pp.
- Contreras-Toledo, A. R., Cortés-Cruz, M. A., Costich, D., Rico-Arce, M. de L., Brehm, J. M., and Maxted, N. (2018). A Crop Wild Relative Inventory for Mexico. *Crop Science*. 58(3): 1292-1305.
- Diego-Flores, P., Carrillo-Rodríguez, J. C., Chávez-Servia, J. L. y Castillo-González, F. (2012). Variabilidad en poblaciones de maíz nativo de la Mixteca Baja Oaxaqueña, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 44(1): 157-171.
- Escalante, L. N. y Trigo, Y. C. M. (2018). Campesinos maiceros en Tlaxcala: viabilidad, caracterización y respuestas ante el maíz transgénico. *Sociedad y Ambiente*. 16(6): 179-206.
- Flores-Pérez, L. P. A. López, A. Gil-Muñoz, A. Santacruz-Varela, y Chávez-Servia, J. L. (2015). Variación Intra-Racial de Maíces Nativos del Altiplano de Puebla, México. *Revista FCA UNCUIYO*. 47(1): 1-17.
- González-Martínez, J., Rocandio-Rodríguez, M. Chacón-Hernández, J. C., Vanoye-Eligio, V. y Moreno-Ramírez, Y. D. R. (2018). Distribución y Diversidad de Maíces Nativos (*Zea mays* L.) en el Altiplano de Tamaulipas, México. *Agroproductividad*. 11(1): 124-130.
- Hastorf, C. A. (2009). Río Balsas most likely region for maize domestication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 106(13): 4957-4958.
- Hortelano, S. R., Gil, A. M., Santacruz, V. A., López, S. H., López, P. A. y Miranda, C. S. (2012). Diversidad fenotípica de maíces nativos del altiplano centro-oriente del estado de Puebla, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 35(2): 97-109.
- IBPGR, International Board for Plant Genetic Resources (1991). *Descriptors for Maize*. International Maize and Wheat Improvement Center, Mexico City/International Board for Plant Genetic Resources, Rome. 87 Pp.
- Kato, T. A., Mapes, C., Mera, L. M., Serratos, J. y Bye, A. (2009). *Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica*. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. 116 Pp.

- MacNeish, R. S. (1958). Preliminary archaeological investigations in the Sierra de Tamaulipas, Mexico. *Transactions of the American Philosophical Society*. 48(6): 1-210.
- Mangelsdorf, P. C., MacNeish, R. S., and Galinat, W. C. (1967). Prehistoric maize, teosinte and *Tripsacum* from Tamaulipas, Mexico. Botanical Museum Leaflets. *Harvard University*. 22(2): 33-63.
- Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M. M., Sanchez, G. J., Buckler, E., and Doebley, J. (2002). A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 99(9): 6080-6084.
- Miranda, C. S. (1977). Evolución de cuatro caracteres del maíz (*Zea mays* L.). *Agrociencia*. (28): 73-88.
- Ortega, P. R. A., Sánchez, G. J. J., Castillo, G. F. y Hernández, C. J. M. (1991). Estado actual de los estudios sobre maíces nativos en México. En P. R. A., Ortega, H. G., Palomino, G. F., Castillo, H. A. González, y M. M. Livera, (Eds.). *Avances en el estudio de los recursos fitogenéticos de México*. (pp. 161-185). México: SOMEFI.
- Pecina-Martínez, J. A., Mendoza-Castillo, M. del C., López-Santillán, J. A., Castillo-González, F. y Mendoza-Rodríguez, M. (2009). Respuesta morfológica y fenológica de maíces nativos de Tamaulipas a ambientes contrastantes de México. *Agrociencia*. 43(7): 681-694.
- Pecina, M. J. A., Mendoza C. M. C., López, S. J. A., Castillo, G. F., Mendoza, R. M. y Ortiz, C. J. (2011). Rendimiento de grano y sus componentes en maíces nativos de Tamaulipas evaluados en ambientes contrastantes. *Revista Fitotecnica Mexicana*. 34(2): 85-92.
- Pérez, D. C. Q., Herrera, J. C., Escalante, L. N. y del Valle J. M. Z. (2017). Maíz: Sustento de vida en la cultura Teenek. Comunidad Tamaletom, Tancanhuitz, SLP., México. *Revista de Geografía Agrícola*. (58): 5-19.
- Rawlings, O. J. (1988). *Applied Regression Analysis: A Research Tool*. Wadsworth and Brooks/Cole. Advanced Books and Software. Pacific Grove, California. 553 Pp.
- Reséndiz, R. Z., López, S. J. A., Briones, E. F., Mendoza, C. Ma. del C. y Varela, F. S. E. (2014). Situación Actual de los Sistemas de Producción de Grano de Maíz en Tamaulipas, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. 82(62): 70-78.
- Rocandio-Rodríguez, M., Santacruz-Varela, A., Córdova-Tellez, L., López-Sánchez, H., Castillo-González, F., Lobato-Ortiz, R. y Ortega-Paczka, R. (2014). Caracterización morfológica y agronómica de siete razas de maíz de Los Valles Altos de México. *Revista Fitotecnica Mexicana*. 37(4): 351-361.
- SAS, Statistical Analysis System (2002). Institute. SAS Proceeding Guide. Version 9.0. SAS Institute. Cary, NC. USA.
- Sánchez, G. J. J., Goodman, M. M., and Stuber, C. W. (2000). Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of México. *Economic Botanic*. 54: 43-59.
- Sierra-Macías, M., Andrés-Meza, P., Palafox-Caballero, A. y Meneses-Márquez, I. (2016). Diversidad genética, clasificación y distribución racial del maíz nativo en el estado de Puebla, México. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*. 3(9):12-21.
- Smith, B. D. (1997). The initial Domestication of Cucurbita pepo in the Americas 10 000 years ago. *Science*. 276: 932-934.
- Taba, S. (1999). *Passport data to record when collecting seed of farmer varieties*. *Latin American Maize Germplasm Conservation: Core Subset Development and Regeneration. Proceedings of a Workshop held at CIMMYT*. Mexico, D.F.: CIMMYT. 62 Pp.
- Wellhausen, E. J., Roberts, L. M., Hernández, X. E., and Mangelsdorf, P. C. (1952). *Races of Maize in Mexico, Their Origin, Characteristics and Distribution*. *The Bussey Institution*. Harvard University. Cambridge, M. A. 209 Pp.



Imagen de [renatalferro](#) en [Pixabay](#)

Dióxido de zirconio: alternativas de síntesis y aplicaciones biomédicas

Zirconium dioxide: synthesis alternatives and biomedical applications

Marlene Lariza Andrade-Guel¹, Christian Javier Cabello-Alvarado^{2*}, Carlos Alberto Ávila-Orta²

RESUMEN

Entre los diferentes materiales cerámicos, el dióxido de zirconio (ZrO_2) se destaca, debido a sus aplicaciones en el área médica, química y farmacéutica. Esto es posible al ser un material de carácter anfótero, con tres fases cristalinas: monoclinica, tetragonal y cúbica, las cuales presentan distintas propiedades. El objetivo de este trabajo fue analizar los fundamentos de los diferentes métodos utilizados para la síntesis del ZrO_2 y sus aplicaciones biomédicas. Las principales metodologías empleadas son los procesos hidrotérmico, precipitación, solvotérmica y sol-gel. La energía de ultrasonido y la radiación de microondas permiten reducir los tiempos de reacción y proporcionar mayor eficiencia energética a los procesos. El método de síntesis modifica las propiedades del ZrO_2 , lo cual es aprovechado para desarrollar diferentes aplicaciones, entre ellas destacan reemplazos óseos, prótesis dentales y liberación de fármacos.

PALABRAS CLAVE: dióxido de zirconio, síntesis, aplicaciones.

ABSTRACT

Among the different ceramic materials, zirconium dioxide (ZrO_2) stands out, due to its applications in the medical, chemical and pharmaceutical areas. This is possible, since it is an amphoteric material with three crystalline phases: monoclinic, tetragonal and cubic, which have different properties. The objective of this work was to analyze the fundamentals of the different methods used for the synthesis of ZrO_2 , and its main biomedical applications. The main methodologies used include the hydrothermal, precipitation, solvothermal and sol-gel processes. The use of ultrasound energy and microwave radiation allows the reduction in reaction times, and provides greater energy efficiency to the process and a lower environmental impact. The synthesis method modifies the properties of ZrO_2 , which is used to develop different applications, including bone replacements, dental prostheses and drug release.

KEYWORDS: zirconium dioxide, synthesis, applications.

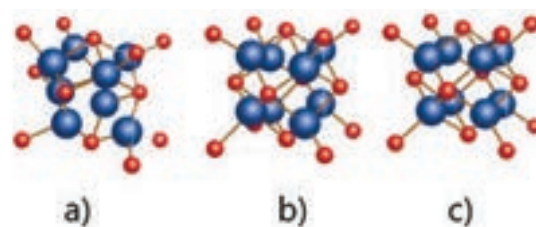
*Correspondencia: christian.cabello28@gmail.com / Fecha de recepción: 27 de abril de 2018 / Fecha de aceptación: 7 de marzo de 2019 / Fecha de publicación: 29 de julio de 2019

¹Centro de Investigación en Química Aplicada, Departamento de Materiales Avanzados, Saltillo, Coahuila, México. ²CONACYT, Consorcio de Investigación Científica, Tecnológica y de Innovación del estado de Tlaxcala, (CITLAX), Departamento de Materiales Avanzados, calle 1 de mayo núm. 22, colonia centro, Tlaxcala de Xicoténcatl, Tlaxcala, México, C. P. 90000.

INTRODUCCIÓN

Los materiales cerámicos poseen características interesantes, que permiten su aplicación en diferentes áreas. Estas particularidades se desprenden de su morfología porosa, su posible biocompatibilidad y su elevada dureza, aspectos que surgen como consecuencia de su composición química y su estructura cristalina (Wu y col., 2017; Zhang y col., 2018). Existen diferentes tipos de materiales cerámicos a base de óxidos metálicos, como dióxido de titanio (TiO_2), dióxido de zinc (ZnO_2), dióxido de silicio (SiO_2), dióxido de zirconio (ZrO_2), entre otros (Amuthasurabi y col., 2017; Li y col., 2017). El ZrO_2 es considerado un material cerámico con importantes propiedades físicas (dureza elevada), químicas (capacidad de promover sitios ácidos en sus poros) y térmicas (elevada resistencia a la conducción de calor). Este material se ha utilizado en implantes ortopédicos, piezas dentales, como liberador de fármacos y como catalizador (Wang y col., 2016, Nikiforov y col., 2017). El ZrO_2 puede estar presente en tres fases cristalinas, las cuales dependen de la temperatura de obtención. La fase monoclinica es estable termodinámicamente, desde temperatura ambiente hasta $1\,170\text{ }^\circ\text{C}$. Esta fase se usa para producir recubrimientos abrasivos, pigmentos inorgánicos y componentes eléctricos. La fase tetragonal obtenida de $1\,170\text{ }^\circ\text{C}$ hasta $2\,370\text{ }^\circ\text{C}$, se emplea como un material biocompatible, por lo que se emplea en la fabricación de piezas dentales y prótesis de cadera, debido a su elevada dureza y resistencia al desgaste. La fase cúbica se considera estable hasta su punto de fusión ($2\,650\text{ }^\circ\text{C}$). Esta fase posee una excelente conductividad iónica, es por tal motivo que, el material en esta fase, se puede utilizar como sensor de oxígeno y adsorbente de gases en cámaras de vacío (Campo-Ceballos y Rodríguez-Paez, 2010). En la Figura 1 se muestran las estructuras cristalinas de las diferentes fases del ZrO_2 .

El ZrO_2 se puede sintetizar mediante el método hidrotérmico, sin embargo, este método se caracteriza por su alto costo, además de ser



■ Figura 1. Estructuras cristalinas de las fases existentes del dióxido de zirconio; a) monoclinica, b) tetragonal; y c) cúbica.

Figure 1. Crystal structures of the existing phases of zirconium dioxide; a) monoclinic, b) tetragonal and; c) cubic.

tóxico y requerir alto consumo de energía. Una alternativa es utilizar la técnica sol-gel, la cual, es considerada un método sencillo, económico, que requiere baja temperatura de procesamiento y permite lograr una pureza homogénea, minimizando la contaminación del aire. El ultrasonido y las microondas son dos técnicas importantes en la síntesis de compuestos químicos, por la energía que aportan a los procesos; la primera se basa en el fenómeno de la cavitación, y la segunda se fundamenta en que la radiación emitida incide sobre los átomos o moléculas de los materiales.

El objetivo del presente trabajo fue indagar los fundamentos de diferentes metodologías empleadas para la síntesis de ZrO_2 y sus principales aplicaciones biomédicas.

Métodos de síntesis para ZrO_2

Sol-gel

El método sol-gel es un proceso versátil, que se utiliza en la fabricación de materiales cerámicos. En un proceso de sol-gel, una suspensión coloidal, o un sol, se forma a partir de la hidrólisis y reacciones de polimerización de precursores, que son sales de metales, generalmente inorgánicas o compuestos organo-metálicos, tales como alcóxidos de metales (Brinker y Scherer, 2013). Los beneficios que presenta este método son el control de la estructura, composición homogénea y tamaño uniforme de cristales. Otra ventaja, es el bajo costo total del producto, empleando

como precursor un acetato de zirconio, sustituyendo al alcóxido de zirconio; entre las desventajas de este proceso están el tiempo de reacción y que requiere cuidado en el control del secado (Mohammadi y Fray, 2011). Estudios de síntesis de nanopartículas de ZrO_2 , mediante la técnica de sol-gel, han utilizado oxiclورو de zirconio como materia prima, añadiendo un agente estabilizante de solución *buffer* de acetato de sodio a pH 6, lo que permite obtener un sol estable de ZrO_2 , para su posterior aplicación en anticorrosivos, catálisis y adsorción (Chepurna y col., 2011, Adraider y col., 2013, Balaji y Sethuraman, 2016). El ZrO_2 ha sido sintetizado por la técnica sol-gel, usando como precursor el n-propóxido de zirconio, altamente reactivo, en el proceso de hidrólisis. Dicho compuesto se emplea como inhibidor del ácido nítrico, para evitar la hidrólisis rápida. La adición de un inhibidor a un precursor alcóxido forma un ligando complejo, que es más difícil de hidrolizar, lo que conlleva a una disminución de velocidad de hidrólisis (Zhao y col., 2000).

Con el fin de mejorar el área superficial del ZrO_2 y mantener una red porosa, se ha reportado la modificación de la superficie con grupos organosilanos, dando lugar a una expansión de poros. Lo anterior se llevó a cabo mediante la sustitución de grupos polares por grupos alquilo no polares, en la superficie del gel (Ward y Ko, 1993, Bangi y col., 2013). Estudios previos han reportado que, la síntesis de nanopartículas de ZrO_2 está asociada con la incorporación de un surfactante, como el polisorbato 20, el cual actúa como agente directo de la estructura del sol de zirconia, que contiene un precursor de alcóxido estabilizado con acetilacetona, donde se forma un compuesto base de zirconio. La temperatura de calcinación elimina las micelas formadas y otros compuestos orgánicos, como el etanol, esto conduce a la formación de ZrO_2 cristalino y mesoporoso. Las ventajas de emplear este tipo de surfactante es la buena mezcla de materiales precursores a nivel molecular, excelente estabilidad y una adecuada viscosidad relativa, que puede contribuir a la for-

mación de películas o recubrimientos (Panova y col., 2011). Un parámetro importante en la síntesis de ZrO_2 es el tiempo de calcinación, el cual tiene un efecto sobre las propiedades morfológicas, estructurales y ácidas del ZrO_2 . El empleo de polímeros, surfactantes y compuestos orgánicos, también interviene en la morfología, como agentes direccionales para la formación de poros. Se han realizado estudios acerca de la síntesis de ZrO_2 por el método sol-gel, donde los mejores resultados se observaron en un intervalo de temperaturas de calcinación de 400 °C a 600 °C, obteniendo un material mesoporoso nanocristalino (Chen y col., 2011). Otras investigaciones han reportado la síntesis de nanopartículas de ZrO_2 , llevando a cabo la hidrólisis y condensación del n-propóxido de zirconio IV, en una solución de alcohol, utilizando hidroxilpropil celulosa, como estabilizador estérico; para prevenir la aglomeración de las nanopartículas, la calcinación se llevó a cabo en un intervalo de 200 °C a 400 °C por 2 h, siendo la temperatura de 400 °C donde se observó la fase tetragonal de ZrO_2 , con un tamaño de alrededor de 65 nm (Hernández-Enríquez y col., 2009).

Las partículas nanocristalinas de ZrO_2 han atraído especial atención por sus propiedades físicas y químicas, las cuales pueden sintetizarse por medio de una reacción entre el isopropóxido de zirconio y cloruro de zirconio a 350 °C, mediante la técnica de sol-gel, lo que ayuda a que se formen nanopartículas cristalinas de ZrO_2 con un tamaño de 4 nm, obteniendo una fase tetragonal. La metodología descrita asiste a la formación de nanopartículas sin aglomeración, por lo que pueden utilizarse en diversas aplicaciones (Shukla y col., 2002). Otra variante de la síntesis de sol-gel, se basa en la capacidad de los ácidos carboxílicos, por ejemplo, el ácido cítrico, de formar complejos de quelatos estables con cationes. Este procedimiento facilita el mezclado de la solución y la obtención de un producto final homogéneo a bajas temperaturas, lo que suprime las etapas como la sinterización (Joo y col., 2003).

Precipitación

Consiste en la formación de una o más fases sólidas en la solución, a partir de un sistema original, constituido por una fase homogénea, comúnmente líquida. Los precursores que normalmente se utilizan en el proceso de precipitación, son hidróxidos, carbonatos, cloruros, sulfatos, oxalatos, entre otros. Los diferentes precipitados que se obtienen, al adicionar una base al sistema, se modifican o transforman mediante tratamientos térmicos, de dispersión ó envejecimiento, produciendo polvos cerámicos con tamaño de partícula micrométrico (Cabrera-López y col., 2009). En el proceso de precipitación química, el zirconio es disuelto termodinámicamente. Se ha investigado la precipitación, utilizando como precursor el oxiclورو de zirconio, el cual, se mezcló con hidróxido de amonio a temperatura ambiente, ocasionando la precipitación del zirconio. La mezcla obtenida se dejó envejecer por 24 h, posteriormente, se dispersó en una solución de dietilamina; la suspensión se dejó envejecer unos días más, el proceso se repitió tres veces. El polvo cerámico obtenido se calcinó a 700 °C durante 60 min, el material obtenido mostró una fase cúbica y un tamaño de nanopartícula entre 50 nm y 80 nm (Narváez y col., 2007). Un procedimiento similar se estudió para la síntesis de nanopartículas de ZrO_2 fase tetragonal, esta fase es de interés en el manejo de metales fundidos, en la fabricación de troqueles de extrusión, así como en la fabricación de prótesis de cadera, rodilla y piezas dentales. Debido a la importancia de dicho compuesto, se empleó la técnica de precipitación controlada, para sintetizar polvos de ZrO_2 , con tamaños de partículas menores de 100 nm, utilizando un tratamiento térmico a una temperatura de 600 °C (Campo y Rodríguez, 2011). Por otra parte, la aglomeración se considera un problema, debido a que complica la síntesis de materiales cerámicos con una estructura uniforme y una morfología definida, por lo cual, se ha tratado de resolver esta dificultad con la síntesis vía precipitación química, así como el empleo de dopantes, que ayuden a estabilizar una fase (Lyubushkin y

col., 2011). Se han realizado investigaciones relacionadas con la microestructura de vidrios porosos de ZrO_2 , en las cuales se empleó agua como agente hidrolizante, a diferentes cantidades y temperatura, y como precursor propóxido de zirconio. Se observó que la concentración de agua afecta la estructura y características del material (Gubanova y col., 2014). Las ventajas que presenta dicha técnica es la pureza del material, estructura uniforme y una morfología definida. En cuanto a las desventajas se tiene alto contenido de sólidos disueltos en agua, que se deben tratar y el contenido de compuestos tóxicos que se pueden formar.

Síntesis solvotérmica

La síntesis solvotérmica se basa en la descomposición térmica de un compuesto organometálico en un disolvente orgánico. Se ha aplicado con éxito en obtención de óxidos metálicos de tamaño nanométrico, con gran área específica, alta cristalinidad y elevada estabilidad térmica. Algunos trabajos referentes a esta técnica reportan el uso de solventes, como el etanol, isopropanol o mezclas de ambos, para la preparación de nanocristales de ZrO_2 . Este tipo de soluciones se estabilizan con cloruro de itrio y utilizan como precursor $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. La mezcla se calienta en un reactor a una temperatura de 150 °C a 250 °C (Wang y col., 2005; Tonto y col., 2008). Otros estudios mencionan que han usado el mismo precursor y estabilizador, cambiando el disolvente por metanol y propanol, con una relación de volúmenes de 40/60, 20/80, 10/90, para después agitar por 12 h a 24 h a temperatura ambiente y se calentó en autoclave de 160 °C a 200 °C durante 72 h, logrando sintetizar nanopartículas de ZrO_2 , con una fase cúbica; la morfología de las nanopartículas depende directamente de la composición del solvente (Hua y col., 2006).

Este tipo de síntesis, bajo condiciones supercríticas de temperatura (400 °C) y presión (40 MPa), se ha llevado a cabo para la preparación de polvos nanocristalinos, como CeZrO_2 , obteniendo nanopartículas con una morfología

gía esférica de 3 nm a 10 nm de diámetro. Comparando esta técnica con otros métodos convencionales, se presenta una marcada reducción en el tiempo de obtención; algunas desventajas serían la utilización de equipos costosos y las altas temperaturas empleadas (Devaraju y col., 2009).

Síntesis hidrotérmica

El procesamiento hidrotérmico es una reacción heterogénea, en presencia de disolventes acuosos, con alta presión y temperatura, para disolver y recrystalizar los materiales (Hang y col., 2011). La técnica facilita el ahorro de energía, el uso de equipos de mayor volumen, control de nucleación, dispersión de los materiales y se puede cuidar la morfología. Tiene la ventaja de producir partículas de alta pureza, elevada cristalinidad, con características físicas y químicas específicas (Shevchenko y col., 2016). Se ha investigado el proceso hidrotérmico para la preparación de polvo nanocrystalino de ZrO_2 , en las fases cúbicas y tetragonales, debido a que estas fases son importantes en aplicaciones médicas, químicas y de ingeniería. Para estos procesos, se utilizan reactores de alta presión, temperaturas de 150 °C y tiempos de 85 h; como resultados se han obtenido porcentajes de 75 % de fase cúbica y tetragonal, el resto de fase monocíclica (Behbahani y col., 2012).

En la Tabla 1 se muestran algunos trabajos recientes de la síntesis de ZrO_2 , mediante el método hidrotérmico, los cuales se caracterizan por obtener nanopartículas de ZrO_2 a diferentes temperaturas. Un inconveniente de este tipo de procesos es que los tiempos de reacción son largos (Pei y col., 2013; Teymourian y col., 2014; Wan y col., 2014; Carević y col., 2016; Jafari y col., 2018).

Uso del ultrasonido en la síntesis de ZrO_2

En los últimos años, la energía ultrasónica ha resultado una herramienta útil en la síntesis de materiales micrométricos y nanométricos. Uno de los fenómenos físicos asociado con la síntesis de materiales es la técnica de ultrasonido, la cual se lleva a cabo cuando un me-

dio líquido es irradiado con ondas acústicas que se expanden en el sistema, creando burbujas que colapsan y aumentan la presión. El ultrasonido se encuentra en frecuencias que van desde los 20 kHz hasta 100 MHz. Los efectos químicos más importantes de esta tecnología son la dispersión de las moléculas y la activación de enlaces, para promover la creación de materiales a partir de precursores. Esta técnica se utiliza para asistir al método sol-gel, hidrotérmico y precipitación, porque ayuda a una agitación homogénea, dispersando partículas, calentamiento, reducción de tiempos y eficiencia energética (Gedanken, 2003; Bang y col., 2010; Guel y col., 2017).

Entre las ventajas del uso del ultrasonido, en la síntesis de materiales con ZrO_2 , destacan: la aceleración del enfriamiento para obtener tamaños nanométricos en la preparación de óxidos metálicos amorfos; incorporación de nanoestructuras a materiales porosos; inserción de catalizadores amorfos, de tamaño nanométrico, en materiales mesoporosos; depositor de nanopartículas sobre superficies cerámicas y polímeros; adhesión de nanopartículas, como metales y óxidos, semiconductores en la superficie cerámica y polimérica (Gedanken, 2004).

Existen reportes de la síntesis de ZrO_2 mediante la técnica de precipitación, modificada con la incorporación del ultrasonido. La energía total requerida, por unidad de peso, del material obtenido, es 0.049 kJ/g para el ultrasonido y 0.068 kJ/g para el método de síntesis convencional. Por lo tanto, el ultrasonido, permitió un ahorro de 28 % de energía y reducir los tiempos de reacción (Prasad y col., 2011).

La combinación de técnicas convencionales y el uso del ultrasonido es una opción para la síntesis de materiales nanocrystalinos. Ejemplo de esto es una técnica basada en el tratamiento hidrotérmico asistido por ultrasonido, donde bajo este procedimiento se logra la síntesis de polvos nanocrystalinos de ZrO_2 en

■ **Tabla 1. Síntesis de ZrO_2 mediante el método hidrotérmico.**Table 1. Synthesis of ZrO_2 by the hydrothermal method.

Condiciones de reacción	Resultados obtenidos	Referencia
Se preparó solución de $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ g y 50 mL de 2 M de NaOH. Se calentó en autoclave a 150 °C por 24 h.	Se obtuvo principalmente la fase tetragonal, con un tamaño de partícula de 22 nm. Para su aplicación en fotocatalisis.	Carević y col. (2016)
El precursor que se utilizó fue el $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ a 0.3 M y 70 mg de grafeno. Se calentó en autoclave a 180 °C por 18 h.	Se sintetizó un nanocompuesto ZrO_2 con grafeno en un solo paso. Para su aplicación como sensores electroquímicos.	Teymourian y col. (2014); Jafari y col. (2018)
El $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ se disolvió en 100 mL de agua desionizada, se agitó por 30 min, se le adicionaron 0.6 mL NH_4OH y se calentó en autoclave a 90 °C por 4 h.	Se logró sintetizar nanopartículas de ZrO_2 sobre un sustrato de madera, el cual tiene su aplicación en la construcción.	Wan y col. (2014)
Se preparó solución acuosa de óxido de zirconio comercial y NaOH, se agitó durante 3 h. La mezcla se calentó en un reactor a 150 °C durante 85 h.	Se obtuvieron nanopulvos de ZrO_2 . No se determinó la aplicación.	Behbahani y col. (2012)
El $\text{Zr}(\text{OH})_4$ se mezcló con agua desionizada y se calentó en autoclave de 80 °C a 180 °C a diferentes tiempos.	Se sintetizaron nanorods de ZrO_2 con fase monocíclica. No se estableció la aplicación de los nanorods de ZrO_2 .	Pei y col. (2013)

tiempos de reacción de 1 h a 3 h, con temperaturas de calcinación de 250 °C (Meskin y col., 2006).

Investigaciones recientes, empleando como precursor el nitrato de zirconio, han preparado ZrO_2 a condiciones de pH bajo, obteniendo materiales con menor grado de impurezas y mayor área específica (Zinatloo-Ajabshir y col., 2016).

Síntesis de ZrO_2 asistida por microondas

La síntesis por microondas representa una gran alternativa en la producción de materiales, ya que la alta intensidad de energía utilizada en este procedimiento reduce los tiempos de reacción al orden de minutos, en comparación con los métodos de síntesis conven-

cionales (Bethune y col., 1993; Liang y col., 2002; Sahoo y col., 2008).

La síntesis utilizando energía de las microondas se basa, principalmente, en el calentamiento mediante la polarización dipolar generada por la rotación de las moléculas, inducida por un campo eléctrico. Es esta su principal función en la síntesis, acelerar el calentamiento para reducir los tiempos de reacción. Diferentes estudios han llevado a cabo la síntesis de ZrO_2 utilizando la técnica solvotérmica asistida por microondas, en la cual, se obtienen fases más puras y cristalinas, a menor tiempo de reacción, comparada con algún método convencional; así mismo, se ha estudiado la síntesis de nanopartículas de ZrO_2 , recubiertas con sílice, en tiempos de

reacción de 2 min, a una temperatura de 70 °C (Siddiquey y col., 2011; Liang y D'Alessandro, 2013). Sin embargo, existen otras técnicas que se combinan con las microondas para la síntesis de polvos nanométricos de ZrO_2 , preparando una solución acuosa de NaOH y cloruro de zirconio en condiciones hidrotérmicas y microondas, en las que se obtuvo una fase tetragonal, al aumentar la concentración de NaOH. La síntesis hidrotérmica, asistida por microondas, de ZrO_2 , favorece al ahorro energético, debido al rápido calentamiento, que beneficia al aumento en la cinética de cristalización, por lo que se considera un método simple, con el cual se puede llevar a cabo la obtención de polvos finos, con una distribución de tamaño de partícula uniforme y una buena homogeneidad química (Zhu y Hang, 2013; Meng y col., 2016). Para obtener nanopartículas de óxidos metálicos, con una morfología esférica, es necesario el uso de soluciones concentradas. Esto se ha investigado utilizando radiación de microondas en soluciones salinas, llevando a cabo un proceso de hidrólisis, donde alcoholes y agua son mezcladas con sales de zirconio. La mezcla es sometida a la radiación de las microondas de 3 min a 5 min. Entre los diversos métodos de preparación de nanopartículas de óxidos metálicos, los líquidos iónicos son una alternativa que, junto con el calentamiento por microondas, permiten obtener nanopartículas cristalinas sin presencia de agregados, aunque el mecanismo de formación de estas nanoestructuras aún no se encuentra claramente definido (Vanetsev y col., 2002; Zhang y col., 2013). La información analizada permite observar que el calentamiento por microondas se ha convertido en un método funcional en la síntesis de nanopartículas de ZrO_2 , debido a la reducción de tiempos de reacción, en comparación con el calentamiento convencional y su efecto de convertir los hidróxidos de zirconio en dióxidos. Este método es adecuado para asistir otros métodos convencionales, los cuales utilicen calentamiento y agitación. Estos materiales, junto con otros compuestos, como óxido de itrio (Y_2O_3), son utilizados en la fabricación de electrolitos só-

lidos para celdas de combustible, ya que presentan alta conductividad iónica (Danilenko, 2008; Strizhak y col., 2008; Kartashov y col., 2010).

Aplicaciones biomédicas del ZrO_2

Reemplazos óseos

El ZrO_2 es considerado un excelente biomaterial cerámico, debido a que presenta buena estabilidad química, excelente estabilidad dimensional a diferentes temperaturas, resistencia a la tensión y módulo de Young, similar a las aleaciones de acero inoxidable. Los materiales cerámicos de zirconio son compuestos químicamente inertes, por lo cual, no tienen reacciones adversas en el organismo humano. A partir del 2006, se han implantado más de 600 000 femorales, con este tipo de material, alrededor del mundo, en especial en Europa y Estados Unidos (Liu y col., 2006; Volpato y col., 2011). Algunos estudios han demostrado que el ZrO_2 no presenta citotoxicidad en células osteoblásticas, ya que presentan una excelente viabilidad celular y una buena adhesión en la superficie de las células, lo que es factor importante en un material biocompatible (Garzón y col., 2013).

Los factores importantes en un material implantado son la afinidad con el medio y la interacción con las células involucradas, como osteoblastos, fibroblastos o células epiteliales. Se ha investigado la biocompatibilidad en estudios *in vivo* mediante la implantación de huesos y tejidos blandos de ZrO_2 , estabilizado con Y_2O_3 , en el fémur de un simio (Piconi y Maccauro, 1999; Neunzehn y col., 2012). El material implantado fue evaluado después de 9 meses, los resultados no revelaron signos de toxicidad, problemas inmunológicos, ni efectos carcinogénicos.

En implantes dentales, el ZrO_2 es un buen candidato, que proporciona ventajas estéticas, como el color (Catauro y col., 2007). Se ha estudiado la incorporación o modificación de la superficie del ZrO_2 , proporcionando varias funciones favorables para aplicaciones biomédicas, que permiten obtener materiales como hi-

drogeles (ácido hialurónico) con ZrO_2 modificado. Este material se desarrolló para su aplicación en la regeneración ósea (Bae y col., 2013). Las pruebas *in vitro* demostraron que la modificación con este tipo de hidrogel promueve la proliferación de células, por lo que representan una alternativa eficaz para la formación de hueso. Se ha estudiado mediante la simulación de las condiciones de plasma humano, para observar la reactividad de un recubrimiento vidrio-cerámico (ZrO_2), para ello, el material se sumergió en una solución de plasma, y mediante un examen de morfología, se observó la existencia de formación de una capa superficial en el material durante su inmersión, lo cual se considera benéfico para funciones de implantes (Ferraris y col., 2000). Algunas investigaciones revelaron que la modificación de la superficie del ZrO_2 puede mejorar la estabilidad de un implante óseo. En una prueba *in vivo*, realizada por Manicone y col. (2007), se realizó el reemplazo de un fémur a base de ZrO_2 , mostrando una buena integración ósea. Estos implantes mostraron buenas propiedades mecánicas de tensión, desgaste, y en particular tienen una mayor resistencia a la fractura, comparados con implantes de TiO_2 (Manicone y col., 2007).

Otra opción para utilizar el ZrO_2 es combinarlo con hidroxiapatita, generando un sistema binario bioactivo, bioinerte, con buenas propiedades mecánicas y alta resistencia al desgaste (Bhowmick y col., 2017). La técnica de co-precipitación es ideal para sintetizar este compuesto, ya que se tiene una dispersión homogénea y permite el control de la descomposición de la hidroxiapatita. Por lo que resulta un material interesante para aplicaciones de implantes, como prótesis de hueso, principalmente.

Prótesis dentales

Los implantes en dientes a base de ZrO_2 , tienen un efecto favorable sobre los tejidos blandos, específicamente en la sustitución de molares y premolares (Nakonieczny y col., 2017); estudios *in vitro* revelaron que el implante en diente tiene buena resistencia a la fractu-

ra, debido a que la fase tetragonal del ZrO_2 se encuentra parcialmente estabilizada con itrio, que le otorga resistencia a los cambios de fases (Cervantes y col., 2016; Podzorova y col., 2017; Wang y col., 2017; Penkina, 2017). La capacidad de transmitir luz y su color marfil, similar al de los dientes, hacen al ZrO_2 un excelente material para restauraciones estéticas de cavidades orales, dado que muestran una alta biocompatibilidad, elevados valores de flexión y resistencia al desgaste. En estudios *in vivo*, la proliferación celular y síntesis total de proteínas en osteoblastos, fueron similares a los observados con ZrO_2 , lo que revela una buena biocompatibilidad. Debido a esto, también se puede preparar como una suspensión coloidal para recubrir superficies de implantes de TiO_2 . Estudios recientes han demostrado que al recubrir los implantes con ZrO_2 , dopados con cobre (Cu) y plata (Ag), se disminuyen las probabilidades de una adhesión bacteriana, que conduzca a un proceso inflamatorio del tejido y rechazo del implante (Sollazzo y col., 2008; Huang y col., 2013). En implantes dentales, la saliva juega un papel importante en las propiedades del material, ya que contiene proteínas que al estar en contacto con el material puede afectar las características físico-químicas de la superficie. Se ha probado que la adhesión bacteriana se reduce al recubrir el material de TiO_2 con ZrO_2 , en este caso, los ensayos bacterianos se realizaron con dos tipos de bacterias *Streptococcus mitis* y *Prevotella nigrescens* (Al-Radha y col., 2012).

Liberación de fármacos

Los sistemas de liberación de fármacos surgen como consecuencia de la imposibilidad de trasladar, de forma directa, principios activos al organismo. Estos están formados por un principio activo y un sistema transportador, que puede dirigir la liberación de un fármaco al sitio adecuado y en la cantidad conveniente. Nanopartículas de ZrO_2 , con una estructura mesoporosa, han demostrado ser vehículos eficaces para medicamentos contra el cáncer, por ejemplo, la doxorubicina, que

transita en los espacios vacíos del interior de los poros, quedando las nanopartículas ZrO_2 totalmente cargadas con el fármaco (Feng y col., 2017). La liberación del principio activo depende a su vez del pH, que puede ser ajustado por el ZrO_2 , cuando se trata de un sistema de óxidos mixtos, como el sistema $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$. Este sistema se ha probado para la liberación de fosfonatos, que tiene un uso en la medicina para tratar desórdenes asociados a la formación de huesos y metabolismo del calcio (Colilla y col., 2009). Además de sistemas cerámicos, se ha tratado de añadir

un compuesto orgánico a un cerámico, tal es el caso del ZrO_2 y el polímero policaprolactona, mediante la técnica de sol-gel, que permite preparar nanocompuestos, donde las interacciones entre los ácidos carboxílicos del polímero y los grupos hidroxilo de la matriz inorgánica se dan mediante puentes de hidrógeno (Catauro y col., 2010; Catauro y col., 2014).

Existen diferentes patentes sobre técnicas de fabricación de materiales cerámicos a base de ZrO_2 , que pueden ser utilizados para la liberación de fármacos (Tabla 2).

■ **Tabla 2. Diferentes estudios protegidos para la obtención de partículas de ZrO_2 con posibles aplicaciones en liberación de fármacos.**

Table 2. Different protected studies to obtain ZrO_2 particles with possible applications in drug release.

No. de patente	Año	Método de síntesis	Descripción del estudio
20060148950 A1 20060706	2006	Hidrotérmico	La materia prima se somete a un calentamiento, para formar un producto intermedio de zirconio, para después someterlo a un segundo tratamiento hidrotérmico y formar soles de ZrO_2 .
WO 2007071701 A1 20070628	2007	Sol-gel	A partir del precursor carbonato de zirconio y una solución de amonio, se prepara un sol a partir de agua y el precursor, después se añade una solución de amonio. El gel se seca y se le da un tratamiento de calcinación.
WO 2009085926 A2 20090709	2009	Hidrotérmico	Se obtienen partículas de ZrO_2 en un reactor hidrotérmico a una velocidad de 18.6 mL/min, al cual se le agrega una mezcla de acetato de zirconio, agua y acetato de itrio.
WO 2016120795 A1 20160804	2016	Sol-gel	Este método permite controlar el tamaño de poro y diámetro de las nanopartículas; dichas nanopartículas no presentan citotoxicidad.
WO 2018056849 A1 20180329	2018	Sol-gel con ultrasonido	Preparación de un sol de ZrO_2 , empleando como precursor zirconium (IV) n-propóxido, disuelto en propanol, con la adición de ácido acético glacial. Esta solución se expone a un campo ultrasónico, con una potencia de 60 w a 100 w y una frecuencia de 20 kHz, a una temperatura entre 10 °C y 60 °C, durante un tiempo de 25 min a 60 min.

CONCLUSIONES

El proceso de síntesis sol-gel del dióxido de zirconio (ZrO_2) ofrece importantes beneficios industriales, como el control de la estructura, composición y tamaño de partícula homogénea, además de bajo costo. El empleo de microondas y ultrasonido hacen más eficiente dicho proceso, al reducir tiempos de producción y modificar, de forma controlada, las características finales del producto, el cual presenta propiedades físicas, químicas, fisicoquímicas, térmicas y mecánicas, junto con su naturaleza inerte, que lo hacen adecuado en aplicaciones biomédicas, que incluyen reemplazos óseos, prótesis dentales y liberación de fármacos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Conacyt por la beca postdoctoral 387368, y a los proyectos: Cátedras Conacyt Innovación y Desarrollo de Textiles Técnicos Funcionales a Base de Materiales Avanzados No. 562, FOMIX, para el Fortalecimiento de las capacidades científicas y tecnológicas en el estado de Tlaxcala TLAX-2018-01-43129 Consolidación del Consorcio de Investigación y de Innovación del estado de Tlaxcala (CITLAX) Convocatoria: Fondo institucional del Fomento Regional para el Desarrollo Científico y Tecnológico y de Innovación FORDECYT 2018.

REFERENCIAS

- Adraider, Y., Pang, Y. X., Nabhani, F., Hodgson, S. N., Sharp, M. C., and Al-Waidh, A. (2013). Fabrication of zirconium oxide coatings on stainless steel by a combined laser/sol-gel technique. *Ceramics International*. 39(8):9665-9670.
- Al-Radha, A. S. D., Dymock, D., Younes, C., and O' Sullivan, D. (2012). Surface properties of titanium and zirconia dental implant materials and their effect on bacterial adhesion. *Journal of dentistry*. 40(2):146-153.
- Amuthasurabi, M., Chandradass, J., Babuc, V. R., Sethupathi, P. B., and Martin, M. L. J. (2017). Electrical characteristics of zinc oxide thin film transistor fabricated at high temperature by RF magnetron sputtering technique. *Journal of Ceramic Processing Research*. 18(11):815-818.
- Bae, M. S., Kim, J. E., Lee, J. B., Heo, D. N., Yang, D. H., Kim, J. H., and Kwon, I. K. (2013). ZrO_2 surface chemically coated with hyaluronic acid hydrogel loading GDF-5 for osteogenesis in dentistry. *Carbohydrate polymers*. 92(1):167-175.
- Balaji, J. and Sethuraman, M. G. (2016). Studies on the effects of thiourea and its derivatives doped-Hybrid/zirconium nanocomposite based sol-gel coating for the corrosion behaviour of aluminum metal. *Progress in Organic Coatings*. 99:463-473.
- Bang, J. H. and Suslick, K. S. (2010). Applications of ultrasound to the synthesis of nanostructured materials. *Advanced materials*. 22(10):1039-1059.
- Bangi, U. K., Park, C. S., Baek, S., and Park, H. H. (2013). Sol-gel synthesis of high surface area nanostructured zirconia powder by surface chemical modification. *Powder technology*. 239:314-318.
- Behbahani, A., Rowshanzamir, S., and Esmaeilifar, A. (2012). Hydrothermal synthesis of zirconia nanoparticles from commercial zirconia. *Procedia Engineering*. 42:908-917.
- Bethune, D. S., Kiang, C. H., De-Vries, M. S., Gorman, G., Savoy, R., Vazquez, J., and Beyers, R. (1993). Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls. *Nature*. 363(6430):605-607.
- Bhowmick, A., Pramanik, N., Jana, P., Mitra, T., Gnanamani, A., Das, M., and Kundu, P. P. (2017). Development of bone-like zirconium oxide nanoceramic modified chitosan based porous nanocomposites for biomedical application. *International Journal of Biological Macromolecules*. 95:348-356.
- Brant, K. U., Danny, A. B., Davidson, R. S., Hendrickson, M. J., Leach, J. J., and McKenzie, T. L. (2009). Method of making zirconia-containing nanoparticles. Patente WO 2009085926 A2 20090709.
- Brinker, C. J. and Scherer, G. W. (2013). *Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing*. United States of America: Academic press. 2 Pp.
- Cabrera-López, J. J., Narváez, J. L. y Rodríguez-Páez, J. E. (2009). Síntesis de ZrO_2 nanométrico utilizando precipitación controlada. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. (47):20-28.
- Campo-Ceballos, D. A. y Rodríguez-Paez, J. E. (2010). Uso de rutas químicas para sintetizar ZrO_2 tetragonal. *Revista Colombiana de Física*. 42(1):57-62.
- Campo, D. y Rodríguez, J. (2011). ZrO_2 tetragonal obtenido por el método de precipitación controlada. *Dyna*. 78(165): 224-223.
- Carević, M. V., Abazović, N. D., Novaković, T. B., Pavlović, V. B., and Čomor, M. I. (2016). Zirconium dioxide nanopowders with incorporated Si^{4+} ions as efficient photocatalyst for degradation of trichlorophenol using simulated solar light. *Applied Catalysis B: Environmental*. 195:112-120.
- Catauro, M., Bollino, F., Papale, F., Pacifico, S., Galasso, S.,

- Ferrara, C., and Mustarelli, P. (2014). Synthesis of zirconia/polyethylene glycol hybrid materials by sol-gel processing and connections between structure and release kinetic of indometacin. *Drug delivery*. 21(8):595-604.
- Catauro, M., Raucci, M. G., and Continenza, M. A. (2007). Release kinetics of ampicillin, biocompatibility tests with a fibroblast strain of a zirconia gel glass. *Letters in Drug Design & Discovery*. 4(6):453-459.
- Catauro, M., Verardi, D., Melisi, D., Belotti, F., and Mustarelli, P. (2010). Novel sol-gel organic-inorganic hybrid materials for drug delivery. *Journal of Applied Biomaterials & Biomechanics*. 8(1):42-51.
- Cervantes, A. L., Galaviz, A. A., Aceves, C. y Fonseca, C. G. (2016). Diseño, fabricación y evaluación clínica de implantes trans-endodónticos de óxido de zirconio. [En línea]. Disponible en: <http://www.reibci.org/publicados/2016/feb/1500105.pdf>. Fecha de consulta: 9 de mayo de 2018.
- Chen, Y., Lunsford, S. K., Song, Y., Ju, H., Falaras, P., Kontos, A. G., and Dionysiou, D. D. (2011). Synthesis, characterization and electrochemical properties of mesoporous zirconia nanomaterials prepared by self-assembling sol-gel method with Tween 20 as a template. *Chemical engineering journal*. 170(2-3):518-524.
- Chepurna, I., Smotraev, R., Kanibolotsky, V., and Strelko, V. (2011). Colloidal and chemical aspects of nanosized hydrated zirconium dioxide synthesized via a sol-gel process. *Journal of colloid and interface science*. 356(2):404-411.
- Colilla, M., Manzano, M., Izquierdo-Barba, I., Vallet-Regí, M., Boissière, C., and Sanchez, C. (2009). Advanced drug delivery vectors with tailored surface properties made of mesoporous binary oxides submicronic spheres. *Chemistry of Materials*. 22(5):1821-1830.
- Danilenko, I. A. (2008). Effect of temperature on the structural characteristics of zirconium dioxide nanoparticles produced under conditions of microwave treatment. *Theoretical and Experimental Chemistry*. 44(3):144-149.
- Davidson, R., Kolb, B., Anderson, D., Higgins, J., Hendrickson, M., and Brady, J. (2006). Patente USA. No. 20060148950 A1 20060706.
- Devaraju, M. K., Liu, X., Yusuke, K., Yin, S., and Sato, T. (2009). Solvothermal synthesis and characterization of ceria-zirconia mixed oxides for catalytic applications. *Nanotechnology*. 20(40):405606.
- Feng, L., Gai, S., He, F., Dai, Y., Zhong, C., Yang, P., and Lin, J. (2017). Multifunctional mesoporous ZrO₂ encapsulated up-conversion nanoparticles for mild NIR light activated synergistic cancer therapy. *Biomaterials*. 147:39-52.
- Ferraris, M., Verne, E., Appendino, P., Moisesescu, C., Krajewski, A., Ravaglioli, A., and Piancastelli, A. (2000). Coatings on zirconia for medical applications. *Biomaterials*. 21(8):765-773.
- Garzón, A., Aguirre, N. y Olaya, J. (2013). Estado del arte en biocompatibilidad de recubrimientos. *Visión electrónica*. 7(1):160-177.
- Gedanken, A. (2003). Sonochemistry and its application to nanochemistry. *Current science*. 85(12):1720-1722.
- Gedanken, A. (2004). Using sonochemistry for the fabrication of nanomaterials. *Ultrasonics sonochemistry*. 11(2):47-55.
- Gubanova, N. N., Kopitsa, G. P., Ezdakova, K. V., Baranchikov, A. Y., Angelov, B., Feoktystov, A., ..., and Ivanov, V. K. (2014). Structure of zirconium dioxide based porous glasses. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 8(5):967-975.
- Guel, M. L. A., Jiménez, L. D., and Hernández, D. A. C. (2017). Ultrasound-assisted sol-gel synthesis of ZrO₂. *Ultrasonics sonochemistry*. 35:514-517.
- Hang, C., Li, Q., Gao, S., and Shang, J. K. (2011). As (III) and As (V) adsorption by hydrous zirconium oxide nanoparticles synthesized by a hydrothermal process followed with heat treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 51(1):353-361.
- Hernández-Enríquez, J. M., García-Serrano, L. A., García-Alamilla, R., Cortez-Lajas, L. A. y Cueto-Hernández, A. (2009). Síntesis, caracterización y evaluación catalítica de un ZrO₂ con fase monoclinica. *Superficies y vacío*. 22(2):1-9.
- Hoek, A., Gerardus, N., and Lambertus, P. (2007). Zirconium stabilised Fischer Tropsch catalyst and catalyst support. Patente USA. WO 2007071701 A1 20070628.
- Hua, Z., Wang, X. M., Xiao, P., and Shi, J. (2006). Solvent effect on microstructure of yttria-stabilized zirconia (YSZ) particles in solvothermal synthesis. *Journal of the European Ceramic Society*. 26(12):2257-2264.
- Huang, H. L., Chang, Y. Y., Weng, J. C., Chen, Y. C., Lai, C. H., and Shieh, T. M. (2013). Anti-bacterial performance of zirconia coatings on titanium implants. *Thin Solid Films*. 528:151-156.
- Jafari, M. T., Rezaei, B., and Bahrami, H. (2018). Zirconium dioxide-reduced graphene oxide nanocomposite-coated stir-bar sorptive extraction coupled with ion mobility spectrometry for determining ethion. *Talanta*. 182:285-291.
- Joo, J., Yu, T., Kim, Y. W., Park, H. M., Wu, F., Zhang, J. Z., and Hyeon, T. (2003). Multigram scale synthesis and characterization of monodisperse tetragonal zirconia nanocrystals. *Journal of the American Chemical Society*. 125(21):6553-6557.
- Kartashov, V. V., Denisova, É. I., Vlasov, A. V., Aleshin, D. K., and Blinnichev, A. A. (2010). High-strength ceramic based on zirconium dioxide: preparation and properties. *Refractories and Industrial Ceramics*. 51(4):267-269.
- Li, J., Wu, Y., Cao, J., Wei, Z., Guo, Y., Wang, Q., ..., and He, X. (2017). Excellent flexibility of high-temperature-treated SiO₂-TiO₂ hybrid fibres and their enhanced luminescence with Eu³⁺ doping. *Ce-*

ramics International. 43(15):12710-12717.

Liang, J., Deng, Z., Jiang, X., Li, F., and Li, Y. (2002). Photoluminescence of tetragonal ZrO_2 nanoparticles synthesized by microwave irradiation. *Inorganic chemistry*. 41(14): 3602-3604.

Liang, W. and D'Alessandro, D. M. (2013). Microwave-assisted solvothermal synthesis of zirconium oxide based metal-organic frameworks. *Chemical Communications*. 49(35): 3706-3708.

Liu, X., Huang, A., Ding, C., and Chu, P. K. (2006). Bioactivity and cytocompatibility of zirconia (ZrO_2) films fabricated by cathodic arc deposition. *Biomaterials*. 27(21): 3904-3911.

Lyubushkin, R. A., Sirota, V. V., and Ivanov, O. N. (2011). Fabrication and properties of zirconium ceramic from zirconium dioxide nanopowder. *Glass and Ceramics*. 68(1-2): 61-64.

Manicone, P. F., Iommetti, P. R., and Raffaelli, L. (2007). An overview of zirconia ceramics: basic properties and clinical applications. *Journal of Dentistry*. 35(11): 819-826.

Meng, L. Y., Wang, B., Ma, M. G., and Lin, K. L. (2016). The progress of microwave-assisted hydrothermal method in the synthesis of functional nanomaterials. *Materials Today Chemistry*. 1: 63-83.

Meskin, P. E., Ivanov, V. K., Barantchikov, A. E., Churagulov, B. R., and Tretyakov, Y. D. (2006). Ultrasonically assisted hydrothermal synthesis of nanocrystalline ZrO_2 , TiO_2 , NiFe_2O_4 and $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ powders. *Ultrasonics sonochemistry*. 13(1): 47-53.

Mohammadi, M. R. and Fray, D. J. (2011). Synthesis and characterisation of nanosized TiO_2 - ZrO_2 binary system prepared by an aqueous sol-gel process: Physical and sensing properties. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 155(2): 568-576.

Nakoneczny, D. S., Ziębowicz, A., Paszenda, Z. K., and Krawczyk, C. (2017). Trends and perspectives in modification of zirconium oxide for a dental prosthetic applications—A review. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 37(1): 229-245.

Narváez-Semanate, J. L., Cabrera, J. J., Vargas-Zapata, R. A. y Rodríguez-Páez, J. E. (2007). Obtención de nanopartículas de ZrO_2 dopado con Y_2O_3 utilizando rutas químicas. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. 27(2): 124-134.

Neunzehn, J., Lüttenberg, B., and Wiesmann, H. P. (2012). Investigation of biomaterials by human epithelial gingiva cells: an *in vitro* study. *Head & face medicine*. 8(1): 35.

Nikiforov, S. V., Kortov, V. S., Savushkin, D. L., Vokhmintsev, A. S., and Weinstein, I. A. (2017). Thermal quenching of luminescence in nanostructured monoclinic zirconium dioxide. *Radiation Measurements*. 106: 155-160.

Panova, T. I., Morozova, L. V., Drozdova, I. A., and Shilova, O. A. (2011). Sol-gel synthesis of solid solutions based on zirconium and hafnium dioxides. *Glass Physics and Chemistry*. 37(5): 505.

Pei, L., Xie, Y., Pei, Y., and Yuan, C. (2013). Synthesis and formation process of zirconium dioxide nanorods. *Materials Science-Poland*. 31(2): 186-192.

Penkina, T. N. (2017). Low-temperature aging of ceramic on the basis of tetragonal zirconium dioxide stabilized by cations of yttrium and ytterbium. *Inorganic Materials: Applied Research*. 8(5): 713-717.

Piconi, C. and Maccauro, G. (1999). Zirconia as a ceramic biomaterial. *Biomaterials*. 20(1): 1-25.

Podzorova, L. I., Titov, S. A., Il'icheva, A. A., Mikhailina, N. A., Pen'kova, O. I., Shvorneva, L. I., and Penkina, T. N. (2017). Low-temperature aging of ceramic on the basis of tetragonal zirconium dioxide stabilized by cations of yttrium and ytterbium. *Inorganic Materials: Applied Research*. 8(5): 713-717.

Prasad, K., Pinjari, D. V., Pandit, A. B., and Mhaske, S. T. (2011). Synthesis of zirconium dioxide by ultrasound assisted precipitation: effect of calcination temperature. *Ultrasonics Sonochemistry*. 18(5): 1128-1137.

Przemyslaw, J., Jedrzejczyk, R. J., Chlebda, D., and Dziedzicka, A. (2018). Method of preparing a layer of zirconium (iv) oxide as a catalytic carrier on a metallic substrate. Patente WO 2018056849 A1 20180329.

Sahoo, T. R., Manoharan, S. S., Lim, S. H., and Salamanca-Riba, L. G. (2008). Structural and magnetic properties of cubic zirconia/Co composites synthesized by microwave route. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic and Nano-Metal Chemistry*. 38(3): 280-283.

Shevchenko, A. V., Lashneva, V. V., Ruban, A. K., Tsukrenko, V. V., and Dudnik, E. V. (2016). Synthesis and Study of high-purity nanocrystalline powder of a solid solution of CeO_2 and Y_2O_3 in zirconium dioxide. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 54(9-10): 548-553.

Shukla, S., Seal, S., Vij, R., and Bandyopadhyay, S. (2002). Effect of HPC and water concentration on the evolution of size, aggregation and crystallization of sol-gel nano zirconia. *Journal of Nanoparticle Research*. 4(6): 553-559.

Siddiquey, I. A., Furusawa, T., Sato, M., Bahadur, N. M., Uddin, M. N., and Suzuki, N. (2011). A rapid method for the preparation of silica-coated ZrO_2 nanoparticles by microwave irradiation. *Ceramics International*. 37(6): 1755-1760.

Sollazzo, V., Pezzetti, F., Scarano, A., Piattelli, A., Bignozzi, C. A., Massari, L., ..., and Carinci, F. (2008). Zirconium oxide coating improves implant osseointegration *in vivo*. *Dental Materials*. 24(3): 357-361.

Sponchia, G., Benedetti, A., and Riello, P. (2016). Totally-mesoporous zirconia nanoparticles, use and method for producing thereof. Patente WO 2016120795 A1 20160804.

Strizhak, P. E., Tripol'skii, A. I., Gurnik, T. N., Tuzikov, F. V., Moroz, É. M., Konstantinova, T. E., ..., and Danilenko, I. A.

(2008). Effect of temperature on the structural characteristics of zirconium dioxide nanoparticles produced under conditions of microwave treatment. *Theoretical and Experimental Chemistry*. 44(3):144-149.

Teymourian, H., Salimi, A., Firoozi, S., Korani, A., and Soltanian, S. (2014). One-pot hydrothermal synthesis of zirconium dioxide nanoparticles decorated reduced graphene oxide composite as high performance electrochemical sensing and biosensing platform. *Electrochimica Acta*. 143:196-206.

Tonto, P., Mekasuwandumrong, O., Phatanasri, S., Pavarajarn, V., and Praserttham, P. (2008). Preparation of ZnO₂ nanorod by solvothermal reaction of zinc acetate in various alcohols. *Ceramics International*. 34(1):57-62.

Vanetsev, A. S., Ivanov, V. K., Kolen'ko, Y. V., Oleinikov, N. N., Murav'eva, G. P., and Tret'yakov, Y. D. (2002). Synthesis of spherical oxide particles in microwave hydrolysis of Zr (IV), Ce (IV), and Ni (II) salt solutions. *Doklady Chemistry*. 385 (1-3):175-177.

Volpato, C. Â. M., Altoé-Garbelotto, L. G. D., Fredel, M. C., and Bondioli, F. (2011). Application of zirconia in dentistry: biological, mechanical and optical considerations. In *Advances in ceramics-electric and magnetic ceramics, bioceramics, ceramics and environment*. [En línea]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/advances-in-ceramics-electric-and-magnetic-ceramics-bioceramics-ceramics-and-environment/application-of-zirconia-in-dentistry-biological-mechanical-and-optical-considerations/>. Fecha de consulta: 11 de mayo de 2018.

Wan, C., Lu, Y., Sun, Q., and Li, J. (2014). Hydrothermal synthesis of zirconium dioxide coating on the surface of wood with improved UV resistance. *Applied Surface Science*. 321:38-42.

Wang, X. M., Lorimer, G., and Xiao, P. (2005). Solvothermal synthesis and processing of yttria-stabilized zirconia nanopowder. *Journal of the American Ceramic Society*. 88(4):809-816.

Wang, J., Yin, W., He, X., Wang, Q., Guo, M., and Chen, S. (2016). Good biocompatibility and sintering properties of zirconia nanoparticles synthesized via vapor-phase hydrolysis. *Scientific Reports*. 6:35020.

Wang, T., Yu, Q., Kong, J., and Wong, C. (2017). Synthesis and heat-insulating properties of yttria-stabilized ZrO₂ hollow fibers derived from a ceiba template. *Ceramics International*. 43(12):9296-9302.

Ward, D. A. and Ko, E. I. (1993). Synthesis and structural transformation of zirconia aerogels. *Chemistry of Materials*. 5(7):956-969.

Wu, J., Wang, X., Wang, C., Wei, X., and Quan, R. (2017). Regeneration of HA coating on porous ZrO₂ gradient bioceramics. *Transactions of the Indian Ceramic Society*. 76(4):252-257.

Zhang, G. L., Gao, X. M., and Xu, X. D. (2013). Microwave-

assisted synthesis of nanocrystalline zirconium dioxide using an ionic liquid. *Applied Mechanics and Materials*. 271:255-258.

Zhang, P., Yan, S., Li, S., Geng, Y., and Chen, W. (2018). Ceramic coatings formed on oxidation the surface in aluminate of ZrH_{1.8} system by micro-arc. In Y. Han (Ed.), *Advances in Energy and Environmental Materials: Proceedings of Chinese Materials Conference* (pp.179). China: Springer.

Zhao, J., Fan, W., Wu, D., and Sun, Y. (2000). Synthesis of highly stabilized zirconia sols from zirconium n-propoxidediglycol system. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 261(1-3):15-20.

Zhu, X. H. and Hang, Q. M. (2013). Microscopical and physical characterization of microwave and microwave-hydrothermal synthesis products. *Micron*. 44:21-44.

Zinatloo-Ajabshir, S. and Salavati-Niasari, M. (2016). Facile route to synthesize zirconium dioxide (ZrO₂) nanostructures: structural, optical and photocatalytic studies. *Journal of Molecular Liquids*. 216:545-551.



Imagen de: Tania Isela Sarmiento Muñoz

Estructura y diversidad de la vegetación leñosa en un área de matorral espinoso tamaulipeco con actividad pecuaria en Nuevo León, México

Structure and diversity of the woody vegetation in a Tamaulipas thornscrub with livestock activity in Nuevo León, Mexico

Tania Isela Sarmiento-Muñoz^{1,2}, Eduardo Alanís-Rodríguez¹, José Manuel Mata-Balderas^{2*}, Arturo Mora-Olivo³

RESUMEN

En el noreste de México existe un incremento en el establecimiento de pastizales para la ganadería, lo cual ha ocasionado cambios en la estructura y diversidad florística. El objetivo de la presente investigación fue determinar algunos parámetros dasométricos y de diversidad de los elementos leñosos presentes en un área de matorral espinoso tamaulipeco (MET), con actividad pecuaria, en el estado de Nuevo León, México, para establecer si las modificaciones realizadas contribuyen o no a la conservación de la diversidad vegetal. La actividad pecuaria que se realizaba en el área de estudio era un aprovechamiento mixto de moderada intensidad, con aclareos por lo bajo ($d < 5$ cm). Se seleccionaron cuatro sitios de muestreo de 1 600 m² cada uno. Se recolectaron datos sobre variables dasométricas y se obtuvieron índices ecológicos. Los resultados permitieron un registro de 8 familias, 16 géneros y 17 especies arbóreas y arbustivas. La densidad absoluta reportada fue de 309 individuos/ha, mientras que el área de copa estimada fue de 9 521.83 m²/ha. La riqueza ($D_a = 3.03$) y diversidad ($H' = 2.31$) específicas, resultaron en valores similares a matorrales sin actividad productiva. Las especies con mayor importancia dentro del área de estudio fueron características del MET: *Prosopis laevigata* (IVI = 28.59), *Havardia pallens* (IVI = 13.41) y *Cordia boissieri* (IVI = 8.89), de las cuales, *Prosopis laevigata* tiene antecedentes de uso forrajero. Se concluye que la composición de especies arbóreas y arbustivas en este sistema pecuario conserva atributos deseables de las comunidades vegetales nativas, como la riqueza de especies, diversidad, densidad y área de copa.

PALABRAS CLAVE: aclareo, riqueza, ganadería, atributos de conservación.

ABSTRACT

In the northeastern region of Mexico, there is an increase in the establishment of grasslands for livestock, which has created changes in the structure and floristic diversity of ecosystem. The aim of this study was to determine the structure and diversity of the woody species vegetation of an area of Tamaulipas thornscrub (MET) which was modified for livestock rising in Nuevo Leon, Mexico, to establish whether or not the changes have contributed to the conservation of plant diversity. The livestock activity practiced in the researched area is mixed purpose use at a moderate intensity, with a thinning treatment at the lower vegetation layer ($d < 5$ cm) to create open areas for cattle grazing in the study area. Four sampling plots of 1 600 m² each were selected. Dasometric measures were recorded and ecological indexes were estimated. The results are a record of 8 families, 16 genus and 17 species of trees and shrubs. The absolute density was 309/ha, while the estimated canopy area was 9 521.83 m²/ha. Richness ($D_a = 3.03$) and species diversity ($H' = 2.31$) resulted in similar values to scrubs with nonproductive activity. Species with the greatest IVI are characteristic of the MET: *Prosopis laevigata* (IVI = 28.59), *Havardia pallens* (IVI = 13.41) and *Cordia boissieri* (IVI = 8.89), from which, *Prosopis laevigata* is considered as a species for forage use. We conclude that the composition of the tree and shrub species in this livestock rising system contributes to preserving the desirable attributes of the native vegetation communities, such as richness and species diversity, density and canopy area.

KEYWORDS: thinning, richness, livestock use, conservation attributes.

*Correspondencia: manuelmata792@gmail.com/ Fecha de recepción: 13 de octubre de 2017/ Fecha de aceptación: 5 de abril de 2019/ Fecha de publicación: 29 de julio de 2019

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, carretera Linares-Cd. Victoria km 145, Apartado Postal 41, Linares, Nuevo León, México, C. P. 67700. ²Gestión Estratégica y Manejo Ambiental, S. C. ³Universidad Autónoma de Tamaulipas, Instituto de Ecología Aplicada.

INTRODUCCIÓN

Estudios recientes en México indican que, el factor de mayor influencia en la degradación de los ecosistemas y la biodiversidad, es el cambio del uso de la tierra (Sarukhán y col., 2015). De igual forma, la destrucción del hábitat y la fragmentación han tenido un gran impacto en los ecosistemas terrestres y acuáticos (Williams-Linera, 2002; Santos y Tallería, 2006; Rodríguez-Estrella y col., 2016). Por ejemplo, en 1976, la cobertura original de la vegetación primaria terrestre en el país se redujo en un 54 %, mientras que para 2011, la extensión original de la vegetación cubierta, en su condición primaria y secundaria, se menguó a 72 % según información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013). Sin embargo, recientemente, las tasas de deforestación han disminuido en muchas regiones del país, en parte debido a que las áreas restantes son inaccesibles, consideradas de bajo valor comercial o bien se encuentran bajo algún régimen de protección (Rosete-Vergés y col., 2014; FAO, 2016). Más allá de esto, actualmente, una parte significativa de la vegetación restante se compone de pequeños fragmentos aislados o está representada por el crecimiento secundario, es decir, vegetación en proceso de regeneración, después de ser sometida a perturbación de acuerdo a la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2009).

Un factor importante en el cambio del uso del suelo es la actividad pecuaria (Arriaga-Cabrera, 2009). De las 1 960 189 ha del territorio continental, a nivel nacional, aproximadamente 81 758 631 ha se identifican con uso de agostadero, enmontado o de otro tipo (INEGI, 2017). Esta situación se refleja en el norte de México, con el constante incremento de las actividades pecuarias y agrícolas (Návar-Chaidez, 2008; Cantú-Silva y col., 2017). Dichas prácticas han ocasionado cambios en la estructura del ecosistema y en su diversidad florística, con la consecuente pérdida de especies y material genético, invasión de especies generalistas y la alteración de las

funciones, como la polinización y dispersión de semillas, entre otros (Jiménez-Pérez y col., 2012; Moreno-Medina y col., 2017).

Actualmente se busca integrar el uso y la conservación de los recursos naturales con las necesidades productivas de la población (Maass y col., 2005; Jose, 2012; SAGARPA, 2013). Desde hace 30 años, en el sector agropecuario, han surgido prácticas, en las que se integra y combina el manejo de árboles o arbustos con ganado (Musálem, 2002; Sánchez y col., 2003). Constituyen actividades agroforestales, que se han empezado a utilizar por ganaderos, con el fin de incrementar la productividad de sus tierras y promover la conservación de los recursos naturales (CONAFOR, 2010; SAGARPA, 2013).

Los sistemas agroforestales brindan beneficios múltiples, como la dispersión de especies vegetales y la conservación de animales silvestres y el paisaje conjunto (Mahecha y Zoot, 2002; Barrance y col., 2009). En términos de productividad, se ha descrito que los árboles presentes en ellos, además de proveer madera para cercas y combustible, generan un microclima mediante la sombra, que el ganado aprovecha (Mitlohner y col., 2002). Estas prácticas han sido tema de estudio, principalmente en los trópicos y ecosistemas templados del continente y del país, enfocándose primordialmente a la productividad de los mismos (Sánchez y col., 2003; Ramírez y col., 2012; Rosales-Adame y col., 2014). Aunque, se ha preconcebido la importancia y el potencial ecológico que sostienen las especies arbóreas que los integran, la evidencia científica que comprueba estas afirmaciones es aún escasa, en particular en las comunidades vegetales áridas y semiáridas.

El matorral espinoso tamaulipeco (MET) es una comunidad vegetal semiárida, caracterizada por la presencia de una alta diversidad de plantas, con elevados valores de densidad en su estrato arbóreo-arbustivo (Cram y col., 2006; Alanís-Rodríguez y col., 2008; González-Rodríguez y col., 2010; Alanís-Rodríguez y col., 2015; Pequeño-Ledezma y col., 2017). Sin

embargo, es una de las comunidades en donde la ganadería extensiva ha sido practicada durante los últimos 350 años (Foroughbakhch y col., 2009), siendo esta una de las causas principales de su deforestación (Arriaga-Cabrera, 2009; Alanís-Rodríguez y col., 2015), por lo que resulta importante encontrar y aplicar nuevas prácticas de aprovechamiento que conserven las características mencionadas. En el MET se han reportado aproximadamente 80 especies maderables, de las cuales, 9 han sido destacadas con potencial agroforestal (Pando-Moreno y Villalón-Mendoza, 2001).

El objetivo de esta investigación fue evaluar algunos parámetros dasométricos y de diversidad de los elementos leñosos presentes en un matorral espinoso tamaulipeco (MET), sometido a la actividad pecuaria en el estado de Nuevo León, ubicado en la región noreste de México, para determinar si las modificaciones realizadas para este uso, contribuyen o

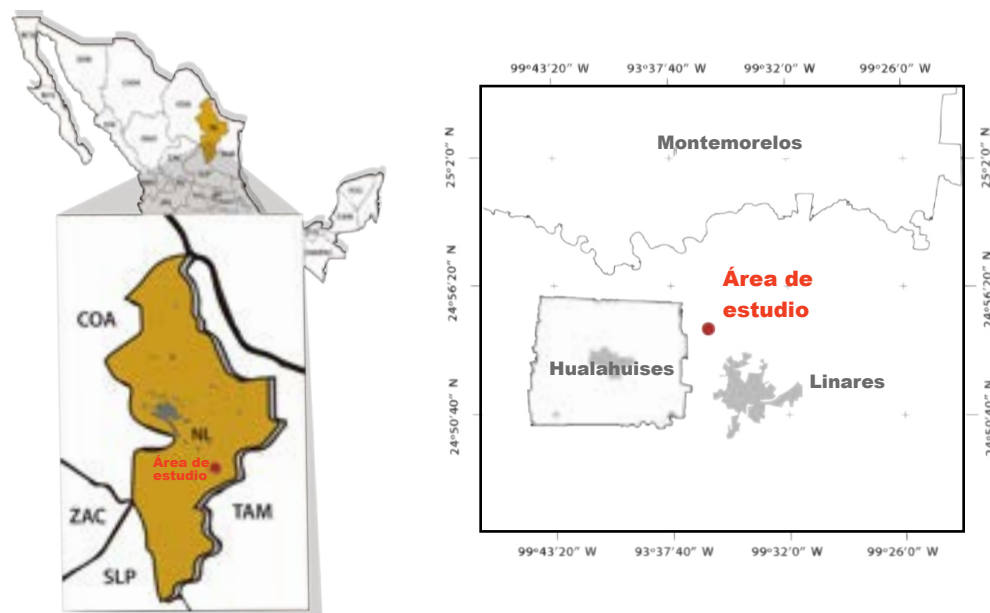
no, a la conservación de la diversidad vegetal, con base en estudios recientes del MET.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área se ubica en el ejido Emiliano Zapata, municipio de Linares, Nuevo León, en el noreste de México (Figura 1). Las coordenadas registradas están dentro del rango de los 24°54' N y los 99°35' W, en el suroeste de la región fisiográfica Llanura Costera del Golfo Norte (INEGI, 1986). El clima dominante en esta región es semicálido subhúmedo, con precipitación mayor a los 800 mm. El sistema de topografías pertenece a lomerío suave con bajada, con predominancia de suelos regosoles. Las posibilidades de uso pecuario son de pastoreo extensivo sobre vegetación natural distinta del pastizal (INEGI, 1986).

La vegetación principal es el MET, en el cual predominan las asociaciones de estratos ar-



■ Figura 1. En la imagen superior izquierda se destaca la ubicación del estado de Nuevo León en el mapa de México. En la imagen inferior izquierda se muestra la ubicación del área de estudio, dentro del estado de Nuevo León. A la derecha se destaca el área de estudio, dentro del municipio de Linares

Figure 1. On the upper left image, the location of the state of Nuevo Leon in Mexico is highlighted. The lower left image shows the location of the survey area in the state of Nuevo Leon. The Image at the right side shows the area under study in the Linares municipality.

bustivos altos o medianos y arbóreos altos, caracterizados en su mayoría por especies espinosas, con hojas compuestas (García-Hernández y Jurado, 2008; Alanís-Rodríguez y col., 2013). Las especies más representativas son *Castela texana* (Torr. & A. Gray) y Rose, *Celtis pallida* Torr., *Cordia boissieri* A. DC., *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes, *Parkinsonia texana* var. *macra* (I.M. Johnst.) Iseely, *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Wild.) M.C. Johnst., *Randia obcordata* S. Watson, *Sideroxylon celastrinum* (Kunth) T.D. Penn. y *Vachellia rigidula* (Benth.) Seigler & Ebinger, entre otras (Alanís-Flores, 1996; Jiménez-Pérez y col., 2013).

Análisis de la vegetación

En una superficie de 19 249 m² se realizaron aclareos por lo bajo en los años 2011 y 2012, eliminando la mayoría de los individuos con $d < 5$ cm. La intención de este manejo fue modificar la estructura de la comunidad vegetal existente, creando espacios abiertos para el establecimiento de pastos y permitir el desplazamiento del ganado. Sin embargo, se conservan los árboles y arbustos de diámetros mayores. Las copas de los árboles brindan sombra que favorece el resguardo del ganado en temporadas de calor y proporcionan una fuente de alimento para el ganado y las aves, en variadas épocas del año.

En junio del año 2013, se realizó la evaluación de la comunidad vegetal, mediante el establecimiento de 4 sitios de muestreo de 1 600 m² cada uno (33 % del área de estudio), distribuidos al azar. En los sitios de muestreo se evaluaron todas las especies arbóreas y arbustivas. Se registró la nomenclatura taxonómica de cada individuo y se realizaron mediciones de altura total (h), diámetro basal ($d_{0.5}$) y cobertura de copa, en sentido nort-sur y este-oeste.

El $d_{0.5}$ se midió a partir de las bifurcaciones que presentaron los individuos a mayor altura, ya que resulta más práctico y económico realizar una sola medición (Alanís-Rodríguez y col., 2008).

Análisis de la información

Para evaluar el significado ecológico de las especies arbóreas se estimaron los indicadores relativos de densidad (AR_i), dominancia (DR_i), frecuencia (FR_i) e índice de valor de importancia (IVI) (Müeller-Dombois y Ellenberg, 1974; Magurran, 2004), calculados a partir de las siguientes ecuaciones. La densidad relativa se obtuvo por medio de la densidad absoluta, y el cálculo de su valor relativo. Se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$A_i = N_i/S \quad (1)$$

Donde: A_i es la densidad absoluta de la especie i , N_i es el número de individuos de la especie i , y S la superficie muestral en ha.

$$AR_i = (A_i/\sum A_i) * 100 \quad (2)$$

Donde: AR_i es la densidad relativa de la especie i , A_i con respecto a la densidad total $\sum A_i$.

Para estimar la dominancia relativa también se empleó el uso de dos ecuaciones, la dominancia absoluta y el cálculo de su valor relativo. Se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$D_i = A_{bi}/S \quad (3)$$

Donde: D_i es la dominancia absoluta de la especie i , A_{bi} el área basal de especie i , y S la superficie muestral (ha).

$$DR_i = (D_i/\sum D_i) * 100 \quad (4)$$

Donde: DR_i es la dominancia relativa de la especie i , D_i con respecto a la dominancia total $\sum D_i$.

La frecuencia relativa se obtuvo calculando la frecuencia absoluta y posteriormente su valor relativo. Se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$F_i = P_i/NS \quad (5)$$

Donde: F_i es la frecuencia absoluta de la especie i , P_i es la frecuencia de la especie i en los sitios de muestreo, y NS el número total de sitios de muestreo.

$$FRi = (Fi/\Sigma Fi) * 100 \quad (6)$$

Donde: FRi es la frecuencia relativa de la especie i , con respecto a la frecuencia total ΣFi .

El índice de valor de importancia (IVI) se define como:

$$IVI = \frac{ARi + DRi + FRi}{3} \quad (7)$$

Donde: ARi es la densidad relativa de la especie i , DRi es la dominancia relativa de la especie i , y FRi es la frecuencia relativa de la especie i .

Para estimar la diversidad alfa y la riqueza de especies se utilizaron, el índice de Shannon-Wiener (H') (Shannon y Weaver, 1949) y el índice de Margalef (Clifford y Stephenson, 1975), respectivamente. El índice de Shannon-Wiener se estimó mediante la siguiente ecuación:

$$H' = - \sum_{i=1}^S pi * \ln(pi) \quad (8)$$

Donde: S es el número de especies presentes, $\ln$ es logaritmo natural y pi es la proporción de las especies, la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$pi = Ni/N \quad (9)$$

Donde: Ni es el número de individuos de la especie i y N es el número total de individuos.

Con el mismo significado de las variables en común, el índice de diversidad de Margalef (DMg) se estimó con la ecuación:

$$DMg = \frac{(S - 1)}{\ln N} \quad (10)$$

La distribución de las especies en tres diferentes zonas de altura se calculó mediante el índice de distribución vertical de Pretzsch (Pretzsch, 1996), el cual toma tres zonas de altura: zona I: 80 a 100 % de la altura máxima

de la población; zona II: 50 % a 80 %; zona III: 0 % a 50 %.

Posteriormente, se calculó el índice de distribución vertical de especies (A), el cual cuantifica la diversidad de especies y su ocupación en el espacio vertical en la población (Estrada-Castillón y col., 2005). El índice de distribución vertical se calculó de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$A = - \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^Z pij * \ln(pij) \quad (11)$$

Donde: S es el número de especies presentes; Z el número de zonas de altura y pij la proporción de especies en cada zona de altura, la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$pij = nij/N \quad (12)$$

Donde: nij es el número de individuos de la misma especie (i) en la zona (j) y N el número total de individuos.

Del índice A se derivan el $Amax$, que corresponde al valor máximo de A , dado por el número de especies (S) y zonas de altura (Z); y el $Arel$, que es la estandarización en porcentaje del índice A . Estos son indicativos de la distribución de las especies en los estratos de altura, de manera que, entre más cercano sea el valor de $Amax$ al índice de A , más se acerca el valor de $Arel$ al 100 %, lo cual se presenta cuando el número total de individuos se encuentra equitativamente distribuido entre estratos y especies (Rubio-Camacho y col., 2014).

$$Amax = \ln(S * Z) \quad (13)$$

Donde: $\ln$ es el logaritmo natural, S el número de especies y Z zonas de altura.

$$Arel = \left(\frac{A}{\ln(S * Z)} \right) * 100 \quad (14)$$

Para describir la estructura de la comunidad en términos de la densidad de cada especie, se utilizó un modelo que describe la relación gráfica entre el valor de la densidad (en una escala logarítmica) y las especies, en función de un arreglo secuencial de la más a la menos abundante (Martella y col., 2012).

RESULTADOS

Se registraron 17 especies arbóreas y arbustivas, distribuidas en 16 géneros y 8 familias de plantas vasculares (Tabla 1). La familia con mayor riqueza específica fue Fabaceae, con 8 especies.

Parámetros ecológicos

Densidad

La densidad absoluta, para el total del área de estudio, fue de 309 individuos/ha. Las 3 especies más abundantes fueron *Prosopis leavigata* (Humb. & Bonpl. ex Wild.) M. C. Johnst., *Havardia pallens* (Benth.) Britton & Rose y *Celtis pallida* Torr. (Tabla 2). La forma de la curva de la densidad de las especies (en una escala logarítmica) fue una Log-normal típica, con una línea de tendencia exponencial, la cual es muy útil cuando los valores de los datos aumentan o disminuyen a intervalos cada vez

■ **Tabla 1. Nombre científico y común, familia y forma biológica de las especies arbustivas y arbóreas registradas en un área de matorral espinoso tamaulipeco con actividad pecuaria en el noreste de México.**
Table 1. Common and scientific name, family and life form of the tree and shrub species recorded in a Tamaulipas thornscrub area with livestock activity in Northeastern, Mexico.

Nombre científico	Nombre común	Familia	Forma biológica*
<i>Celtis pallida</i> Torr.	Granjeno	Ulmaceae	Arbustiva
<i>Condalia hookeri</i> M. C. Jhonst.	Brasil	Rahmnaceae	Arbórea
<i>Cordia boissieri</i> A. DC.	Anacahuita	Boraginaceae	Arbustiva
<i>Diospyros texana</i> Scheele	Chapote	Ebenaceae	Arbórea
<i>Ebenopsis ebano</i> (Berland.) Barneby & J. W. Grimes	Ébano	Fabaceae	Arbórea
<i>Ehretia anacua</i> (Berland.) Barneby & J. W. Grimes	Anacua	Boraginaceae	Arbórea
<i>Eysenhardtia polystachya</i> (Ortega) Sarg.	Vara dulce	Fabaceae	Arbórea
<i>Havardia pallens</i> (Benth.) Britton & Rose	Tenaza	Fabaceae	Arbustiva
<i>Helietta parvifolia</i> Benth.	Barreta	Rutaceae	Arbórea
<i>Parkinsonia texana</i> var. <i>macra</i> (I. M. Johnst.) Isely	Palo verde	Fabaceae	Arbustiva
<i>Porlieria angustifolia</i> A. Gray	Guayacán	Zygophyllaceae	Arbustiva
<i>Prosopis laevigata</i> (Humb. & Bonpl. ex Wild.) M. C. Johnst.	Mezquite	Fabaceae	Arbórea
<i>Senegalia greggii</i> Britton. & Rose	Uña de gato	Fabaceae	Arbustiva
<i>Sideroxylon celastrinum</i> (Kunth) T.D. Penn.	Coma	Sapotaceae	Arbórea
<i>Vachellia farnesiana</i> (L.) Wight & Arn.	Huizache	Fabaceae	Arbustiva
<i>Vachellia rigidula</i> (Benth.) Seigler & Ebinger	Gavia	Fabaceae	Arbustiva
<i>Zanthoxylum fagara</i> (L.) Sarg.	Colima	Rutaceae	Arbustiva

*Especies con un solo fuste y diámetro promedio mayor a 10 cm se consideraron arbóreas.

■ Tabla 2. Densidad, dominancia, frecuencia e índice de valor de importancia (IVI) de las especies arbustivas y arbóreas registradas en un área de matorral espinoso tamaulipeco con actividad pecuaria en el noreste de México (ordenadas de acuerdo al IVI).

Table 2. Density, dominance, frequency and importance value index (IVI) of the tree and shrub species recorded in a Tamaulipan thornscrub area with livestock activity in Northeastern Mexico (ranked by IVI).

Nombre científico	Densidad absoluta (Ni/ha)	Densidad relativa (%)	Dominancia absoluta (m ² /ha)	Dominancia relativa (%)	Frecuencia relativa (%)	IVI (%)
<i>Prosopis laevigata</i>	63	20.39	5 341.21	56.09	9.30	28.59
<i>Havardia pallens</i>	59	19.09	1 128.20	11.85	9.30	13.41
<i>Cordia boissieri</i>	33	10.68	639.22	6.71	9.30	8.89
<i>Celtis pallida</i>	34	11.00	382.72	4.02	9.30	8.11
<i>Condalia hookeri</i>	31	10.03	439.95	4.62	6.98	7.21
<i>Vachellia rigidula</i>	22	7.12	442.90	4.65	6.98	6.25
<i>Ehretia anacua</i>	9	2.91	142.58	1.50	9.30	4.57
<i>Sideroxylon celastrinum</i>	20	6.47	195.20	2.05	4.64	4.39
<i>Senegalia greggii</i>	11	3.56	246.91	2.59	6.98	4.38
<i>Vachellia farnesiana</i>	5	1.62	168.24	1.77	4.65	2.68
<i>Ebenopsis ebano</i>	3	0.97	154.73	1.63	4.65	2.42
<i>Porlieria angustifolia</i>	5	1.62	34.90	0.37	4.65	2.21
<i>Zanthoxylum fagara</i>	3	0.97	41.23	0.43	4.65	2.02
<i>Parkinsonia texana</i> var. <i>macra</i>	5	1.62	118.22	1.24	2.33	1.73
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	2	0.65	27.62	0.29	2.33	1.09
<i>Diospyros texana</i>	2	0.65	14.98	0.16	2.33	1.05
<i>Helietta parvifolia</i>	2	0.65	3.02	0.03	2.33	1.00
Total	309	100.00	9 521.83	100.00	100.00	100.00

mayores (Figura 2). Se observa que el valor R^2 es 0.951 4, cercano a 1, lo cual indica un buen ajuste de la curva a los datos.

Dominancia

La cobertura de copa en el área fue de 9 521.83 m²/ha, lo que indica que, en general, existe un 95 % de la superficie cubierta por el dosel, y únicamente el 5 % se encuentra desprovista (asumiendo mínimo traslape de copas). *Prosopis leavigata* fue la especie dominante, con 56.09 % de la cobertura de copa de todas las especies en el área de estudio. La segunda especie en dominancia fue *Havardia pallens*, seguida de *Cordia boissieri*.

Frecuencia

Se registró la presencia de 5 especies en todos los sitios de muestreo, *Celtis pallida*, *Cordia boissieri*, *Ehretia anacua* (Berland.) Barneby & J. W. Grimes, *Harvardia pallens* y *Prosopis leavigata*, cada una con 9.3 % de frecuencia relativa (Tabla 2). Le siguen *Condalia hookeri* M. C. Jhonst., *Vachellia rigidula* y *Se-*

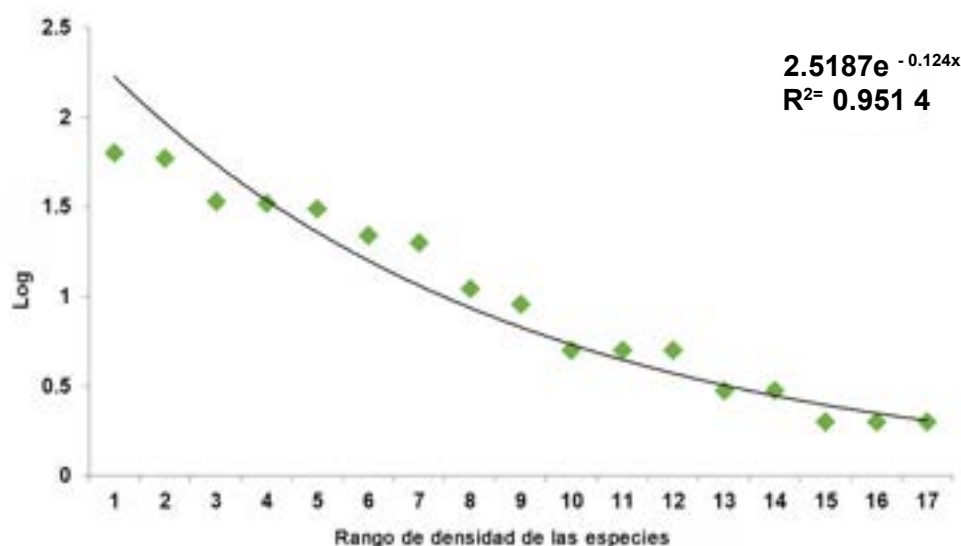
negalia greggii Britton. & Rose, con presencia en cuatro de los 5 sitios de muestreo.

Índice de valor de importancia (IVI)

La especie con mayor peso ecológico, según el índice de valor de importancia fue *Prosopis leavigata* (28.59 %), le siguen *Havardia pallens* y *Cordia boissieri*. Las especies con menor peso ecológico fueron *Helietta parvifolia* Benth. y *Diospyros texana* Scheele (Tabla 2).

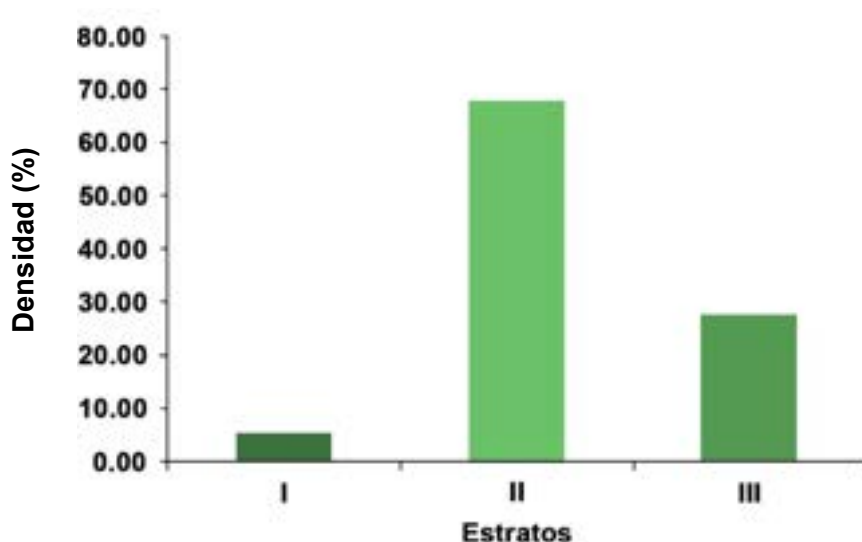
Distribución vertical de las especies

Las especies del estrato I registraron una densidad de 16 individuos/ha, del estrato II de 208 individuos/ha y del estrato III de 85 individuos/ha; lo que indicó que la comunidad vegetal era cohortal, es decir, que predominaba un solo estrato (II) (Figura 3). De acuerdo al índice de distribución vertical de especies (A), el estrato I (alto, de 9.85 m a 12.3 m) se encontraba conformado por las especies *Prosopis leavigata*, *Havardia pallens* y *Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn. En el estrato II (medio, de 6.16 m a 9.84 m), que fue el mejor re-



■ Figura 2. Curva de densidad de especies (escala logarítmica). En la esquina superior derecha se observa la ecuación que representa a la curva respecto al eje y, así como el ajuste de los datos a la curva.

Figure 2. Density curve (on a logarithmic scale) of the number of species. The upper right corner shows the equation that represents the curve referenced to y-values, as well as the adjustment of the data to the curve.



■ Figura 3. Distribución vertical de especies de un área de matorral espinoso tamaulipeco con actividad pecuaria en el noreste de México.

Figure 3. Vertical distribution of species in a Tamaulipas thornscrub area with livestock activity in Northeastern, Mexico.

presentado, más del 50 % de las especies fueron *Havardia pallens*, *Prosopis laevigata*, *Condalia hookeri* y *Vachellia rigidula*, entre otras, con menor presencia. *Havardia pallens* fue la especie predominante en este estrato. Por otro lado, el estrato III (bajo, menor a 6.16 m) se encontraba conformado casi en un 60 % por *Cordia boissieri*, *Celtis pallida* y *Sideroxylon celastrinum*, entre otras, con menor presencia; *Sideroxylon celastrinum* alcanzó la altura máxima de 6.14 m.

El índice de distribución vertical (A) fue de 2.88, con un A_{max} de 3.93 y un A_{rel} de 73 %, lo que indica uniformidad alta, en cuanto a la diversidad de altura.

Densidad de los individuos por clase diamétrica

Al analizar la densidad de individuos por ha, de acuerdo a las clases diamétricas, mediante un gráfico de barras, se observó una línea logarítmica, con tendencia negativa en la densidad de individuos, conforme aumenta el diámetro de los mismos (Figura 4). Las densidades mayores de individuos (≥ 60 individuos/ha), se concentraron en las clases diamétricas I y II.

Diversidad

El índice de Margalef (DM_g) fue de 3.03 y el índice de Shannon–Wiener (H') de 2.31.

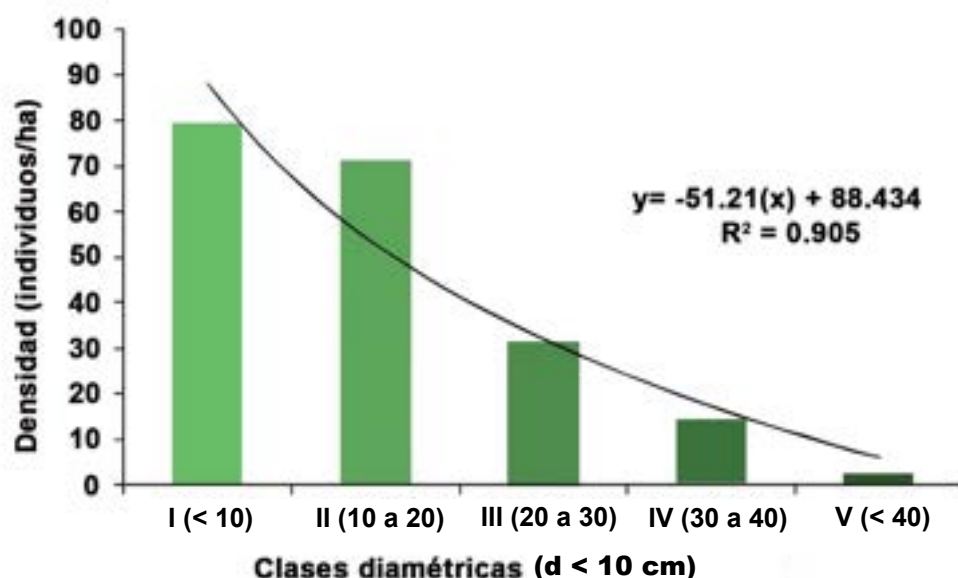
DISCUSIÓN

La familia con mayor número de especies fue Fabaceae, lo cual coincide con estudios recientes realizados en el MET, bajo diversas condiciones (Estrada-Castillón y col., 2005; González-Rodríguez y col., 2010; Jiménez-Pérez y col., 2012; Molina y col., 2013; Mora-Donjuán y col., 2013a; 2013b; Pequeño-Ledezma y col., 2017). Comparando con otras evaluaciones del MET, en donde se aplicó la misma metodología (igual número y dimensiones de los sitios de muestreo), la riqueza específica registrada fue mayor, que en áreas con regeneración pasiva e historial de pastoreo intensivo (Pequeño-Ledezma y col., 2012; Yerena-Yamallel y col., 2014), pero menor que en áreas sin disturbio reciente (Alanís-Rodríguez y col., 2011; Mora-Donjuán y col., 2013a; Yerena-Yamallel y col., 2014).

Parámetros ecológicos

Densidad

Havardia pallens, la segunda especie de mayor densidad relativa, en este estudio, ha sido re-



■ Figura 4. Densidad de individuos de acuerdo a clases diamétricas en el área de estudio.

Figure 4. Density of individuals according to diametric classes in the survey area.

portada como una de las tres especies con mayor densidad relativa en áreas de MET sin disturbio (García-Hernández y Jurado, 2008; Yereña-Yamallel y col., 2014) y en terrenos con historial de ganadería extensiva (Pequeño-Ledezma y col., 2012). Por el contrario, *Prosopis leavigata* y *Celtis pallida*, las cuales fueron también dos de las especies más abundantes en este trabajo, presentaron menor densidad en los estudios referidos, así como en el trabajo de Jiménez-Pérez y col. (2013), quienes analizaron áreas del MET con diferentes tipos de alteraciones.

La forma de la curva de densidad estuvo determinada por la densidad por especie, la cual sigue una distribución normal (Figura 2), con muchas especies con valores intermedios y pocas con valores mínimos o máximos de densidad. Este tipo de distribución se encuentra en la mayoría de las comunidades vegetales (Martella y col., 2012), como el MET en el presente estudio, donde las especies *Prosopis leavigata* y *Havardia pallens* fueron las que dominaron con valores máximos de densidad, mientras que *Eysenhardtia polystachya* (Ortega) Sarg., *Diospyros texana* y *Helietta parvifolia* registraron los valores mínimos (Tabla 2).

Dominancia

Frecuentemente, las especies reportadas como más dominantes en el MET, con historial pecuario y agrícola, son *Vachellia farnesiana* y *Vachellia rigidula* (Alanís-Rodríguez y col., 2008; Pequeño-Ledezma y col., 2012; Jiménez-Pérez y col., 2013; Mora-Donjuán y col., 2013b); Diferente a lo que reportaron Mora-Donjuán y col. (2013a; 2013b) en un área sin disturbio reciente, donde las especies dominantes fueron *Vachellia amentacea*, *Diospyros texana* y *Cordia boissieri*, con esta última presente en el sistema pastoreado. La suma total de la dominancia absoluta de las especies en el área de estudio (Tabla 2) es mayor a los registros de dominancia absoluta documentadas por Mora-Donjuán y col. (2013b), en sus tres áreas de estudio del MET (dos con historial pecuario y una sin disturbio).

Frecuencia

Los resultados del presente estudio, para este parámetro, difieren de los reportados por Alanís-Rodríguez y col. (2008); Jiménez-Pérez y col. (2012) y Pequeño-Ledezma y col. (2012), quienes evaluaron áreas del MET con algún grado de disturbio, ya que registraron no más de tres especies presentes en todos los sitios

de muestreo. Sin embargo, los resultados de este trabajo, concuerdan con los de Mora-Donjuán y col. (2013a), estudio de un área sin alteración reciente, donde se registraron que siete especies se encontraban en todos los sitios de muestreo. Lo anterior, prueba que, conforme más especies se encuentren en todos los sitios de muestreo, menos disturbio muestra el área evaluada, ya que, al no haber afectaciones graves en la comunidad vegetal, más especies tienen posibilidad de establecerse en diversos sitios, evitando que predominen un número reducido de especies en toda el área.

Índice de valor de importancia (IVI)

En el presente estudio, *Prosopis leavigata* fue la especie con mayor IVI (28.59 %), con una diferencia porcentual de 15.18 %, respecto a la siguiente especie *Havardia pallens*. Este estudio es el segundo que registra a *Prosopis leavigata* como la especie con el mayor IVI en el MET con uso ganadero (Alanís-Rodríguez y col., 2008; Jiménez-Pérez y col., 2012; Pequeño-Ledezma y col., 2012; Mora-Donjuán y col., 2013a; 2013b).

Prosopis leavigata presentó una densidad relativa (20.39 %) ligeramente superior a la de *Havardia pallens* (19.09 %). Sin embargo, su dominancia relativa (56.09) fue mucho mayor, con una diferencia de 44.24 % (Tabla 2). Esto indica una alta preferencia del manejador para conservar dicha especie, ya que, si se compara con otros estudios, que se han llevado a cabo para el MET, se observa que son otras las especies con mayor densidad, entre ellas, *Diospyros texana* y las del género *Vachellia* (Alanís-Rodríguez y col., 2008; Pequeño-Ledezma y col., 2012; Jiménez-Pérez y col., 2013; Mora-Donjuán y col., 2013a). Esta preferencia se adjudica al conocimiento sobre los múltiples usos del *Prosopis leavigata* (mejor conocido como mezquite) en la región, tales como leña, fuente de carbón, uso artesanal y de forraje (Estrada-Castillón y col., 2005), siendo el último de especial interés para la producción ganadera (Ríos-Saucedo y col., 2012).

Distribución vertical de las especies

Aunado a los resultados y siendo que el diámetro menor registrado fue de 4 cm (datos no mostrados), se tiene una comunidad vegetal que no se encontraba en regeneración, como otros matorrales (Alanís-Rodríguez y col., 2011; Jiménez-Pérez y col., 2012; Mora-Donjuán y col., 2013b), pero que tampoco tiene las condiciones óptimas de un matorral primario (Mora-Donjuán y col., 2013b; Yereña-Yamallel y col., 2014); sino que sus componentes conforman una masa irregular joven e incoetánea, en la cual, los árboles crecen principalmente en diámetro (Araujo e Iturre, 2006).

Diversidad

El valor de *DMg*, registrado en este estudio, fue superior al evaluado por Alanís-Rodríguez y col. (2008), en un área con historial de uso de ganadería intensiva y extensiva. También el índice de diversidad de Shannon-Wiener (H'), reportado en este trabajo, fue superior a los obtenidos en áreas con diferente historial de uso productivo (Alanís-Rodríguez y col., 2008; Jiménez-Pérez y col., 2012; Pequeño-Ledezma y col., 2012; Mora-Donjuán y col., 2013b; Molina-Guerra y col., 2013) e incluso comparado con áreas de MET sin alteración reciente (Mora-Donjuán y col., 2013a; 2013b). Una explicación de que los valores reportados en el estudio fueron superiores, con respecto a los reportados en las investigaciones mencionadas, sería que la comunidad evaluada se encontraba en un estado joven, donde la constante selección de especies crea nuevos espacios, que permiten que se establezcan otras especies o nuevos individuos.

CONCLUSIONES

La composición de especies arbóreas y arbustivas en el área de estudio conserva atributos cercanos a las comunidades de matorral espinoso tamaulipeco (MET) sin alteraciones, como la riqueza de especies, diversidad, densidad y área de copa. Sin embargo, en el manejo de selección de las especies destaca la preferencia por conservar individuos de altura distribuidas en el estrato II (6.16 m a

9.84 m), con diámetros de 10-20 cm, características de una comunidad vegetal irregular e incoetánea. La especie de preferencia fue *Prosopis laevigata*, deseable por ser multipropósito (fuente de leña y carbón, uso artesanal y forrajera). Se considera importante aumentar la investigación de los aprovechamientos mixtos en el noreste de México.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) por el financiamiento de la investigación mediante el proyecto “Análisis de la regeneración natural del matorral espinoso tamaulipeco en el noreste de México (PROMEP/103.5/12/3585)”. A Guadalupe Pérez, Mario Moreno y Juan Garza por su colaboración en el trabajo de campo.

REFERENCIAS

- Alanís-Flores, G. J. (1996). *Vegetación y flora de Nuevo León, una guía botánico-ecológica*. San Nicolás de los Garza: Impresora Monterrey, S.A. de C.V. 251 Pp.
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Jurado-Ybarra, E. y González-Tagle, M. A. (2008). Efecto del uso del suelo en la fitodiversidad del matorral espinoso tamaulipeco. *Ciencia UANL*. 11(1): 56-62.
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Canizales-Velázquez, P. A., González-Rodríguez, H., Mora-Olivo, A. (2015). Estado actual del conocimiento de la estructura arbórea y arbustiva del matorral espinoso tamaulipeco del noreste de México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. 2(7): 69-80.
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Yerena-Yamallel, J. I., Cuellar-Rodríguez, L. G. y Mora-Olivo, A. (2013). Análisis de la vegetación secundaria del matorral espinoso tamaulipeco, México. *Phyton*. 82(2): 185-191.
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Valdecantos-Dema, A., Pando-Moreno, M., Aguirre-Calderón, O. y Treviño-Garza, E. J. (2011). Caracterización de regeneración leñosa postincendio de un ecosistema templado del Parque Ecológico Chipinque, México. *Revista Chapin-go Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 17(1): 31-39.
- Araujo, P. A. e Iturre M. C. (2006). *Ordenación de Bosques Irregulares*. Cátedra de Ordenación Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. [En línea]. Disponible en: <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-28-Ordenacion-bosques-irregulares-ARAUJO.pdf>. Fecha de consulta: 20 de noviembre de 2013.
- Arriaga-Cabrera, L. (2009). Implicaciones del cambio de uso de suelo en la biodiversidad de los matorrales xerófilos: un enfoque multiescalar. *Investigación ambiental*. 1(1): 6-16.
- Barrance, A., Schreckenberg, K., and Gordon J. (2009). *Conservation through use: lessons from the Mesoamerican dry forest*. Londres: Overseas Development Institute. 124 Pp.
- Cantú-Silva, I., Estrada-Castillón, E., González-Rodríguez, H. y Delgado-Villalobos, J. A. (2017). Estructura y diversidad del matorral desértico rosetófilo rehabilitado con rodillo aireador, Coahuila, México. *Polibotánica*. (44): 95-107.
- Clifford, H. y Stephenson W. (1975). *An Introduction to Numerical Classification*. Nueva York: Academic Press. 229 Pp.
- CONABIO, Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2009). *Estado de Conservación y Tendencias de Cambio, en Capital Natural de México, vol. 2*. [En línea]. Disponible en: http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatMex/Vol%20II/II00_Preliminares%20Guia%20de%20lectura%20Indice%20Siglas.pdf. Fecha de consulta: 1 de noviembre de 2013.
- CONAFOR, Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2010). *Paquete tecnológico: Sistemas silvopastoriles*. [En línea]. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/SISTEMAS-SILVOPASTORIL.pdf>. Fecha de consulta: 13 de diciembre de 2013.
- Cram, S., Sommer, I., Morales, L. M., Oropeza, O., Carmona, E., and González-Medrano, F. (2006). Suitability of the vegetation types in Mexico's Tamaulipas state for the siting of hazardous waste treatment plants. *Journal of Environmental Management*. 80(1): 13-24.
- Estrada-Castillón, E., Villarreal-Quintanilla, J. y Jurado, E. (2005). Leguminosas del norte del estado de Nuevo León, México. *Acta Botanica Mexicana*. (73):1-18.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016). *Global Forest Resources Assessment 2015, How are the world's forests changing?* (Second edition). Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 44 Pp.
- Foroughbakhch, R., Hernández-Piñero, J. L., Alvarado-

- Vásquez, M. A., Céspedes-Cabriales, E., Rocha-Estrada, A., and Cárdenas-Ávila, M. L. (2009). Leaf biomass determination on woody shrub species in semiarid zones. *Agroforestry Systems*. 77(3): 181-192.
- García-Hernández, J. y Jurado, E. (2008). Caracterización del matorral con condiciones prístinas en Linares, N. L., México. *Ra Ximhai*. 4(1): 1-21.
- González-Rodríguez, H., Ramírez-Lozano, R. G., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M. V. y Uvalle-Sauceda, J. I. (2010). Composición y estructura de la vegetación en tres sitios del estado de Nuevo León, México. *Polibotánica*. (29): 91-106.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1986). Síntesis Geográfica de Nuevo León. [En línea]. Disponible en: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825220747>. Fecha de consulta: 1 de noviembre de 2013.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie V. [En línea]. Disponible en: <http://catalogo.datos.gob.mx/dataset/mapas-de-uso-del-suelo-y-vegetacion-escala-1-250-000-serie-v-nuevo-leon>. Fecha de consulta: 1 de noviembre de 2013.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). Encuesta Nacional Agropecuaria ENA 2017: Conociendo el campo de México, Resultados. [En línea]. Disponible en: http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/programas/ena/2017/doc/ena2017_pres.pdf. Fecha de consulta: 28 de febrero de 2019.
- Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., González-Tagle, M. A., Aguirre-Calderón, O. A., and Treviño-Garza, E. J. (2013). Characterizing regeneration of woody species in areas with different land history tenure in the tamaulipan thornscrub, Mexico. *The Southwestern Naturalist*. 58(3): 299-304.
- Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E. A., Ruíz-González, J. L., González-Tagle, M. A., Yerena-Yamallel, J. I. y Alanís-Flores, G. J. (2012). Diversidad de la regeneración leñosa del matorral espinoso tamaulipeco con historial agrícola en el noreste de México. *Ciencia UANL*. 15(58): 66-71.
- Jose, S. (2012). Agroforestry for conserving and enhancing biodiversity. *Agroforestry Systems*. 85(1): 1-8.
- Maass, J. M., Balvanera, P., Castillo, A., Daily, G. C., Mooney, H. A., Ehrlich, P., ..., and Martínez-Yrizar, A. (2005). Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society*. 10(1): 1-23.
- Magurran, A. (2004). *Measuring Biological Diversity*. Oxford: Blackwell Publishing Company. 264 Pp.
- Mahecha, L. y Zoot, M. S. (2002). El silvopastoreo: una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 15(2): 226-231.
- Martella, M., Trumper, E., Bellis, L., Renison, D., Gior-dano, P., Bazzano, G. y Raquel, M. (2012). Manual de Ecología: Evaluación de la biodiversidad. *Reduca (Biología) Serie Ecología*. 5(1): 71-115.
- Mitlohner, F. M., Galyean, M. L., and McGlone, J. J. (2002). Shade effects on performance, carcass traits, physiology, and behavior of heat-stressed feedlot heifers. *Journal of Animal Science*. 80(8): 2043-2050.
- Molina-Guerra, V. M., Pando-Moreno, M., Alanís-Rodríguez, E., Canizales-Velázquez, P. A., González-Rodríguez, H. y Jiménez-Pérez, J. (2013). Composición y diversidad vegetal de dos sistemas de pastoreo en el matorral espinoso tamaulipeco del Noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 4(3): 361-371.
- Mora-Donjuán, C. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Yerena-Yamallel, J. I. y Cuellar-Rodríguez, L. G. (2013a). Estructura, composición florística y diversidad del matorral espinoso tamaulipeco, México. *Ecología Aplicada*. 12(1): 29-34.
- Mora-Donjuán, C. A., Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., Rubio-Camacho, E., Yerena-Yamallel, J. I. y González-Tagle, M. A. (2013b). Efecto de la ganadería en la composición y diversidad arbórea y arbustiva del matorral espinoso tamaulipeco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 4(17): 124-137.
- Moreno-Medina, S., Ibarra-Flores, F. A., Martín-Rivera, M. H., Moreno-Álvarez, C. y Retes-López, R. (2017). Impacto económico del deterioro de los recursos naturales asociados con la eficiencia de la reproducción ganadera. *Revista Mexicana de Agronegocios*. 21(40): 649-659.
- Müeller-Dombois, D. and Ellenberg, H. (1974). *Aims and methods of vegetation ecology*. Nueva York: John Wiley & Sons Inc. 547 Pp.
- Musálem, M. A. (2002). Sistemas agrosilvopastoriles: Una alternativa de desarrollo rural sustentables para el trópico mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 8(2): 91-100.
- Návar-Chaidez, J. (2008). Carbon fluxes resulting from land-use changes in the Tamaulipan thornscrub of north-eastern Mexico. *Carbon Balance Management*. 3(1): 6.
- Pando-Moreno, M. and Villalón-Mendoza, H. (2001). Potential agroforestry species identified in the Tamaulipan thornscrub of north-eastern Mexico. *Agroforestry*

Today. 13(1-2): 14-15.

Pequeño-Ledezma, M. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A. y Molina-Guerra, V. M. (2017). Análisis estructural de dos áreas del matorral espinoso tamaulipeco del noreste de México. *Madera y Bosques*. 23(1): 121-132.

Pequeño-Ledezma, M. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Yerena-Yamallel, J. I., Cuellar-Rodríguez, G. y Mora-Olivo, A. (2012). Análisis de la restauración pasiva postpecuaria en el matorral espinoso tamaulipeco del noreste de México. *CienciaUAT*. 24(2): 42-47.

Pretzsch, H. (1996). *Strukturvielfalt als Ergebnis Waldbaulichen Handels*. Nehresheim: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Sekt. Ertragskunde. 849 Pp.

Ramírez-Marcial, N., Rueda-Pérez, M. L., Ferguson, B. G. y Jiménez-Ferrer, G. (2012). Caracterización del sistema agrosilvopastoril en la Depresión Central de Chiapas. *Avances de Investigación Agropecuaria*. 16(2): 7-22.

Ríos-Saucedo, J. C., Valenzuela-Nuñez, L. M., Rivera-González, M., Trucíos-Caciano, R. y Sosa-Pérez, G. (2012). Diseño de un sistema sil-vopastoril en zonas degradadas con mezquite en Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua*. 6(3): 174-180.

Rodríguez-Estrella, R., Benítez-Malvido, J., Del-Val-De-Gortari, E. y Santos-Barrera, G. (2016). Impacto de las actividades humanas en la biodiversidad y en los ecosistemas. En P. Balvanera, E. Arias, R. Rodríguez-Estrella, L. Almeida-Leñero, J. J. Schmitter-Soto (Eds.), *Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México* (pp. 57-189). Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Rosales-Adame, J. J., Cuevas-Guzmán, R., Gliessman, S. R., and Benz, B. F. (2014). Estructura y diversidad arbórea en el Sistema agroforestal de piña bajo sombra en el Occidente de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 17(1): 1-18.

Rosete-Vergés, F. A., Pérez-Damián, J. L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E. N., Salinas-Chávez, E. y Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques*. 20(1): 21-35.

Rubio-Camacho, E. A., González-Tagle, M. A., Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E. y Ávila-Flores, D. (2014). Diversidad y distribución vertical de especies vegetales mediante el índice de Pretzsch. *Ciencia UANL*. 17(65): 34-41.

SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2013). *Sistemas Silvopastoriles*. México: Subsecretaría de desarrollo rural,

SAGARPA. [En línea]. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/ desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Sistemas%20silvopastoriles.pdf>. Fecha de consulta: 15 de diciembre de 2013.

Sánchez, M. D., Rosales, M. y Murgueitio E. (2003). Agroforestería en América Latina. En M. D. Sánchez y D. Rosales-Méndez (Eds.), *Agroforestería para la producción animal en América Latina II* (pp. 1-12). Roma, Italia: FAO.

Santos, T., y Tallería, J. L. (2006). Pérdida y fragmentación del hábitat: efecto sobre la conservación de las especies. *Ecosistemas*. 15(2): 3-12.

Sarukhán, J., Urquiza-Haas, T., Koleff, P., Carabias, J., Dirzo, R., Ezcurra, E., and Soberón, J. (2015). Strategic Actions to Value, Conserve, and Restore the Natural Capital of Megadiversity Countries: The Case of Mexico. *BioScience*. 65(2): 164-173.

Shannon, C. E. and Weaver, W. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. Illinois, EUA: University of Illinois Press. 144 Pp.

Williams-Linera, G. (2002). Tree species richness complementarity, disturbance and fragmentation in a Mexican tropical montane cloud forest. *Biology and Conservation*. 11(10): 1825-1843.

Yerena-Yamallel, J. I., Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderon, O. A., González-Tagle, M. A., and Treviño-Garza, E. J. (2014). Dinámica de la captura de carbono en pastizales abandonados del noreste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 17: 113-121.

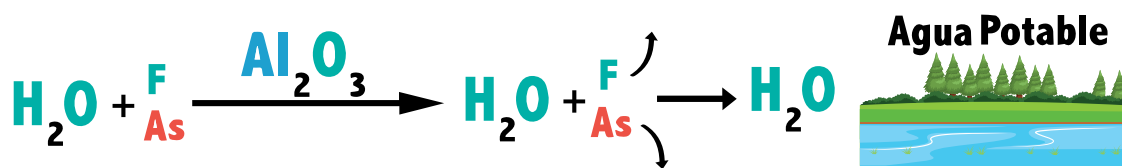


Imagen de [jemastock](#) en [freepik](#)

Cinética de la adsorción de fluoruro y arsénico usando nano-fibras de alúmina

Kinetics of the fluoride and arsenic adsorption using alumina nanofibers

Adrián Zamorategui-Molina^{1*}, Norma Leticia Gutiérrez-Ortega¹, Julio Del Ángel-Soto²

RESUMEN

En muchos países del mundo, incluido México, la presencia de elementos tóxicos, como el arsénico y flúor por encima de los niveles máximos permitidos en el agua potable (0.01 mg/L y 1.5 mg/L), respectivamente está generando problemas a la salud, como el cáncer y la fluorosis esquelética, respectivamente. El objetivo de este trabajo fue determinar la cinética del proceso de adsorción del fluoruro y arsénico en soluciones sintéticas, utilizando gamma alúmina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) para establecer si el proceso se desarrolla espontáneamente. Se sintetizó $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nano-fibrilar, con alta área superficial ($352 \text{ m}^2/\text{g}$), por precipitación homogénea, y se secó por espray. El nanomaterial adsorbente obtenido se usó para eliminar el fluoruro y el arsénico total de soluciones sintéticas. La morfología de la nano-fibra de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ mesoporoosa se analizó usando microscopía electrónica de transmisión y de barrido. El área superficial se determinó por adsorción-desorción a pH 7 de nitrógeno. Las isothermas de adsorción del proceso de remoción coincidieron con el modelo de Langmuir para ambos elementos. La $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ eliminó hasta 96 % de iones flúor y 92 % de arsénico total a pH 5, mientras que a pH 7 se alcanzó una remoción del 90 % y 94.2 % de fluoruro y arsénico, respectivamente. La cinética de remoción siguió el modelo de pseudo-segundo orden, y el parámetro de equilibrio adimensional y la energía libre estándar de Gibbs confirmaron que el proceso se desarrolló espontáneamente. La gamma alúmina nano-fibrilar permitió la remoción natural y espontánea de arsénico y fluoruro presente en las soluciones utilizadas en este estudio.

PALABRAS CLAVE: nano-fibras, Langmuir, cinética, energía libre.

ABSTRACT

In many countries of the world including Mexico, the presence of toxic elements such as arsenic and fluoride on the maximum levels permitted in drinking water (0.01 mg/L and 1.5 mg/L) is causing health problems such as cancer and skeletal fluorosis, respectively. For this reason, the objective of this work was to determine the kinetics of adsorption process of the fluoride and arsenic in synthetic water using gamma alumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) and to determine whether the process develops spontaneously. Nanofiber $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ with high surface area was synthesized by homogeneous precipitation and spray dry method. This adsorbent nanomaterial was used to remove fluoride and total arsenic from synthetic water. Nanofiber morphology of the mesoporous $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ was analyzed by transmission and scanning electron microscopy. The high surface area ($352 \text{ m}^2/\text{g}$) was determined by nitrogen adsorption-desorption. The adsorption isotherms of the removal process concur by the Langmuir model for both toxic elements. $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ removes up to 96 % of fluoride ions and 92 % of total arsenic at pH5, while a removal of 90 % and 94.2 % at pH7 of fluoride and arsenic, respectively, is achieved. The removal kinetics follows the pseudo-second order model, and the dimensionless equilibrium parameter and Gibbs standard free energy confirm that the process is performed spontaneously. The gamma nano-fibrillar alumina is a good material for the natural and spontaneous removal of arsenic and fluoride present in synthetic water used in this study.

KEYWORDS: nanofibers, Langmuir, kinetics, free energy.

*Correspondencia: zamorategui@ugto.mx/ Fecha de recepción: 5 de abril de 2018/ Fecha de aceptación: 22 de febrero de 2019/ Fecha de publicación: 29 de julio de 2019

¹Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, av. Juárez 77, Centro, Guanajuato, Guanajuato, México, C. P. 36000. ²Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas.

INTRODUCCIÓN

En varios países se ha informado sobre la presencia de altas concentraciones de arsénico (As) y flúor (F) en el agua potable extraída de fuentes subterráneas, y se sabe que pueden ser peligrosos para la salud humana. Entre los países se encuentran: Canadá, EE. UU., México, Chile, Argentina, Japón, China, India, Bangladesh, Taiwán, Polonia y Nueva Zelanda (Jadhav y col., 2015). Los problemas de As inorgánico están relacionados con su movilización bajo condiciones naturales. Algunas actividades, como la minería, la quema de combustibles fósiles y productos agroquímicos, como los herbicidas o aditivos a base de As producen una alta contaminación de las aguas superficiales y subterráneas (Singh y col., 2015; Varga y col., 2017). En el agua subterránea, la concentración de F varía con el tipo de roca por la que fluye. Este mineral se encuentra en el agua de mar, ríos y manantiales, en ciertos tallos de hierbas y en huesos y dientes de animales (Kanduti y col., 2016; Alconada-Magliano y col., 2017). Las aguas superficiales tienden a contener concentraciones más bajas de As en comparación con el agua subterránea, porque esta última está en contacto con depósitos de este y otros elementos tóxicos (Smedley y col., 2002).

La calidad del agua superficial o subterránea que se utiliza con fines domésticos, industriales o agrícolas, está en función de las influencias humanas y la composición química del suelo y el subsuelo. De acuerdo con las directrices de la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés: World Health Organization) (WHO, 2011) la concentración de F en el agua potable no debe exceder 1.5 mg/L y para la concentración de As, se ha adoptado el valor límite de 10 ppb (0.01 mg/L). Hoy en día, es necesario prestar mayor atención a los posibles daños futuros a la salud humana y al impacto ambiental causado por el F y el As presente en el agua usada para consumo humano (Jiang y col., 2013; Chhatwani y col., 2016).

Entre las técnicas utilizadas para la eliminación de As y F del agua potable extraída de

pozos, se encuentran el tratamiento biológico, la nano-filtración, coagulación, técnica de adsorción, proceso de membrana, técnicas de oxidación y desalinización como ósmosis inversa, electrodialisis, intercambio iónico y precipitación química. También se han usado algunos compuestos de hierro y minerales naturales (caolinita, hematita y feldespato) para la adsorción de As y F. Así mismo, se ha investigado la adsorción de elementos tóxicos del agua de pozo utilizando adsorbentes de bajo costo, como alúmina activada, carbón activado, quitosano, óxidos metálicos y otros adsorbentes (Saha y Sarkar, 2012; Rajasulochana y col., 2016; Singh y col., 2016).

La adsorción de iones de F y As es un proceso que se lleva a cabo en la superficie activa del material adsorbente, como los óxidos metálicos, entre los cuales, han adquirido importancia la alúmina activada y el óxido/hidróxido férrico. Sus superficies poseen grupos hidroxilo que están sujetos a reacción de protonación en contacto con el agua, y el grado de protonación o desprotonación depende de las propiedades de la superficie, como el potencial zeta (pZ) y su punto isoeléctrico (PIE), donde la carga neta es igual, debido al fenómeno de protonación o desprotonación. Para valores de pH por debajo del PIE, la superficie está predominantemente protonada y posee una carga neta positiva. En contraste, para un pH más alto que el pH del PIE, la superficie está predominantemente desprotonada y posee una carga negativa (Franks y Ganz, 2017).

Los aspectos cinéticos y termodinámicos del proceso de adsorción implican conocer su funcionamiento y mecanismos para su implementación. La cinética de adsorción permite determinar la capacidad de eliminación del lecho fijo del adsorbente en un sistema de flujo continuo, semicontinuo o discontinuo (Batch). Además, en base al análisis cinético del adsorbente, puede establecerse la velocidad de eliminación del soluto, que está relacionado con el tiempo de residencia requerido para completar el proceso de adsorción. Por lo tanto,

esto permite escalar un equipo de adsorción para algunas aplicaciones. La adsorción de iones de elementos tóxicos se ha estudiado en términos de la isoterma de adsorción de Langmuir, Freundlich y Temkin, permitiendo la evaluación de la capacidad efectiva del adsorbente. La velocidad de adsorción inicial y la constante de velocidad del proceso de adsorción se pueden evaluar utilizando modelos cinéticos. En función de la capacidad del adsorbente, estos modelos cinéticos consideran las ecuaciones de pseudo primer orden de Lagergren y pseudo segundo orden, que concuerdan con la fisisorción y la quimisorción, respectivamente, y la ecuación de Elovich (Ho, 2006; Qiu y col., 2009).

El objetivo de este trabajo fue estimar la cinética del proceso de adsorción de ion fluoruro (F^-) y arsénico (As), presente en el agua potable, utilizando gamma alúmina con morfología de nano-fibra, para evaluar si el proceso se desarrolla espontáneamente, en base a los valores de la energía libre de Gibbs.

MATERIALES Y MÉTODOS

La $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, con morfología nano-fibrilar y de alta área superficial, se sintetizó por precipitación homogénea, usando el método de secado por espray, como se describe a continuación. Se precipitó sulfato básico de aluminio (SBA) utilizando una mezcla de una solución de sulfato de aluminio 0.311 molar y una solución de bisulfito amónico con una densidad de 1.3 g/mL. La mezcla se calentó hasta alcanzar la temperatura de 90 °C, que se mantuvo durante 30 min con agitación constante a 350 rpm. El SBA se secó durante 10 h a 110 °C en horno (Torrero, HSM-101, Aguascalientes, México), obteniendo un polvo blanco muy fino. Para producir pseudoboehmita (PB), el SBA se neutralizó en solución de amoníaco a 70 °C con agitación constante de 350 rpm por 30 min. La PB $\text{AlO}(\text{OH})$ se filtró y se lavó con suficiente agua destilada, y después de eso, se secó por espray a 170 °C (Mini Spray Dry Yamato, ADL31-A, Tokio, Japón). Finalmente, la PB se trató térmicamente a 450 °C para obtener

el polvo de gamma alúmina (Zamorategui y col., 2012; Baneshi y col., 2014).

La identificación de fase y la cristalinidad del SBA, PB y $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ se analizaron por difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés: X-ray diffraction), usando el difractómetro Siemens (DRX, D500, Karlsruhe, Alemania) en el rango de 5° a 80°, con radiación de cobre monocromática $\text{CuK}\alpha$. La caracterización de la textura se realizó aplicando la técnica de adsorción/desorción de gas nitrógeno a la temperatura del nitrógeno líquido (77.4 K), utilizando el equipo ASAP 2010 (Micromeritics Instrument Corp., USA). El área de superficie específica y la distribución del tamaño de poro se determinaron mediante los métodos Brunauer-Emmett-Teller (BET) y Barret-Joyner-Hallenda (BJH), respectivamente. La Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) (Philips Tecnai F-20, Oregon, USA) se usó para establecer el tamaño y la morfología de las nano-fibras, y se utilizó la Microscopía Electrónica de Barrido con Emisión de Campo (FE-SEM) (JEOL JSM 7600F, Tokio, Japón) acoplada a un detector (QUANTAXEDS, Bruker, Berlín, Alemania) microanálisis de rayos X, para determinar la morfología y composición química de las nano-fibras aglomeradas. El tamaño de partícula y la magnitud de la repulsión/atracción electrostática, entre partículas (pZ), se analizaron en suspensiones acuosas al 5 %, en volumen del sólido, en solución de KCl 10 mM, utilizando la técnica electroacústica, usando el Acousto Sizer II (ESA, Colloidal Dynamics, USA).

Se usó una solución patrón de F (1 000 mg/L) para preparar las diluciones con agua desionizada a concentraciones conocidas, y el F remanente en el agua tratada final se midió con un electrodo selectivo de este ion (Orion, modelo SA 720, Thermo Scientific Orion, Beverly, USA). La solución estándar de As utilizada se obtuvo comercialmente (H_3AsO_4 en HNO_3 0.5 mol/L 1 000 mg/L As Certipur®). Para determinar la concentración de As remanente en el agua tratada se empleó la es-

pectrometría de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, por sus siglas en inglés: Inductively coupled plasma optical emission spectrometry).

El proceso de adsorción por lotes se realizó utilizando una relación de adsorbente-solución, de 10 g/L, es decir, 0.5 g de material adsorbente en 50 mL de las diluciones preparadas (soluciones sintéticas), con concentraciones iniciales por encima de los límites máximos establecidos por la OMS, desde 5 mg/L, hasta concentraciones de 200 mg/L de F^- y As en agua desionizada. La cantidad de adsorbente seleccionada se utilizó con el objetivo de manejar las mismas unidades de concentración de los dos contaminantes y con base en la capacidad de remoción reportada por algunos autores, expresada en mg/g de adsorbente (Mohan y Pittman, 2007; Zaspalis y col., 2007; Chakraborty y col., 2010; Nicomel y col., 2015). El experimento se llevó a cabo a pH 5 y 7, ajustado con ácido clorhídrico (0.1 M). Además, la temperatura (28 °C) del sistema se controló con un calentador 9106A11B. (Illinois, USA) manteniéndose con agitación magnética constante a 300 rpm. Con base en pruebas preliminares de la capacidad de remoción del

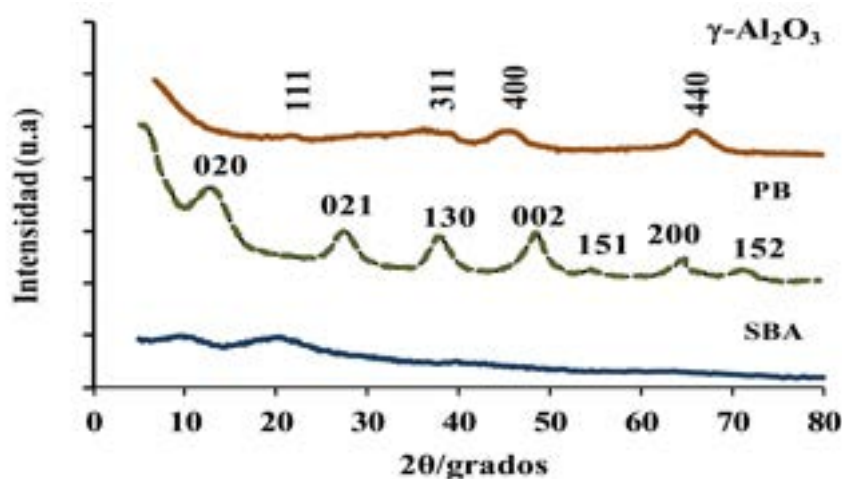
adsorbente en estudio, para alcanzar el equilibrio, las soluciones se mantuvieron a pH y temperatura constante por un periodo de 24 h durante el proceso de adsorción. Por último, las soluciones tratadas se filtraron para determinar las concentraciones finales de los iones fluoruro y arsénico.

Para determinar el pH óptimo del proceso de remoción máxima del fluoruro y arsénico en solución, la adsorción de iones en equilibrio se llevó a cabo con diferentes valores de pH (de 4 a 12), usando concentraciones iniciales de F^- y As de 10 mg/L, en medio acuoso. Lo anterior debido a que, en medios muy ácidos, a pH por debajo de 4 y medios muy básicos a pH superior a 12, el material adsorbente se ve afectado estructuralmente y se disuelve (Franks y col., 2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis XRD y de Espectroscopía por Energía Dispersiva de Rayos X (XEDS, por sus siglas en inglés: Energy-dispersive X-ray spectroscopy)

La Figura 1 muestra el difractograma de rayos X del SBA obtenido por precipitación homogénea, en él no se observan picos de XRD considerables, lo que indica que esto corresponde



■ Figura 1. Patrón de difracción de rayos X (XRD) del sulfato básico de aluminio (SBA), pseudoboehmita (PB) y $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (u.a., unidades arbitrarias).
Figure 1. X-ray diffraction (XRD) pattern of the Basic Aluminum Sulfate (BAS), Pseudoboehmite (PB) and $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (a.u., arbitrary units).

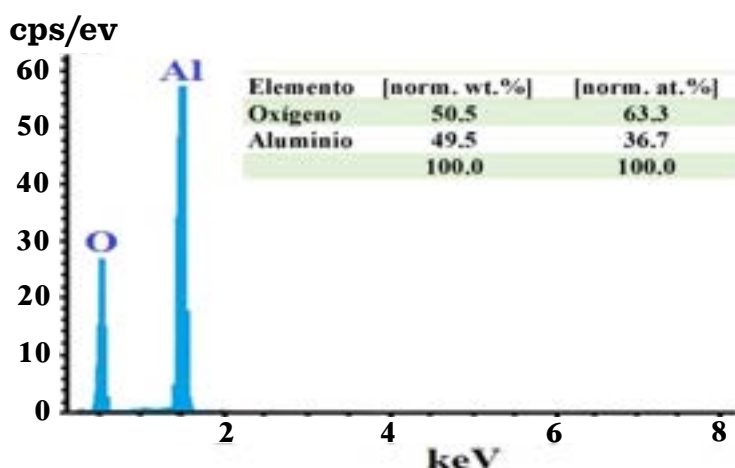
a un material amorfo con nula cristalinidad, concordando con la estructura amorfa reportada en otros estudios (Jiménez-Becerril y col., 2011). La precipitación homogénea garantiza la síntesis de precursores amorfos, como el SBA y la PB, para obtener gamma alúmina, con un área superficial específica alta y baja cristalinidad (Satoshi y col., 2001).

Con respecto a la PB, los ángulos de difracción (2θ), correspondientes a los planos cristalinos de la PB (020, 021, 130, 002, 151, 200 y 152), concuerdan muy bien con los reportados en el JCPDS No. 21-1307. Los picos de difracción anchos y con poca altura indican que el material tiene baja cristalinidad, con posibilidades de generar una gran área superficial. Además, los ángulos de difracción (2θ) de la γ - Al_2O_3 correspondientes a los planos 311, 400 y 440 son consistentes con aquellos reportados en el JCPDS No. 10-0425 para la γ - Al_2O_3 , y el patrón de difracción de rayos X del SBA presenta un bajo grado de cristalización, debido a los picos anchos y de baja intensidad (Jokanović y col., 2009; Hu y col., 2015; Shokati-Poursani y col., 2015).

La cristalización de un material aumenta la agregación de partículas, y esto origina una proporcionalidad inversa entre el área superficial y la cristalinidad del material, en consecuencia, hay una disminución del área es-

pecífica de la superficie. Es muy importante controlar la morfología y evitar el desarrollo de estructuras cristalinas durante el proceso de síntesis de materiales, para obtener una gran área de superficie en los adsorbentes, ya que esta propiedad está relacionada con sus propiedades fisicoquímicas o energía superficial, que induce una mayor capacidad de adsorción (Coria, 2011).

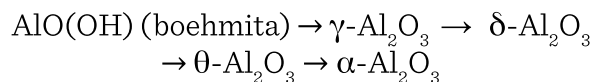
La Figura 2 muestra el espectro XEDS correspondiente a la composición química elemental de la γ - Al_2O_3 . En el FE-SEM, se utilizó un detector de EDS para separar los rayos X característicos de diferentes elementos en un espectro de energía, y el *software* del sistema EDS se utilizó para analizar el espectro de energía, con el fin de determinar la abundancia de elementos específicos. El detector EDS contiene un cristal que absorbe la energía de los rayos X entrantes por ionización. La absorción de rayos X convirtió la energía de los rayos X individuales en voltajes eléctricos de tamaño proporcionales, y así, los impulsos eléctricos corresponden a los rayos X característicos del elemento. Los resultados emitidos por el *software* revelaron que el 50.5 % en peso, o 63.3 % atómico, corresponde a oxígeno y el 49.5 % en peso (36.7 % atómico) es de aluminio. Este resultado se debe al hecho de que la γ - Al_2O_3 es una de las fases de transición más termodinámicamen-



■ Figura 2. Espectro de energía dispersiva de rayos X (EDS) del γ - Al_2O_3 .

Figure 2. Energy dispersive X-ray spectrum (EDS) of the γ - Al_2O_3 .

te estables del corindón ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) teniendo 52.93 % en peso de aluminio y 47.07 en peso de oxígeno. Como se sabe, la ruta de transformación del oxi-hidróxido de aluminio bohemítico bohemita y la secuencia de formación de las fases de transición se pueden representar de la siguiente manera (Lamouri y col., 2016).



Tamaño de partícula y morfología analizada mediante microscopía electrónica

La Figura 3a, tomada por FE-SEM muestra aglomerados porosos, con un tamaño de 0.4 micrómetros, aproximadamente, y presentan estructuras muy amorfas, conformadas por nano-fibras, que ocasionan grandes huecos o porosidades por su acomodo de forma irregular. Esta porosidad genera alta área superficial en la alúmina, favoreciendo sus propiedades como material adsorbente. Esta observación concuerda muy bien con los picos bajos y amplios, observados en los resultados de XRD, lo que indica una estructura con poca cristalina y con posibilidades de generar alta área superficial. La Figura 3b, tomada por TEM, muestra a las nano-fibras con una longitud de 100 nm y 4 nm de diámetro aproximadamente (Kabir y col., 2007). La morfología nano-fibrilar favorece la formación de mesoporos, por la dificultad de acomodarse simé-

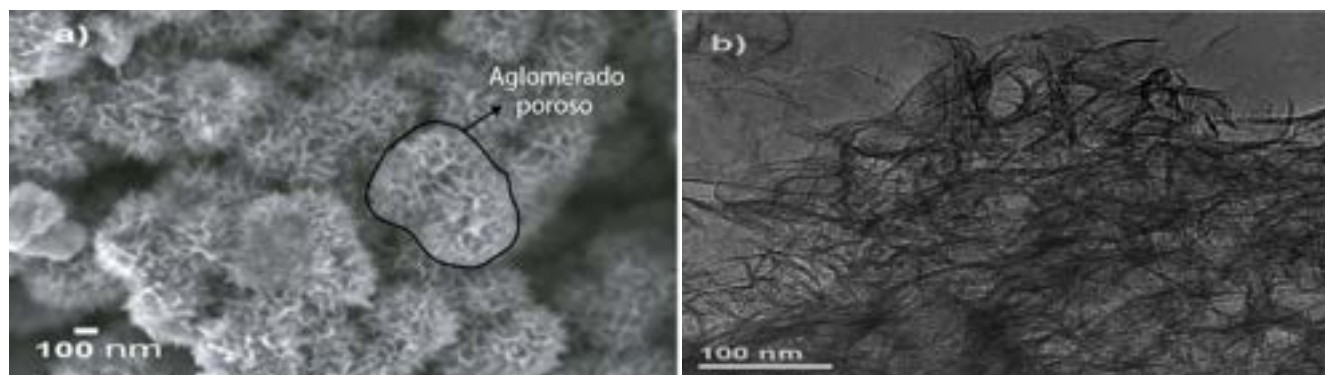
tricamente en los aglomerados, formando además porosidades irregulares que permiten una buena adsorción superficial y complican el proceso de desorción.

Isoterma de adsorción/desorción de N_2 y distribución del diámetro de poro

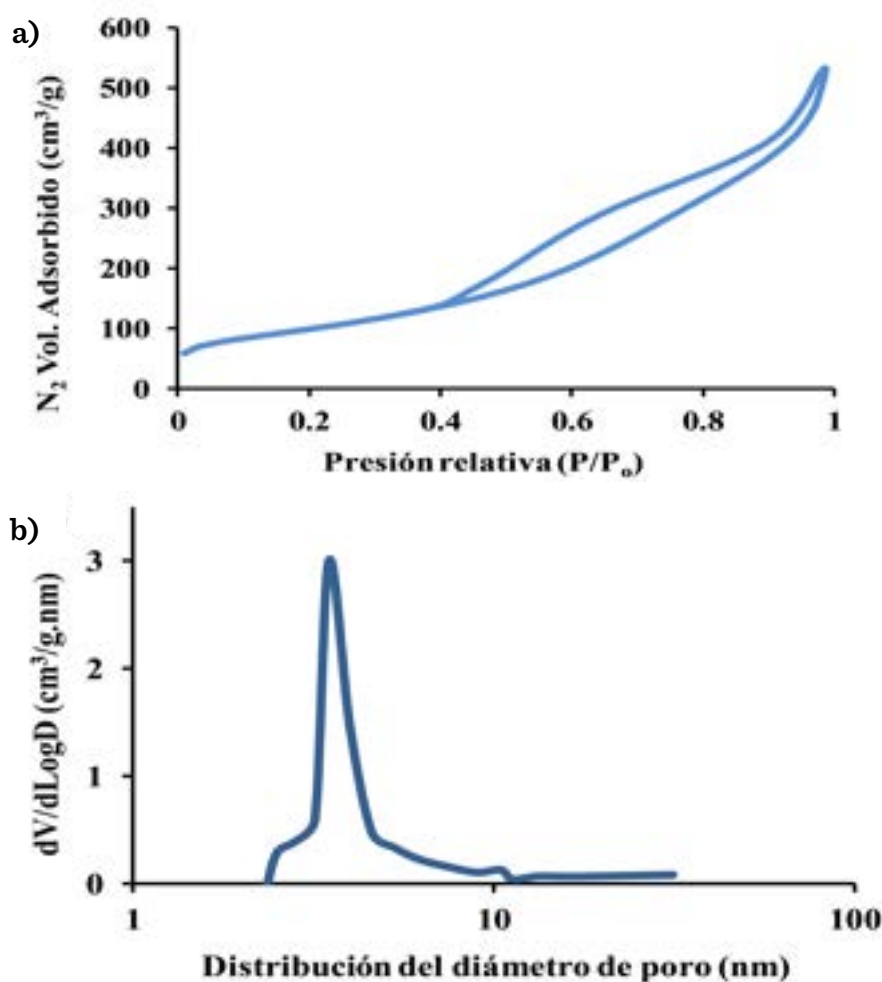
La isoterma de adsorción-desorción de N_2 , a 77 K, en la $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nano-fibrilar, se muestra en la Figura 4a. La $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ presenta una isoterma tipo IV, según la definición IUPAC, que es característica de un material mesoporoso (Kim y col., 2007), lo cual coincide con las imágenes obtenidas por FE-SEM (Figura 3a), donde se observan mesoporos generados por las nano-fibras y distribuidos irregularmente en los aglomerados. La isoterma de forma irregular con el ciclo de histéresis tipo E confirma que los poros en el aglomerado tienen una forma irregular, conocidos como tipo tintero. La nano-fibra sintetizada por precipitación homogénea y técnica de secado por spray presentó 352 m^2/g de superficie específica, calculada por el método BET; y la distribución promedio del diámetro de poro (7.8 nm) (Figura 4b), el volumen de poro de (0.749 8 cm^3/g) y diámetro máximo de poro (4.14 nm) se determinaron usando el método de BJH (Siahpoosh y col., 2016).

Potencial zeta y tamaño de aglomerado

La Figura 5 muestra el perfil del pZ típico de la $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ y la variación del tamaño del aglo-



■ Figura 3. Micrografía de las nano-fibras de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$: a) FE-SEM y b) TEM.
Figure 3. a) FE-SEM and b) TEM micrograph of nanofiber $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

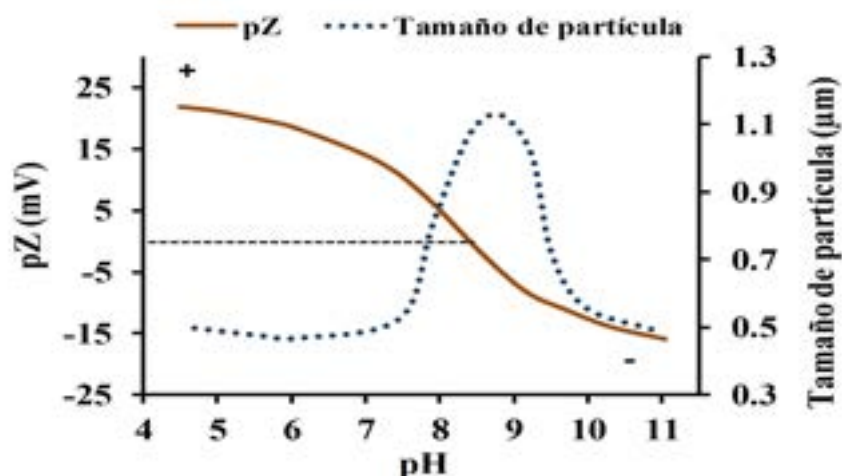


■ Figura 4. a) Isotherma de adsorción-desorción de N_2 y b) diámetro de poro de la $\gamma-Al_2O_3$.
Figure 4. a) N_2 adsorption-desorption isotherm and b) Pore diameter of the $\gamma-Al_2O_3$.

merado de las nano-fibras, de acuerdo con el cambio de pH. Los cambios en la carga superficial de la partícula reflejan el PIE, donde las cargas positiva y negativa son iguales, y las nano-fibras se aglomeran drásticamente. Se encontró que el PIE tenía un pH de 8.7, y esto es consistente con otros datos reportados (Parida y col., 2009; Anielak y Grzegorzczuk-Nowacka, 2011; Avci y col., 2016). El conocimiento del comportamiento de las nano-fibras de $\gamma-Al_2O_3$, en medio acuoso, es muy importante para definir el pH óptimo en el proceso de adsorción y evitar la liberación de algunas especies de aluminio en el agua, por su grado de solubilidad. Como se ha informado, la $\gamma-Al_2O_3$ tiene una solubilidad determinada en agua y esto depende del pH de la solución, la temperatura y otras especies ióni-

cas. La solubilidad aumenta significativamente a medida que el pH disminuye por debajo de pH 4 o cuando el pH aumenta por arriba de pH 10. La $\gamma-Al_2O_3$ es más estable en el rango de pH 5 y 9.5, aproximadamente, y el proceso de adsorción puede conducir a mejores resultados en este intervalo de pH, con menos especies de aluminio en la solución (Franks y col., 2007).

El pZ en la dispersión de $\gamma-Al_2O_3$ es moderadamente alto, ya sea por debajo o por arriba del PIE, es decir, para partículas con carga positiva y negativa, respectivamente. Estos cambios en la zona de mayor potencial pueden mejorar el proceso de adsorción. Además, por debajo de pH 7, la suspensión tiene un tamaño de aglomerado pequeño, lo que



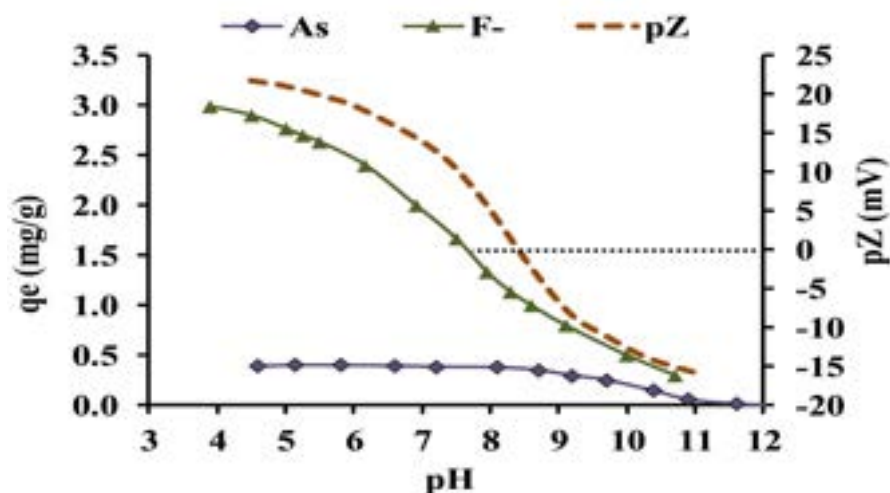
■ Figura 5. Efecto del pH sobre el potencial zeta (pZ) y el tamaño de partícula de la $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.
Figure 5. Effect of the pH on the Zeta potential (pZ) and the $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ particle size.

concuera con los valores máximos del pZ obtenidos a estos valores de pH. El tamaño del aglomerado aumenta drásticamente desde pH 7.5, alcanzando su valor máximo en el PIE, que denota una alta floculación, porque las fuerzas de repulsión electrostáticas disminuyen a medida que se vuelven comparables o iguales a las fuerzas de atracción de Van der Waals entre partículas y se neutralizan. Finalmente, el tamaño del aglomerado disminuye a un pH aproximado de 10, ya que las partículas adquieren mayor carga negativa, generando defloculación por arriba del PIE, produciendo una dispersión estable. Por lo antes mencionado, la variación del pZ, debido a la carga superficial generada sobre la partícula a diferentes valores de pH, es particularmente importante en el proceso de adsorción, ya que cada material adsorbente tiene un PIE característico que define el rango de pH donde tiene mayor capacidad de adsorción. De esta manera, la superficie activa de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ que está compuesta de átomos que tienen enlaces vacíos o vacantes, puede reaccionar con algunos iones positivos o negativos en medios acuosos ácidos o básicos. La $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ es un material sólido, anfótero, que puede reaccionar tanto como un ácido o como una base, debido al tipo de coordinación del catión de aluminio con el grupo hidroxilo de la superficie (Carre y col., 2008).

Efecto del pH sobre el proceso de adsorción

La Figura 6 muestra el comportamiento de la adsorción y el perfil de pZ con respecto a la variación del pH. Como se mencionó, las cargas superficiales del adsorbente son afectadas con la variación del pH, y con ello el proceso de adsorción se ve afectado. La máxima capacidad de remoción del F y el As total se observan a bajo pH (pH 5), muy lejos del PIE (pH 8.7), y la capacidad mínima se observa a pH alto (pH 10). Este comportamiento de la eliminación puede atribuirse al hecho de que, a un pH bajo, el adsorbente tiene una carga superficial positiva, que promueve mayores atracciones electrostáticas con la carga negativa del F^- y las especies de As. Por el contrario, a pH alto, después del PIE, el cambio de carga superficial (positivo a negativo), en el adsorbente, disminuye la atracción electrostática.

El proceso de adsorción continúa ligeramente después del PIE, debido a los sitios ácidos remanentes (cargas positivas internas) en la estructura de la alúmina, sin embargo, se observa que la capacidad de adsorción se reduce drásticamente. Con respecto a la adsorción de As, esta permanece casi constante para un pH inferior a 8, y luego disminuye significativamente para condiciones de pH mayores. Para pH inferior a 8, la carga superficial



■ Figura 6. Efecto del pH de la solución sobre la adsorción del fluoruro y arsénico.

Figure 6. Effect of the solution pH on the fluoride and the total arsenic adsorption.

de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ es positiva, y las especies de As predominantes poseen carga negativa: H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-} , que son atraídas por la carga superficial positiva del adsorbente (Nordstrom y col., 2017). Finalmente, como se ha publicado (Rathore y Mondal, 2017) el proceso de adsorción depende del pH, y la adsorción máxima se obtiene en la zona con pZ alto, alrededor de pH 5. Por lo tanto, el mejor valor de pH para la adsorción concuerda con las condiciones estables de pH para $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nano-fibrilar, como se muestra en las Figuras 5 y 6.

Isoterma de adsorción de Langmuir

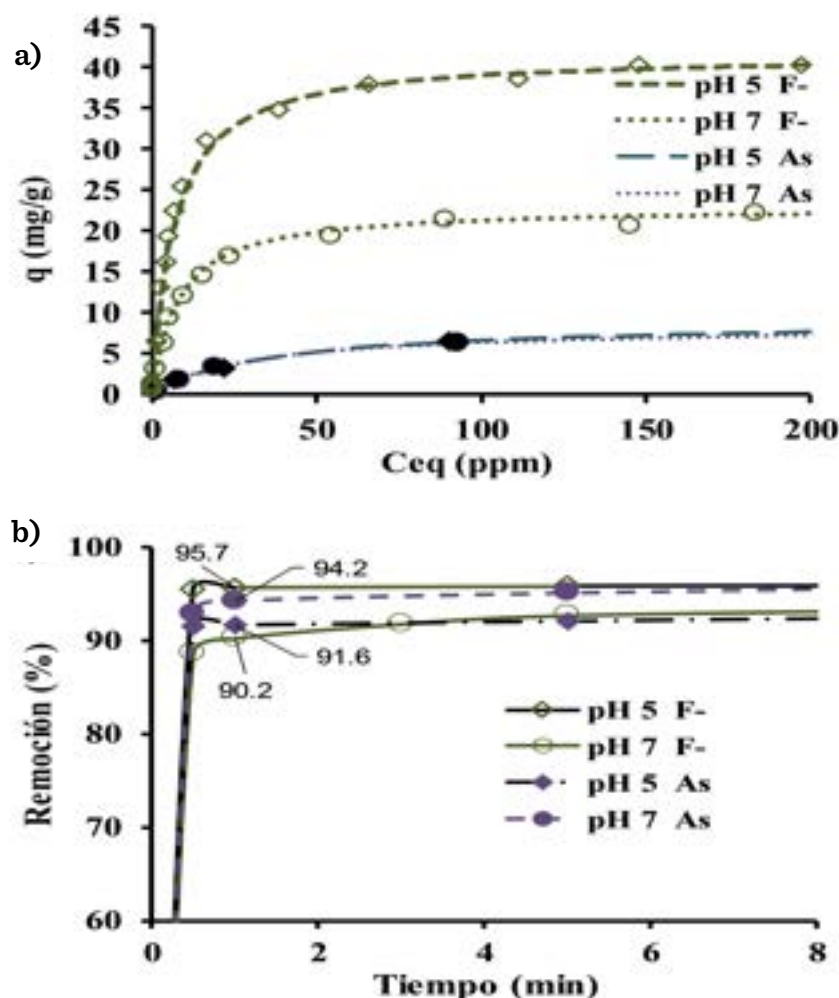
Es muy importante seleccionar el material adsorbente adecuado y conocer su máxima capacidad de adsorción, así como su comportamiento fisicoquímico. La adsorción puede ser un fenómeno fisicoquímico (reversible o irreversible) con base en la naturaleza de las fuerzas y enlaces entre la superficie adsorbente y las moléculas que se adsorben. Se atribuye principalmente a la interacción de los grupos hidroxilo de la superficie de la alúmina con los iones, átomos o moléculas, a través de diversos mecanismos, tales como reacciones donador-receptor de electrones y/o formación de complejos metálicos en la superficie del óxido (Kundu y col., 2007 y Yang y col., 2017).

Se han estudiado algunos modelos de isotermas (Langmuir, Freundlich, Temkin y Dubinin-Radushkevich) para comprender cómo interactúa el adsorbato con el adsorbente, y establecer la correlación más adecuada para las condiciones de equilibrio en el proceso de adsorción (Habuda-Stanić y col., 2014). Las isotermas de adsorción del F y el As sobre la alúmina nano-fibrilar se muestran en la Figura 7a, concordando en ambos casos con la ecuación de Langmuir, y con los resultados reportados por otros investigadores (Mohan y Pittman, 2007; Jain y Agarwal, 2017) que se representa como:

$$q_e = K_L \cdot Q_{\max} C_e / (1 + K_L C_e) \quad (1)$$

Dónde:

q_e es la cantidad de F o As adsorbido por gramo de adsorbente, K_L es la constante de Langmuir (L/mg), $Q_{\max}$ es la cantidad máxima de F o As por unidad de peso del adsorbente para formar una monocapa completa en la superficie (mg/g) y C_e es la concentración de F o As que queda en solución. Se observa que la tendencia de la isoterma de F es más pronunciada que la observada para el As, y con un cambio más pronunciado en la forma de la isoterma. Esto es indicativo de que ambos procesos de adsorción son diferentes, como se observó en los resultados obtenidos en el efecto del pH sobre



■ Figura 7. a) Isotermas de Langmuir y b) Influencia del tiempo de contacto en la eficiencia de remoción de fluoruro y arsénico.

Figure 7. a) Langmuir isotherms and b) Influence of contact time on removal efficiency of the fluoride and arsenic.

el proceso de adsorción. La Tabla 1 resume los parámetros de la ecuación de Langmuir a pH 5 y pH 7.

Como ya se mencionó, la adsorción del F^- , usando $\gamma-Al_2O_3$ mesoporosa, depende del pH inicial de la solución, y esto se puede ver en la Figura 7a, donde la capacidad de adsorción máxima de 41.6 mg/g se obtiene a pH 5, en comparación con 22.9 mg/g obtenido a pH 7. Por otro lado, como se discutió anteriormente, la adsorción de As total permanece casi constante a pH por debajo de 8 (Figura 6). Además, estos resultados concuerdan con la máxima capacidad de remoción de fluoruro a pH 5 y de arsénico a pH 7 (Tabla 1; Figura 7b),

encontrándose que la $\gamma-Al_2O_3$ nano-fibrilar presenta mayor capacidad (41.6 mg/g), comparada con lo reportado de 1.566 mg/g a pH 5 para el fluoruro, y mayor capacidad (9.84 mg/g) de remoción de As, comparada con lo reportado de 0.090 9 mg/g (Das y col., 2013; Habuda-Stanić y col., 2014; Jadhav y col., 2015). Chinnakoti hace una evaluación comparativa de la capacidad de adsorción de fluoruro con alúmina con tamaño de nanopartícula y otras reportadas, indicando que la alúmina con tamaño de nanopartícula tenía mayor capacidad de adsorción de 32 mg/g, comparada con las reportadas, sin embargo, menor que la obtenida en este estudio de 41.6 mg/g. Esta capacidad de remoción indica que la cantidad

■ Tabla 1. Resumen de los parámetros de la ecuación de Langmuir (pH 5 y 7).

Table 1. Summary of the Langmuir equation parameters (pH 5 and 7).

Muestra (pH 5)	K_L (L/mg)	Q_{max} (mg/g)	R^2 (Corr.)	Ecuación de Langmuir
Flúor	0.158	41.6	99.2	$q_e = (0.158) \cdot (41.6 \text{ Ce}) / (1 + 0.15 \text{ Ce})$
Arsénico	0.036	8.36	97.78	$q_e = (0.036) \cdot (8.36 \text{ Ce}) / (1 + 0.036 \text{ Ce})$
Muestra (pH 7)	K_L (L/mg)	Q_{max} (mg/g)	R^2 (Corr.)	Ecuación de Langmuir
Flúor	0.128	22.9	99.4	$q_e = (0.128) \cdot (22.9 \text{ Ce}) / (1 + 0.128 \text{ Ce})$
Arsénico	0.035	9.84	99.3	$q_e = (0.035) \cdot (9.84 \text{ Ce}) / (1 + 0.035 \text{ Ce})$

de F removido depende de la cantidad de adsorbente utilizado en el proceso de adsorción. En este caso de estudio, un gramo de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nano-fibrilar, por litro de solución, permite tratar el agua con concentración máxima de 22.9 mg/L de F para reducir su contenido por debajo del límite máximo permisible recomendado por la OMS (1.5 mg/L) a pH 7. En el caso del As, para reducir su concentración por debajo del límite máximo permisible por la OMS (0.01 mg/L), se requiere que el agua a tratar tenga concentraciones de hasta 10 mg/L, con base en la capacidad máxima de adsorción de la $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (9.84 mg/g) a pH 7.

La influencia del tiempo de contacto en la eficiencia de eliminación de F^- y As con $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ a pH 5 y 7, se muestra en la Figura 7b. Se usaron soluciones de 50 mg/L de fluoruro y 10 mg/L de soluciones de As sobre la base del límite máximo establecido en la OMS. Como se puede ver, la tasa máxima de eliminación del contaminante se logró durante el primer minuto, y la eliminación máxima se observó para el F^- en ese momento (95.7 %) a pH 5, en comparación con lo que se observa para el As (91.6 %) a pH 5, y el porcentaje de eliminación a pH 7 fue 90.2 % para F y 94.2 % para As. Este tiempo de un minuto para la remoción del 94.2 % de As a pH7, es mucho menor comparado con los 60 min reportados para la remoción del 97 % de As al mismo pH (Jain y Agarwal, 2017).

Los resultados indican que la adsorción de F^- y As, presentes en las soluciones usadas en este estudio, pueden eliminarse fácilmente, utili-

zando nano-fibras de alúmina activada ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$). De hecho, como se puede ver en la Figura 7a, la capacidad máxima para el As total es menor que la obtenida para el fluoruro, debido a que, durante el proceso de adsorción, la concentración de As presente en la solución satura más rápido la carga superficial del material adsorbente. Pero sobre la base del límite máximo establecido en la OMS, este resultado se encuentra dentro del límite para el As (0.01 mg/L). Sin embargo, la isoterma de Langmuir no predice el mecanismo de adsorción de F^- y As, siendo necesario analizar el modelo cinético del proceso de adsorción.

Cinética de adsorción

Se examinó el mecanismo que controla el proceso de adsorción, usando los modelos cinéticos de pseudo primero y pseudo segundo orden en su forma linealizada. Las concentraciones iniciales de F y As utilizadas para el estudio de la cinética de adsorción fueron 50 mg/L y 0.5 mg/L, respectivamente. Se analizaron las concentraciones finales o remanentes durante el proceso de adsorción de los contaminantes. Como se ha reportado, la ecuación simple de velocidad de adsorción, de pseudo primer orden de Lagergren, se representa como (Das y col., 2013; Zhang y col., 2014):

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2)$$

Dónde:

q_e y q_t (ambos en mg/g) son la cantidad de F^- y de As adsorbidos por unidad de masa de alúmina en equilibrio y tiempo t (min), respectivamente, y k_1 es la constante de veloci-

dad (min). El gráfico lineal de $\ln(q_e - q_t)$, frente al tiempo, se muestra en la Figura 8a, y los parámetros se resumen en la Tabla 2.

El modelo cinético lineal de pseudo segundo orden tiene la ecuación:

$$t/q_t = 1/h + t/q_e \quad (3)$$

Dónde:

$q_t = q_e^2 \cdot k_2 \cdot t / (1 + q_e \cdot w k_2 \cdot t)$ es la cantidad de adsorbato sobre la superficie del adsorbente en cualquier momento (mg/g), k_2 es la constante de velocidad de pseudo segundo orden (mg/g·min), q_e es la cantidad de contaminante adsorbido en equilibrio (mg/g) y la tasa de adsorción inicial, $h = k_2 \cdot q_e^2$ (mg/g·min). El valor de q_e (1/pendiente), k_2 (pendiente²/intersección) y h (1/intersección), de la ecuación de pseudo segundo orden, se obtuvo experimentalmente, trazando t/q_t contra t para la adsorción de F^- y As a 301 K. Los parámetros obtenidos para el modelo cinético de pseudo segundo orden se resumen en la Tabla 2.

La gráfica de t vs. t/q_t de la ecuación (3) genera una línea recta con un coeficiente de correlación (R^2) de 1, que es el valor de correlación máximo alcanzable, lo que establece la aplicabilidad del modelo de pseudo segundo orden, en ambos casos de adsorción de F^- y As (Figura 8b), indicando un predominio del proceso de quimisorción (Ho, 2006). Este resultado concuerda con lo reportado por otros

autores para la cinética de pseudo segundo orden (Kamble y col., 2010; Jain y Agarwal, 2017).

Parámetro de equilibrio adimensional (RL)

Para predecir la eficiencia del proceso de adsorción, el parámetro de equilibrio adimensional se determinó mediante la siguiente ecuación (Samarghandi y col., 2009; Kumar y Tamilarasan, 2017):

$$RL = 1 / (1 + KL Co) \quad (4)$$

Dónde:

RL es un factor de separación adimensional

Co es la concentración inicial (mg/L)

KL es la constante de Langmuir (L/mg)

Para los valores $0 < RL < 1$, la isoterma de Langmuir es favorable, y si el valor de RL es > 1 la isoterma es desfavorable, como consecuencia, la adsorción es desfavorable. Los valores obtenidos de RL se resumen en la Tabla 3. Este valor < 1 , concuerda con los resultados reportados por otros autores (Chinnakoti y col., 2017; Jain y Agarwal, 2017). En ambos casos, los valores de RL son < 1 , indicando una adsorción favorable a pH 5 y pH 7 para el F y el As total. Sin embargo, la adsorción del F^- es más favorable, porque los valores de RL son más pequeños que los valores obtenidos para la adsorción de As total.

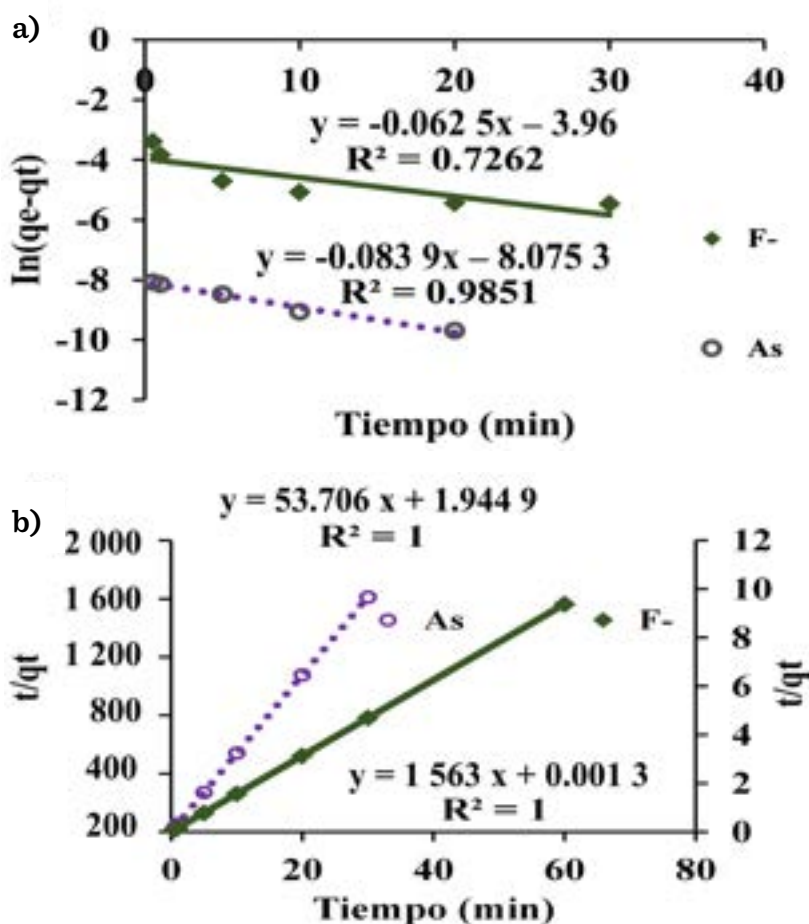
El cambio de energía libre estándar (ΔG°)

La energía libre estándar de Gibbs es un pará-

■ Tabla 2. Parámetros cinéticos de pseudo primer y pseudo segundo orden a pH 5.

Table 2. Pseudo-first and pseudo-second-order kinetic parameters to pH 5.

Parámetros de la cinética de pseudo primer orden					
C ₀ (mg/L)	Masa (g)	k ₁	R ²	Ion	
50	0.3	0.143 9	0.726 2	F ⁻	
0.5	1	0.109 9	0.985 1	As	
Parámetros de la cinética pseudo segundo orden					
C ₀ (mg/L)	q _e (mg/g)	k ₂ (g/mg·min)	h (mg/g·min)	R ²	Ion
50	6.398	0.918 4	769.2	1	F ⁻
0.5	0.018 7	1 435.44	0.514 1	1	As



■ Figura 8. Cinética de adsorción de fluoruro y arsénico a 301 K a pH 5: a) seudo primer orden y b) seudo segundo orden.

Figure 8. Adsorption kinetics of fluoride and arsenic at 301 K at pH 5: a) pseudo first order and b) pseudo second order.

metro termodinámico que permite estimar la viabilidad del proceso de adsorción. Permite discernir si un proceso es espontáneo o no. Los valores negativos de ΔG° implican un proceso espontáneo, mientras que los valores positivos significan que es necesario aportar energía al sistema, ya que el sistema no puede evolucionar por sí mismo. La energía libre de Gibbs puede calcularse usando la siguiente ecuación:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_L \quad (5)$$

Dónde:

R es la constante universal de los gases (8.314 J/mol·K),

T es la temperatura en Kelvin

K_L es la constante de la isoterma de Langmuir (L/mol) (Kamble y col., 2010; Das y col., 2013).

Utilizando el peso molar de cada contaminante, la constante de Langmuir se usó en las unidades correspondientes (L/mol) para evaluar la energía libre. Los valores calculados de ΔG° se resumen en la Tabla 3. El valor negativo de -19.52 kJ/mol, calculado de la ΔG° a pH 7 y 28 °C, para la adsorción del F⁻, es mayor negativamente que -2.52 kJ/mol, reportado por Kamble y col. (2010) a pH 7 y 30 °C, indicando que el proceso es más favorable usando alúmina nano-fibrilar en las mismas condiciones de pH 7 en un proceso de adsorción por lotes y una temperatura de 30 °C. En contraste, los valores de la adsorción de F

■ Tabla 3. Parámetro adimensional RL y el cambio de la energía libre (ΔG°) a pH 5 y 7.
Table 3. RL parameter and the standard free energy change (ΔG°) to pH 5 and 7.

Ion	C ₀ (mg/L)	pH	K _L (L/mg)	T (K)	ΔG° (kJ/mol)	R _L
Flúor	50	5	0.158	301	- 20.05	0.110 4
Flúor	50	7	0.128	301	- 19.52	0.135 2
Arsénico	0.5	5	0.036	301	- 19.94	0.982 0
Arsénico	0.5	7	0.035	301	- 19.87	0.982 8

son ligeramente más negativos que los obtenidos para la adsorción de As a pH 5. Estos resultados son consistentes con la isoterma de Langmuir, el valor del parámetro RL y el efecto del pH de la solución sobre la adsorción de F⁻ y As total, lo que indica que, en ambos casos, el proceso de adsorción es de naturaleza espontánea, pero la adsorción de F⁻ es más favorable. Esto significa que la γ -Al₂O₃ nano-fibrilar tiene mayor capacidad para eliminar el F⁻ a pH 5 y 7 que la obtenida para la remoción del As total.

CONCLUSIONES

La γ -Al₂O₃ nano-fibrilar, con alta área superficial como adsorbente (352 m²/g), es un buen candidato para aplicarse en el proceso de remoción de F⁻ y As, por su capacidad de adsorción a pH entre 5 y 7, y por desarrollarse de forma natural el proceso de adsorción. Este nanomaterial puede eliminar hasta 96 % de F⁻ en agua potable a pH 5, y 90 % a pH 7,

y remueve 92 % y 94.2 % del As total a pH 5 y 7, respectivamente. La correlación de los datos de equilibrio se ajustó a la isoterma de adsorción de Langmuir y el proceso de adsorción siguió un modelo cinético de pseudo segundo orden, que se relaciona con la adsorción química en la monocapa. Además, el valor de RL mostró un proceso de adsorción favorable. En ambos casos, el proceso de adsorción se lleva a cabo de forma espontánea, pero fue más eficiente para la eliminación del F⁻, como lo indican los valores ligeramente más negativos obtenidos para la energía libre de Gibbs.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Investigación y Caracterización de Minerales y Materiales (LICAMM), del departamento de Minas, por su apoyo en la caracterización de las nano-fibras de γ -Al₂O₃.

REFERENCIAS

- Alconada-Magliano, M. M., Damiano, F., Carrillo-Rivera, J. J., and Fagundo-Castillo J. R. (2017). Arsenic and fluoride in water in northwestern Buenos Aires: their association with natural landscape elements. *Journal of Geography and Regional Planning*. 10(2): 8-27.
- Anielak, A. M. and Grzegorzczuk-Nowacka, M. (2011). Significance of Zeta Potential in the Adsorption of Fulvic Acid on Aluminum Oxide and Activated Carbon. *Polish Journal of Environmental Studies*. 20(6): 1381-1386.
- Avci, G., Akhlaghi, O., Ustbas, B., Ozbay, C., Menciloglu, Y. Z., and Akbulut, O. (2016). A PCE-based rheology modifier allows machining of solid cast green bodies of alumina. *Ceramics International*. 42(3): 3757-3761.
- Baneshi, J., Haghighi, M., Jodeiri, N., Abdollahifar, M., and Ajamein, H. (2014). Homogeneous precipitation synthesis of CuO-ZrO₂-CeO₂-Al₂O₃ nanocatalyst used in hydrogen production via methanol steam reforming for fuel cell applications. *Energy Conversion and Management*. 87: 928-937.
- Carre, S., Gnep, N. S., Revel, R., and Magnoux, P. (2008). Characterization of the acid-base properties of transition aluminas by model reaction. *Applied Catalysis A: General*. 348(1): 71-78.
- Chakraborty, D., Rahman, M. T., Das, B., Murrill, M., Dey, S., Mukherjee, S., and Quamruzzaman, Q. (2010). Status of groundwater arsenic contamination in Bangladesh.

A 14-year study report. *Water Research*. 44(19): 5789-5802.

Chhatwani, R., Acharya, A., and Alim, I. (2016). Isotherm studies of equilibrium sorption of fluoride onto calcium alginate beads. *Asian Journal of Agriculture & Life Sciences*. 1(2): 9-14.

Chinnakoti, P., Chunduri, A. L. A., Vankayala, R. K., Patnaik, S., and Kamiseti V. (2017). Enhanced fluoride adsorption by nano crystalline α -alumina: adsorption kinetics, isotherm modeling and thermodynamic studies. *Applied Water Science*. 7(5): 2413-2423.

Coria, I. D. (2011). Variación de las propiedades superficiales a altas temperaturas en óxidos de metales de transición soportados en alúmina, para su utilización en reacciones catalíticas que involucren adsorción de gases. *Invenio*. 14(26): 141-154.

Das, B., Devi, R. R., Umlong, I. M., Borah, K., Banerjee, S., and Talukdar, A. Kr. (2013). Arsenic (III) adsorption on iron acetate coated activated alumina: thermodynamic, kinetics and equilibrium approach. *Journal of Environmental Health Sciences & Engineering*. 11(1): 42.

Franks, G. V. and Ganz, Y. (2007). Charging behavior at the alumina-water interface and implications for ceramic processing. *Journal of the American Ceramic Society*. 90(11): 3373-3388.

Habuda-Stanić, M., Ergović, M. R., and Flanagan, A. (2014). A review on adsorption of fluoride from aqueous solution. *Materials*. 7(9): 6317-6366.

Ho, Y. S. (2006). Review of second-order models for adsorption systems. *Journal of Hazardous Materials*. 136(3): 681-689.

Hu, F., Wu, X., Wang, Y., and Lai, X. (2015). Ultrathin γ - Al_2O_3 nanofibers with large specific surface area and their enhanced thermal stability by Si-doping. *RSC Advances*. 5(67): 54053-54058.

Jadhav, S. V., Bringas, E., Yadav, G. D., Rathod, V. K., Ortiz, I., and Marathe, K. V. (2015). Arsenic and fluoride contaminated groundwaters: A review of current technologies for contaminants removal. *Journal of Environmental Management*. 162: 306-325.

Jain, A. and Agarwal, M. (2017). Kinetic equilibrium and thermodynamic study of arsenic removal from water using alumina supported iron nano particles. *Journal of Water Process Engineering*. 19: 51-59.

Jiang, J. Q., Ashekuzzaman, S. M., Jiang A., Sharifuzzaman, S. M., and Chowdhury, S. R. (2013). Arsenic contaminated groundwater and its treatment options in Bangladesh. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 10(1): 18-46.

Jiménez-Becerril, J., Sosa, I. G., and Rivero, I. A. (2011). Synthesis of basic aluminum sulfate assisted by microwave heating. *Ceramics International*. 37(8): 3627-3630.

Jokanović, V., Jokanović, B., Marković-Todorović, B., and Marković, Z. (2009). Synthesis and characterization of hydrothermally obtained colloidal pseudoboehmite/boehmite. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 11(2): 164-168.

Kabir, Md. E., Saha, M. C., and Jeelani, S. (2007). Effect of ultrasound sonication in carbon nanofibers/polyurethane foam composite. *Materials Science and Engineering A*. 459(1-2): 111-116.

Kamble, S. P., Deshpande, G., Barve, P. P., Rayalu, S., Labhsetwar, N. K., Malyshev, A., and Kulkarni, B. D. (2010). Adsorption of fluoride from aqueous solution by alumina of alkoxide nature: Batch and continuous operation. *Desalination*. 264(1-2): 15-23.

Kanduti, D., Sterbenk, P., and Artnik, B. (2016). Fluoride: A review of use and effects on health. *Materia socio-medica*. 28(2): 133-137.

Kim, S. M., Lee, Y. J., Jun, K. W., Park, J. Y., and Potdar, H. S. (2007). Synthesis of thermo-stable high surface area alumina powder from sol-gel derived boehmite. *Materials Chemistry and Physics*. 104(1): 56-61.

Kumar, M. and Tamilarasan, R. (2017). Kinetics, equilibrium data and modeling studies for the sorption of chromium by Prosopis juliflora bark carbon. *Arabian Journal of Chemistry*. 10(2): S1567-S1577.

Kundu, S., Chowdhury, I. H., Sinha, P. K., and Naskar, M. K. (2017). Effect of organic acid-modified mesoporous alumina toward fluoride ions removal from water. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 62(7): 2067-2074.

Lamouri, S., Hamidouche, M., Bouaouadja, N., Belhouchet, H., Garnier, V., Fantozzi, G., and Trelkat, J. F. (2016). Control of the γ -alumina to α -alumina phase transformation for an optimized alumina densification. *Boletín de la Sociedad Española de cerámica y vidrio*. 56(2): 47-54.

Mohan, D. and Pittman, C. U. Jr. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents - A critical review. *Journal of Hazardous Materials*. 142(1-2): 1-53.

Nicomel, N. R., Leus, K., Folens, K., Van-Der-Voort, P., and Laing, G. D. (2015). Technologies for arsenic removal from water: current status and future perspectives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 13(1): 62.

Nordstroma, D. K., Zhub, X., McCleskeya, R. B., Königsbergc, L. C., and Königsbergc, E. (2017). Thermodynamic properties of aqueous arsenic species and scorodite solubility. *Procedia Earth and Planetary Sciences*.

ce. 17: 594-597.

Parida, K. M., Pradhan, A. C., Das, J., and Sahu, N. (2009). Synthesis and characterization of nano-sized porous gamma-alumina by control precipitation method. *Materials Chemistry and Physics*. 113(1): 244-248.

Qiu, H., Lv, L., Pan, B. C., Zhang, Q. J., Zhang, W. M., and Zhang, Q. X. (2009). Critical review in adsorption kinetic models. *Journal of Zhejiang University-Science A*. 10(5): 716-724.

Rajasulochana, P. and Preethy, V. (2016). Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – a comprehensive review. *Resource-Efficient Technologies*. 2(4): 175-184.

Rathore, V. K. and Mondal, P. (2017). Competitive adsorption of arsenic and fluoride onto economically prepared aluminum oxide/hydroxide nanoparticles: Multicomponent isotherms and spent adsorbent management. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 56(28): 8081-8094.

Saha, S. and Sarkar, P. (2012). Arsenic remediation from drinking water by synthesized nano-alumina dispersed in chitosan-grafted polyacrylamide. *Journal of Hazardous Materials*. 227-228: 68-78.

Samarghandi, M. R., Hadi, M., Moayedi, S., and Askari, F. B. (2009). Two-parameter isotherms of methyl orange sorption by pinecone derived activated carbon. *Iranian J Environ Health Sci Eng*. 6(4): 285-294.

Shokati-Poursani, A., Nilchi, A., Hassani, A. H., Shariat, M., and Nouri, J. (2015). A novel method for synthesis of nano-c-Al₂O₃: study of adsorption behavior of chromium, nickel, cadmium and lead ions. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 12(6): 2003-2014.

Siahpoosh, S. M., Salahi, E., Hessari, F. A., and Mobarsherpour, I. (2016). Synthesis of γ -alumina with high-surface-area via sol-gel method and their performance for the removal of nickel from aqueous solution. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*. 85: 912-934.

Singh, R., Singh, S., Parihar, P., Singh, V. P., and Prasad, S. M. (2015). Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 112: 247-270.

Singh, J., Singh, P., and Singh, A. (2016). Fluoride ions vs removal technologies: A study. *Arabian Journal of Chemistry*. 9(6): 815-824.

Satoshi, S., Contreras, C., Juarez, H., Aguilera, A., and Serrato, J. (2001). Homogeneous precipitation and phase transformation of mullite ceramic precursor. *International Journal of Inorganic Materials*. 3(7): 625-632.

Smedley, P. L. and Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied geochemistry*. 17(5): 517-568.

Varga, A., Raucsik, B., and Szakmány, G. (2017). Origin of natural arsenic and antimony contents in the permian to lower triassic siliciclastic rocks of the western Mecsek mountains, SW Hungary. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. 12(1): 5-12.

WHO, World Health Organization (2011). Guidelines for drinking water quality. Fourth edition, WHO Press, Geneva. [En línea]. Disponible en: http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151_eng.pdf. Fecha de consulta: 15 de mayo de 2017.

Yang, L., Yang, M., Xu, P., Zhao, X., Bai, H., and Li, H. (2017). Characteristics of nitrate removal from aqueous solution by modified steel slag. *Water*. 9(10): 757.

Zamorategui, A., Soto, J. A., and Sugita, S. (2012). The effect of drying methods on the textural properties of the pseudoboehmite synthesized by homogeneous precipitation. *Advances and Applications in Mechanical Engineering and Technology*. 4(4): 1-17.

Zaspalis, V., Pagana, A., and Sklari, S. (2007). Arsenic removal from contaminated water by iron oxide sorbents and porous ceramic membranes. *Desalination*. 217(1-3): 167-180.

Zhang, N., Yang, X., Yu, X., Jia, Y., Wang, J., Kong, L., ..., and Liu, J. (2014). Al-1,3,5-benzenetricarboxylic metal-organic frameworks: A promising adsorbent for defluorination of water with pH insensitivity and low aluminum residual. *Chemical Engineering Journal*. 252: 220-229.



Imagen de freepik en freepik

Alimentos seleccionados por los padres para los refrigerios de sus hijos en etapa de educación básica en Reynosa, Tamaulipas

Lunch box contents of elementary school children in Reynosa, Tamaulipas

Sanjuana Elizabeth Alemán-Castillo¹, Octelina Castillo-Ruiz^{1*}, Montserrat Bacardí-Gascón², Arturo Jiménez-Cruz²

RESUMEN

Los refrigerios que consumen los niños durante el recreo complementan su dieta diaria, y pueden representar un riesgo de obesidad si los padres los preparan con base en alimentos procesados, elevados en azúcar, sal y grasa. El objetivo de este estudio fue identificar el contenido de los refrigerios empacados en casa, así como el estado nutricional de escolares de Reynosa, Tamaulipas, México. Se realizó un estudio descriptivo y transversal. Se trabajó con 769 niños de 12 escuelas públicas de educación básica. Se tomaron peso y talla. Se registraron durante una semana los refrigerios por observación directa, mediante una lista de cotejo. El 44.7 % de los escolares presentó sobrepeso u obesidad. Los alimentos contenidos en los refrigerios fueron el sándwich (50.0 %), tacos (29.5 %) y tortas (14.5 %). Las bebidas azucaradas incluyeron jugo (44 %) y agua saborizada (38.2 %). El 18.8 % llevó frutas, 13.5 % verduras y 31.6 % agua. En promedio, el contenido de energía fue de 327 kcal, por lo tanto, sobrepasaron la recomendación de calorías, e incluían alimentos no saludables (alto contenido de azúcar y grasa en relación a su aportación nutrimental), siendo necesario realizar intervenciones de educación nutricional para promover el consumo de agua y alimentos saludables dentro del entorno escolar, para mejorar la calidad de los hábitos alimenticios, tanto en escuelas de medio tiempo, como de tiempo completo, las cuales, brindan el servicio de alimentación.

PALABRAS CLAVE: refrigerios, alimentos preparados, escolares.

ABSTRACT

School lunch supplements children's daily diet and may pose a risk of obesity if they are prepared based on processed foods high in sugar, salt and fat. The aim of this study was to identify the content of lunch packs, as well as the nutritional status of scholars from Reynosa, Tamaulipas, Mexico. To that aim, a descriptive and transversal study was conducted. We worked with 769 children from 12 public elementary schools. Students' size and weight were taken. The contents of their lunch packs were recorded for one week by direct observation through a checklist. 44.7 % of school children were overweight or obese. The foods contained in the lunch packs were sandwich (50.0 %), tacos (29.5 %) and big sandwich (14.5 %). Sugary drinks included juice (44 %) and flavored water (38.2 %). They also contained fruits (18.8 %), vegetables (13.5 %) and water (31.6 %). On average, the energy content was 327 kcal. Therefore, they exceeded the calorie recommendation and included unhealthy foods (high content of sugar and fat in relation to their nutritional contribution). This suggests the need to implement nutrition education intervention programs to promote the consumption of drinking water and healthy foods within the school environment to improve the quality of eating habits.

KEYWORDS: school lunch-packs, prepared foods, school children.

*Correspondencia: ocastillo@docentes.uat.edu.mx/ Fecha de recepción: 16 de enero de 2019/ Fecha de aceptación: 9 de abril de 2019 Fecha de publicación: 29 de julio de 2019

¹Universidad Autónoma de Tamaulipas, Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-Aztlán, calle 16 y Lago de Chapala s/n col. Aztlán, Reynosa, Tamaulipas, México, C. P. 88740. ²Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Medicina y Psicología.

INTRODUCCIÓN

Los hábitos alimentarios (HA) se definen como un conjunto de conductas adquiridas por un individuo, por la repetición de actos, en cuanto a selección, preparación y consumo de alimentos, relacionados principalmente con características biológicas, psicológicas, socioculturales y ambientales, que se adoptan de manera directa e indirecta (Macias y col., 2012; SEP, 2014). Los HA se adquieren en los primeros años de vida y perduran a lo largo de esta, e influyen en las prácticas alimentarias en la edad adulta (Rodrigo-Cano y col., 2016), razón por la cual, el establecimiento de HA saludables en la población infantil es primordial para la prevención de la obesidad (OB) infanto-juvenil (Calleja-Fernández y col., 2011). La familia, los medios de comunicación y la escuela son los que intervienen principalmente en la adopción de estos (Macias y col., 2012). Los HA de los niños han ido modificándose, influenciados por factores como la menor dedicación materna a la elaboración de los alimentos, aumento de alimentos ultra-procesados y la omisión de algunos de los principales tiempos de comida, especialmente el desayuno, lo que ha conducido a un incremento en la prevalencia de sobrepeso (SB) y OB entre la población infantil y adolescente, y constituye un factor determinante de la morbimortalidad por enfermedades no transmisibles (ENT), como la OB y la diabetes (Rojas-Huayllani y Delgado-Pérez, 2013; Navarro-Pérez y col., 2016).

En México, se ha observado un incremento del exceso de peso en escolares. En 1999 se registró una prevalencia combinada de SB y OB de 26.9 %. Para el 2006, se reportó un 34.8 %, lo que presentó un incremento de 7.9 puntos porcentuales. En el 2012, se registró una prevalencia de 34.4 % (Gutiérrez y col., 2012), y en 2016 de 33.2 % (Hernández-Ávila y col., 2016). A partir de estos antecedentes, la Secretaría de Salud y la Secretaría de Educación Pública (SSA/SEP, 2010) publicaron en el Diario Oficial de la Federación los lineamientos generales para el expendio y preparación de alimentos y bebidas en escuelas públicas. Especificándose que el refrigerio o colación esco-

lar debe cumplir con el 15 % de la recomendaciones diarias de energía, además de establecer las recomendaciones de macronutrientes (25 % a 30 % grasas, 55 % a 60 % hidratos de carbono y 10 % a 15 % proteínas), y las combinaciones de alimentos y bebidas, con el objetivo de que los niños en edad escolar desarrollen habilidades para elegir alimentos saludables, generar hábitos y cambios que puedan detener el incremento de la OB y las ENT (SSA/SEP, 2010; Hernández-Ávila y Montañez, 2011).

El refrigerio o colación escolar, es definido como “la combinación de alimentos, preparaciones y bebidas consumidas por los escolares durante el recreo, independientemente del lugar de procedencia o adquisición” (SSA/SEP, 2010). En algunas regiones del país (México), al refrigerio también se le conoce como “lonche”, un anglicismo que ha sido introducido en el idioma español (comida ligera del mediodía). La “lonchera” es el envase, maletín, bolsa o mochila donde se transportan los alimentos que son llevados a la escuela y que se consumen en la hora del recreo (Sánchez-Chávez y col., 2010). Los alimentos preparados o bebidas que llevan los niños en sus loncheras, son preparados por sus padres o tutores, siendo estos los que tienen un rol importante en el desarrollo de HA de sus hijos, ya que controlan la disponibilidad, accesibilidad y exposición a los alimentos o bebidas, y deciden los alimentos que se incluyen en las loncheras (Santillana-Marín y col., 2013). En la mayoría de las escuelas de Reynosa, Tamaulipas, los niños consumen en la hora del recreo alimentos traídos de casa. Sin embargo, la información disponible sobre los HA de los niños y la calidad nutricional de los refrigerios es limitada.

El objetivo de esta investigación fue identificar el contenido de los refrigerios empacados de casa, así como el estado nutricional de los niños en edad escolar de Reynosa, Tamaulipas, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño y población

Se realizó un estudio cuantitativo y transversal.

La muestra estuvo integrada por 769 alumnos de 12 escuelas públicas, del turno matutino de educación básica, seleccionadas por conveniencia, de las zonas escolares 100, 239, 243 y 023 del área urbana de Reynosa, Tamaulipas. Se solicitó permiso, a través de oficios, a los supervisores de las zonas escolares, directores y padres de familia, para evaluar los alimentos empacados de casa, que consumieron los escolares en el recreo durante 5 d consecutivos, y para realizar mediciones antropométricas (peso/talla). Se incluyeron niños del ciclo escolar 2015 de ambos sexos, el 49.8 % fueron niños (383) y el 50.2 % niñas (386) de 8 a 10 años, inscritos en tercer grado de primaria, y quienes sus padres firmaron el consentimiento informado en la reunión en la que se les explicó el proyecto. Se excluyeron a niños con algún aparato ortopédico, discapacidad mental, física o con problemas metabólicos.

Evaluación antropométrica

Se utilizaron las técnicas de la Norma Oficial Mexicana (NOM-047-SSA2-2015) para las mediciones antropométricas, realizadas por personal con certificación internacional en cineantropometría ISAK, nivel 1. Para la medición del peso corporal se usó una báscula marca Tanita (modelo BF-689; China), y para la estatura, un estadiómetro marca SECA (modelo 213, China). El estado nutricional se diagnosticó por edad y sexo, utilizando el puntaje Z del índice de masa corporal (IMC) de 5 a 19 años de edad. De acuerdo con los puntos de corte de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018), consideradas como bajo peso (≤ -2 DE); peso normal (-1.99 DE ≤ 1 DE); sobrepeso (> 1 DE ≤ 2 DE); obesidad (> 2 DE).

Evaluación de los refrigerios escolares

Para evaluar los refrigerios de los escolares, se utilizó una lista de cotejo previamente validada, a partir de la concordancia en la evaluación de las mismas 30 loncheras, por parte de tres evaluadores diferentes. Se registraron los alimentos que llevaron de casa, con un seguimiento de 5 d consecutivos. Para determinar los HA, se agruparon como alimen-

tos y bebidas naturales (frutas, verduras y agua); alimentos y bebidas preparadas (sándwiches, tacos, tortas, hamburguesas, hot-dogs, pizzas, y sus ingredientes: pan, huevo, chorizo, frijoles) y alimentos y bebidas procesadas (bebidas azucaradas, como jugos, agua saborizada, bebidas isotónicas; galletas, dulces, postres, frituras, yogur). Se determinó cuántos de los refrigerios cumplieron con todos o algunos de los criterios publicados en el 2014 por la SEP: ≤ 249 kcal, constituidos por frutas y verduras, cereal integral, oleaginosas y leguminosas, así como agua potable a libre demanda (SEP, 2014).

Análisis estadístico

Se calculó el promedio y la desviación estándar (DE) de las variables peso, talla, puntaje Z de IMC. Se utilizó ANOVA ($P < 0.05$) para comparar por sexos las mediciones antropométricas. Para el puntaje Z de IMC se aplicó una prueba *t* de Student ($P < 0.05$). Se empleó la prueba Ji-cuadrada con significancia de valor de $P < 0.05$ para comparar estados nutricios por sexos. Se calcularon promedios y DE del contenido nutricional de los refrigerios: calorías, carbohidratos, proteínas, grasa total y fibra, por medio del Sistema Mexicano de Alimentos Equivalentes (Pérez y col., 2014). La comparación entre sexos se realizó con un ANOVA ($P < 0.05$) y una prueba de Ji-Cuadrada ($P < 0.05$) para identificar diferencia de los niños y niñas que llevaron refrigerio, alimentos contenidos en las loncheras y cumplimiento de los criterios de la Secretaría de Educación Pública (SEP, 2014). Se utilizó el programa SPSS (v. 20) para la realización de los análisis estadísticos.

Consideraciones éticas

Para este estudio se solicitó el consentimiento informado por parte de los directores y padres de familia o tutores de los niños (as) participantes. El protocolo de este estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la Facultad de Medicina y Psicología, de la Universidad Autónoma de Baja California, con número de solicitud 366968, y el número UTN fue U1111-1160-8672.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características antropométricas de los escolares

El promedio de edad de la muestra seleccionada fue de 9.69 ± 0.51 . El 44.7 % de los escolares presentó exceso de peso (SB y OB), valores por encima de la media nacional, reportada por la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición, con una prevalencia combinada de sobrepeso (SB) y obesidad (OB) de 33.2 % en escolares (Hernández-Ávila y col., 2016). Por otro lado, Ávila-Curiel y col. (2016), con el Sistema de Vigilancia Nutricional en Escolares, documentaron que el 34.5 % de los niños registraron exceso de peso. Las prevalencias más elevadas de SB y OB se observaron en Campeche y Yucatán (ambas con 43.1 %), Morelos (40.8 %) y Tamaulipas (40.3 %).

Al comparar el estado nutricional por sexo (Tabla 1), se observó que las niñas presentaron mayor prevalencia de SB (24.60 %) ($P < 0.05$); mientras que los niños presentaron mayor prevalencia de obesidad (27.40 %) ($P < 0.05$).

Hábitos alimentarios de los escolares que llevaron refrigerios

El 68.5 % de la población estudiada llevó refrigerio alguna vez en la semana de revisión, por lo que el dato fue mayor que los niños que participaron en los estudios realizados en

EE. UU. por Johnston y col. (2012), quienes reportaron que el 38.5 % llevaron refrigerio, mientras que Hubbard y col. (2014), registraron que el 48 % llevaron refrigerio algún día en la semana.

Estudios realizados en México, tienen similitud en la frecuencia de niños que llevan refrigerio de casa, debido a que en este país no todas las escuelas son de tiempo completo, las cuales, brindan el servicio de alimentación, a través de la participación de los padres de familia. Gandarilla y col. (2013), indicaron que el 74 % de los niños en Morelia, Michoacán llevaron refrigerio diariamente. Por su parte, Díaz-Ramírez y col. (2016), en escolares de Tijuana, reportaron que durante 3 d consecutivos de registro se tuvo una frecuencia de refrigerios de 78.6 %. De acuerdo a Macías y col. (2012), los factores por los cuales los niños no llevan refrigerio son, falta de tiempo para cocinar de los padres, pérdida de autoridad en cuanto a la cantidad y calidad de los alimentos que consumen y la inestabilidad en la seguridad económica.

En la Tabla 2 se reporta que los alimentos preparados con mayor frecuencia fueron sándwiches (50.00 %), seguido de tacos (35.40 %) y tortas (14.26 %), sin observarse diferencia al comparar por sexo. Para la preparación del

■ **Tabla 1. Características antropométricas de los escolares.**

Table 1. Anthropometric characteristics of schoolchildren.

Criterio	Niños	Niñas	Total
Peso (kg) (media $\pm$ DE)	35.92 ± 9.60	35.86 ± 8.81	32.89 ± 9.21
Talla (m) (media $\pm$ DE)	1.36 ± 0.06	1.37 ± 0.06	1.60 ± 0.06
Puntaje Z de IMC (media $\pm$ DE)	$0.87 \pm 1.50^{**}$	$0.71 \pm 1.2^{**}$	0.79 ± 1.3
Bajo peso (%)	3.10	1.80	2.50
Peso normal (%)	51.40	54.10	52.80
Sobrepeso (%)	18.00*	24.60*	21.30
Obesidad (%)	27.40*	19.40*	23.40

* Ji-cuadrado ($P < 0.05$). ** *t* de student ($P < 0.05$).

■ **Tabla 2. Principales alimentos preparados contenidos en los refrigerios.**
Table 2. Main prepared foods contained in the lunch boxes.

Alimentos e ingredientes	Ambos sexos (%)	Niñas (%)	Niños (%)	P
Sándwich	50.00	25.55	24.45	0.63
Pan blanco	26.80	14.15	12.65	0.46
Pan integral	18.20	9.10	9.10	0.91
Pan integral y blanco	5.00	2.30	2.70	0.55
Mayonesa	46.2	23.6	22.6	0.83
Jamón	44.90	23.20	21.70	0.94
Otros*	5.10	2.35	2.75	0.88
Tacos	35.40	19.70	15.70	0.19
Tortilla de harina de trigo	16.60	9.20	7.40	0.18
Tortilla de harina de maíz	13.10	7.00	6.10	0.66
Tortilla de harina de trigo y de maíz	5.70	3.50	2.20	0.10
Frijoles	6.30	3.52	2.78	0.75
Huevo	8.58	4.82	3.76	0.93
Chorizo	12.60	6.96	5.64	0.52
Papa	7.92	4.40	3.52	0.72
Tortas	14.26	7.48	6.78	0.07
Jamón	12.50	6.60	5.90	0.85
Jamón con queso	0.88	0.66	0.22	0.34
Frijoles	0.88	0.22	0.66	0.17

*Huevo, frijoles, huevo con chorizo, huevo con salchicha.

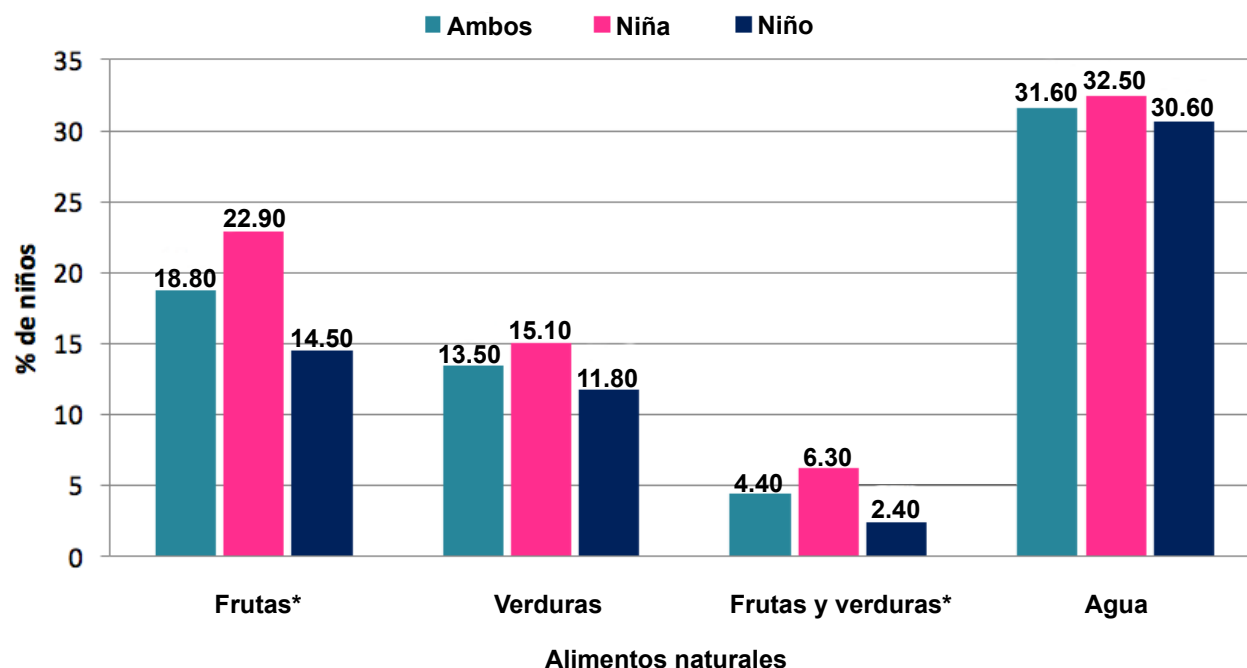
sándwich, utilizaron principalmente el pan blanco (26.80 %) y pan integral en menor proporción (18.20 %). Cabe mencionar que el 44.90 % de los escolares le añadieron jamón al sándwich. Resultados similares reportaron Hubbard y col. (2014), en un estudio transversal realizado en EE. UU. (Massachusetts), en donde mencionaron que el sándwich fue el alimento preparado que llevaron de casa con mayor frecuencia (59 %). En la categoría plato mixto (burritos/tacos), solo el 4 % llevó estos alimentos. Así mismo, Vargas y col. (2013), registraron en un estudio realizado en Tijuana, México, que durante el refrigerio, los niños llevaron principalmente sándwiches (27 %). Santos y col. (2015), mencionaron que el 55 % de los niños llevaron en sus refrigerios tortas o sándwiches.

Por otro lado, los tacos de los escolares, estaban rellenos de frijoles (6.30 %), chorizo (12.60 %), huevo (8.58 %) y por último de papa (7.92 %). En la preparación de tacos, hubo una preferencia por la tortilla de harina de trigo (16.60 %), esto posiblemente se deba a que la tortilla de maíz (13.10 %), al estar fría, tiene una textura más dura.

En la Figura 1 se puede observar que, entre los alimentos seleccionados, para los refrigerios de los niños, en ambos sexos, no es frecuente el consumo de frutas (18.80 %), verduras (13.50 %) y agua (31.60 %). Al comparar entre sexos, las niñas llevaron más frutas que los niños ($P < 0.01$), al igual que la combinación de frutas y verduras ($P < 0.05$). Solo el 4.4 % de la muestra total llevó tanto

fruta como verdura. Al considerar frutas y verduras juntas, se observó un resultado mayor (32.3 %) que el de Sweitzer y col. (2009), quienes reportaron que el 29 % de los niños evaluados llevaron fruta y/o verdura en sus refrigerios. Hubbard y col. (2014), reportaron que niños de Massachusetts (EE. UU.) llevaron agua (28 %), verduras (11 %) y frutas (34 %) en los refrigerios, siendo mayor el contenido de frutas, comparado con este estudio. Por otra parte, Evans y col. (2010), documentaron que el 19 % de niños estudiados del Reino Unido llevó verduras/ensalada, 53.6 % fruta y el 30.7 % alguna bebida permitida (agua, leche, jugo de fruta). Por otro lado, en un estudio realizado en niños de Sudáfrica, se registró que solo el 1 % llevaron en sus refrigerios fruta, debido a que la población sudafricana tiene una baja ingesta de verduras y frutas (Faber y col., 2014). En los estudios analizados, se puede observar que hay preferencia por las frutas en comparación con las verduras.

En cuanto a la frecuencia de alimentos y/o bebidas procesados o industrializados, en los refrigerios de los escolares se documentó que las galletas o pastelitos (15.40 %) y las bebidas azucaradas (BA) (65.60 %) fueron las que llevaron con mayor frecuencia. Las frituras, flan/gelatina, dulces, leche/leche saborizada y yogur, fueron las de menor frecuencia. Entre las BA más consumidas estuvieron el jugo (33 %) y el agua saborizada como Nestlé®, Jumex®, Paupau® y Frutier® (28.6 %), sin observarse diferencia entre sexos (Tabla 3). Evans y col. (2016), reportaron cifras similares a este trabajo en BA (62.1 %), pero cifras mayores en la selección de yogur (63.9 %) y leche (57.7 %). Mientras que Vargas y col. (2013), indicaron que los alimentos que los escolares llevaron de casa, para comer en la escuela, fueron galletas y pasteles (55 %), bebidas endulzadas (48 %), leche endulzada (48 %), yogur (41 %), leche (40 %), dulces (35 %) y leche saborizada (18 %). Neilson y col. (2016) y Roberts-Gray y col. (2016), confirmaron que



*Diferencias estadísticamente significativas. Ji-cuadrada ($P < 0.05$).

■ **Figura 1. Alimentos naturales.**
Figure 1. Natural food.

■ **Tabla 3. Alimentos industrializados.**

Table 3. Industrialized foods.

Alimentos y/o bebidas	Ambos sexos (%)	Niñas (%)	Niños (%)	P
Dulces	2.50	1.50	1.00	0.46
Flan/gelatina	2.30	1.50	0.80	0.28
Frituras	7.60	3.50	4.10	0.59
Leche y leche saborizada/yogur	5.90	3.30	2.60	0.45
Galletas/pastelillos	15.40	7.20	8.20	0.50
Bebidas azucaradas	65.60	35.40	30.20	0.25
Jugo	33.00	17.50	15.50	0.54
Aguas saborizadas	28.60	15.80	12.80	0.18
Bebidas isotónicas	2.28	1.14	1.14	0.92
Refresco	1.70	1.00	0.70	0.63

Ji-cuadrado (* $P < 0.05$).

los refrigerios son ricos en grasas saturadas, azúcares y sodio, al contener principalmente alimentos densamente energéticos, como BA, botanas, confitería. Lo anterior muestra que las BA o endulzadas tienen una alta frecuencia en los refrigerios de este y de otros estudios.

El equilibrio de energía y macronutrientes del contenido de los refrigerios de los escolares no se cumplió, toda vez que las calorías (326.73 kcal), proteínas (10.01 g), y grasas (9.02 g), sobrepasaron las recomendaciones del lineamiento; mientras que la fibra tuvo un valor bajo (1.50 g); solo los carbohidratos (34.65 g), estaban dentro de lo adecuado (SEP, 2014). La preferencia de alimentos refinados, como el pan blanco, tortilla de harina de trigo y bolillo, podría estar asociada con el bajo contenido de fibra en los refrigerios, ya que hubo escasa presencia de frutas, verduras y leguminosas, que son buena fuente de fibra. Las niñas consumieron más fibra que los niños ($P < 0.05$) (Tabla 4).

Al comparar el contenido de los refrigerios con los criterios de la SEP (2014), se observó que únicamente el 5.10 % cumplió con el criterio de escoger alimentos con un contenido de entre 225 kcal a 249 kcal, el 27.80 % consumió fruta y/o verdura, el 46.70 % cereales integrales. Solo el 0.70 % de los niños cum-

plieron con todos los criterios (cereales integrales, oleaginosas y/o leguminosas, frutas, verduras y agua) (Tabla 5). Por su parte Vargas y col. (2013), registraron que solo el 23 % de los refrigerios escolares evaluados en niños de Tijuana cumplieron los lineamientos establecidos por la SEP, pero indicaron que cuando se consideró el criterio de incluir agua, solo el 8 % cumplía con esta categoría. Resultados similares reportaron Medina-Montaña y col. (2012) en escolares de Guadalajara, Jalisco, donde el contenido de energía en los refrigerios fue de 340 kcal, superando las recomendaciones de la SSA/SEP (2010).

Por otra parte, De-Moizant y col. (2011), reportaron que, entre 10 % y 16 % de los niños venezolanos, cumplían con las recomendaciones en calorías, proteínas, grasas y carbohidratos, respectivamente. Evans y col. (2010), mencionaron que solo el 1.1 % de los refrigerios cumplieron con todos los estándares basados en alimentos para las comidas escolares en Inglaterra. Estos estudios sugieren que los refrigerios o lonches no siguen los lineamientos establecidos en cada país, por lo que es importante diseñar intervenciones y programas de educación nutricional, para que los padres proporcionen refrigerios que cumplan con todos los criterios.

■ Tabla 4. Composición de energía y macronutrientes de los refrigerios.

Table 4. Composition of energy and macronutrients of the lunch foods.

Energía/ nutrimento	Recomendación durante el recreo	Ambos sexos media $\pm$ DE	Niñas media $\pm$ DE	Niños media $\pm$ DE	P
Calorías (kcal)	225 a 249	326.73 $\pm$ 151.89	325.49 $\pm$ 146.09	328.06 $\pm$ 158.14	0.84
Proteínas (g)	8.43 a 9.33	10.01 $\pm$ 7.93	10.06 $\pm$ 7.71	9.95 $\pm$ 8.16	0.87
Carbohidratos (g)	33.8 a 37.40	34.65 $\pm$ 22.79	35.34 $\pm$ 22.80	33.92 $\pm$ 22.80	0.47
Grasa (g)	6.25 a 6.91	9.02 $\pm$ 6.96	8.99 $\pm$ 7.03	9.04 $\pm$ 6.91	0.93
Fibra (g)	2.56 a 2.83	1.50 $\pm$ 1.78	1.66 $\pm$ 1.84	1.32 $\pm$ 1.70	0.02*

ANOVA (*P < 0.05).

■ Tabla 5. Contenido de los criterios de la SEP (2014) en los refrigerios de los escolares.

Table 5. Content of the criteria used by the SEP (2014) for the lunch of schoolchildren.

Criterios de refrigerio escolar	Ambos sexos (%)	Niñas (%)	Niños (%)	P
225 kcal a 249 kcal	5.10	5.50	4.70	0.77
Fruta y/o verdura	27.80	31.70	23.90	0.04*
Agua	31.60	32.50	30.60	0.64
Cereales integrales y/o leguminosas y/o oleaginosas	46.70	48.70	44.70	0.35
Todos los criterios	0.70	0.20	0.50	0.36

Ji-cuadrado (*P < 0.05).

CONCLUSIONES

Las niñas presentaron mayor sobrepeso y los niños mayor obesidad. En cuanto a inclusión de alimentos en el refrigerio, tienen una alimentación parecida; sin embargo, se encontró que las niñas llevaron más frutas que los niños, lo que dio como resultado un mayor contenido de fibra en los refrigerios de las niñas, sin alcanzar la recomendación. Los alimentos preparados que llevaron con mayor frecuencia fueron sándwich, tacos y tortas, con preferencia por los productos de harinas refinadas. Fue notable el bajo consumo de frutas y verduras y el elevado consumo de bebidas azucaradas, como jugos y agua saborizada. Estos resultados sugieren desconocimiento por parte de los padres de familia para seleccionar alimentos que cumplan los criterios establecidos por la Secretaría de Educación Pública, dentro de los refrigerios escolares, ya que están estableciendo malos hábitos alimenticios a sus hijos, por lo que es

de importancia realizar intervenciones de educación nutricional, donde se incluya a directivos, padres de familia y alumnos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a supervisores, directores profesores, niños (as) de las escuelas participantes en este estudio, así como a la Universidad Autónoma de Baja California, por el financiamiento para la realización, con fondos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, para atender problemas prioritarios octubre 2014 a octubre 2016, con el proyecto “Estudio aleatorizado para valorar el efecto de un programa de intervención en escolares para mejorar los estilos de vida” y la vinculación con la Universidad Autónoma de Tamaulipas, para el desarrollo y obtención de los datos. Los resultados del presente estudio forman parte de la evaluación inicial en escolares de Reynosa, Tamaulipas.

REFERENCIAS

- Ávila-Curiel, A., Juárez-Martínez, L., Del-Monte-Vega, M., Ávila-Arcos, M. A., Galindo-Gómez, C. y Ambrocio-Hernández, R. (2016). Estado de nutrición en población escolar mexicana que cursa el nivel de primaria. Registro nacional de peso y talla, en *Sistema de Vigilancia Nutricional en Escolares*. [En línea]. Disponible en: <http://micro.sivne.org.mx/index.php/publicaciones/4-estado-de-nutricion-en-poblacion-escolar-mexicana-que-cursa-el-nivel-de-primaria>. Fecha de consulta: 17 de septiembre de 2018.
- Calleja-Fernández, A., Muñoz-Weigand, C., Ballesteros-Pomar, M., Vidal-Casariago, A., López-Gómez, J. J., Cano-Rodríguez, I., ... y García-Fernández, M. (2011). Modificación de los hábitos alimentarios del almuerzo en una población escolar. *Nutrición Hospitalaria*. 26(3):560-565.
- De-Moizant, M. G., Bravo, M., Mora, C. J., Villalobos, A. B. y Bravo, A. G. (2011). Estado nutricional antropométrico, preferencias alimentarias y contenido de macro y micronutrientes en “loncheras” de niños preescolares. *MedULA: revista de la Facultad de Medicina*. 20(2):117-123.
- Díaz-Ramírez, G., Jiménez-Cruz, A., and Bacardí-Gascón, M. (2016). Nutritional intervention to improve the quality of lunch-boxes among Mexican school children. *Journal of Community Health*. 41(6):1217-1222.
- Evans, C. E. L., Greenwood, D. C., Thomas, J. D., and Cade, J. E. (2010). A cross-sectional survey of children's packed lunches in the UK: food-and nutrient-based results. *Journal of Epidemiology & Community Health*. 64(11):977-983.
- Evans, C. E., Mandl, V., Christian, M. S., and Cade, J. E. (2016). Impact of school lunch type on nutritional quality of English children's diets. *Public Health Nutrition*. 19(1):36-45.
- Faber, M., Laurie, S., Maduna, M., Magudulela, T., and Muehlhoff, E. (2014). Is the school food environment conducive to healthy eating in poorly resourced South African schools? *Public Health Nutrition*. 17(6):1214-1223.
- Gandarilla, J. V., Solís, M. D. F., Reyes, M. C. M., Castro, E. M. y Armas, D. M. (2013). Evaluación del refrigerio en niños en edad preescolar y escolar que asisten al tianguis de la ciencia de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. *Xihmai*. 8(16): 123-138.
- Gutiérrez, J. P., Rivera-Dommarco, J., Shamah-Levy, T., Villalpando-Hernández, S., Franco, A., Cuevas-Nasu, L., ... y Hernández-Ávila, M. (2012). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición. Resultados Nacionales 2012, en *Informe Nacional de Salud Pública y Secretaría de Salud*. [En línea]. Disponible en: <https://ensanut.insp.mx/informes/ENSANUT2012 Resultados Nacionales.pdf>. Fecha de consulta: 15 de septiembre de 2018.
- Hernández-Ávila, M. y Montañez, O. G. M. (2011). Lineamientos generales para el expendio o distribución de alimentos y bebidas en los establecimientos de consumo escolar en los planteles de educación básica. *Boletín médico del Hospital Infantil de México*. 68(1): 1-6.
- Hernández-Ávila, M., Rivera-Dommarco, J., Shamah-Levy, T., Cuevas-Nasu, L., Gómez-Acosta, L., Gaona-Pineda, E., ... y García-López, D. (2016). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición de Medio Camino, en *Informe final de resultados*. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/209093/ENSANUT.pdf>. Fecha de consulta: 15 de septiembre de 2018.
- Hubbard, K. L., Must, A., Eliasziw, M., Foltz, S. C., and Goldberg, J. (2014). What's in children's backpacks: foods brought from. *Revista de la Academia de Nutrición y Dietética*. 114(9):1424-1431.
- Johnston, C. A., Moreno, J. P., El-Mubasher, A., and Woehler, D. (2012). School lunches and lunches-brought from home: a comparative analysis. *Childhood Obesity (Formerly Obesity and Weight Management)*. 8(4): 364-368.
- Macias, A. I., Gordillo, L. G., and Camacho, E. J. (2012). Eating habits in school-age children and the health education paper. *Revista Chilena de Nutrición*. 39(3): 40-43.
- Medina-Montaña, R., Moreno-Pérez, V. y Romero-Verlalde, E. (2012). Comparación del consumo de alimentos durante el horario escolar en niños de 6 a 11 años de edad con sobrepeso u obesidad y con peso saludable. *RESPYN Revista de Salud Pública y Nutrición*. 13(3).
- Navarro-Pérez, C., González-Jiménez, E., Schmidt-Rio Villa, J., Meneses-Echávez, J., Correa-Bautista, J., Correa-Rodríguez, M. y Ramírez-Vélez, R. (2016). Nivel y estado nutricional en niños y adolescentes de Bogotá, Colombia. Estudio FUPRECOL. *Nutrición Hospitalaria*. 33(4): 915-922.
- Neilson, L. J., Macaskill, L. A., Luk, J. M., Sharma, N., Killip, S. M., Salvadori, M. I., ..., and Dworatzek, P. D. (2016). Students' food intake from home-packed lunches in the traditional versus balanced school day. *Canadian Journal of Dietetic Practice and Research*. 78(1):3-10.
- NOM-047-SSA2-2015 (2015). Norma Oficial Mexicana. Para la atención a la salud del grupo etario de 10 a 19

años de edad 2015, en *Secretaría de Salud*. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/53624/NOM-047-SSA2-2015.pdf>. Fecha de consulta: 16 de septiembre de 2018.

OMS, Organización Mundial de la Salud (2018). Growth reference 5-19 years. [En línea]. Disponible en: http://www.who.int/growthref/who2007_bmi_for_age/en/. Fecha de consulta: 16 de septiembre de 2018.

Pérez, A., Palacios, B., Castro, A. y Flores, I. (2014). *Sistema Mexicano de alimentos equivalentes* (Cuarta edición). México: OGALI. 10 Pp.

Roberts-Gray, C., Briley, M. E., Ranjit, N., Byrd-Williams, C. E., Sweitzer, S. J., Sharma, S. V., ..., and Hoelscher, D. M. (2016). Efficacy of the lunchis in the bag intervention to increase parents' packing of healthy bag lunches for young children: a cluster-randomized trial in early care and education centers. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. 13(1): 3.

Rodrigo-Cano, S., Soriano, J. M. y Aldas-Manzano, J. (2016). Valoración de la efectividad de la educación alimentaria en niños preescolares, padres y educadores. *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*. 20(1): 32-39.

Rojas-Huayllani, E. C. y Delgado-Pérez, D. H. (2013). Influencia de la publicidad televisiva peruana en el consumo de alimentos no saludables en escolares de 4° a 6° primaria. *Anales de la Facultad de Medicina*. 74(1): 21-26.

Sánchez-Chávez, N. P., Reyes-Hernández, D., Reyes-Gómez, U., Maya-Morales, A., Reyes-Hernández, U. y Reyes-Hernández, K. L. (2010). Conductas para preparar loncheras mediante un programa de intervención educativa sobre nutrición con madres de preescolares. *Boletín Clínico Hospital Infantil del Estado de Sonora*. 27(1): 30-34.

Santillana-Marín, E., Jiménez-Cruz, A. y Bacardí-Gascón, M. (2013). Programas para mejorar el contenido nutricional de las fiambreras (loncheras): revisión sistemática. *Nutrición Hospitalaria*. 28(6): 1802-1805.

Santos, M. D. L. A. A., Fernández, T. D. N. J. G., Rodríguez, G. V., del-Campo, C. S. M. y Gómez, A. M. (2015). Intervención educativa para la mejora de prácticas de alimentación y actividad física en escuelas primarias del estado de Quintana Roo. *Rev Esp Nutr Comunitaria*. 21(4): 9-16.

SEP, Secretaría de Educación Pública (2014). Diario Oficial de la Federación. Acuerdo Nacional para la Salud Alimentaria, Estrategia contra el Sobrepeso y la Obesidad. [En línea]. Disponible en: <http://www.dof.gob.mx/>

[nota_detalle.php?codigo=5344984&fecha=16/05/2014](#). Fecha de consulta: 16 de septiembre de 2018.

SSA/SEP, Secretaría de Salud/Secretaría de Educación Pública (2010). Diario Oficial de la Federación. Acuerdo mediante el cual se establecen los lineamientos generales para el expendio o distribución de alimentos y bebidas en los establecimientos de consumo escolar de los planteles de educación básica 2010 México. [En línea]. Disponible en: http://https://www.sep.gob.mx/work/models/sep1/Resource/635/3/images/acuerdo_lin.pdf. Fecha de consulta: 14 de septiembre de 2018.

Sweitzer, S. J., Briley, M. E., and Robert-Gray, C. (2009). Do sack lunches provided by parents meet the nutritional needs of young children who attend child care? *Journal of the American Dietetic Association*. 109(1): 141-144.

Vargas, L., Jiménez-Cruz, A., and Bacardí-Gascón, M. (2013). Unhealthy and healthy food consumption inside and outside of the school by pre-school and elementary school Mexican children in Tijuana, Mexico. *Journal of Community Health*. 38(6): 1166-1174.



Imagen de: Adrián Alonso Durán Coronado

Análisis cognitivos de carga mental e identificación del error humano para mejorar la experiencia de usuario

Cognitive analyses of mental workload and human error identification for the improvement of user experience

Adrián Alonso Durán-Coronado¹, Aidé Aracely Maldonado-Macías^{2*}, Manuel Alejandro Barajas-Bustillos²,
Juan Luis Hernández-Arellano¹

RESUMEN

Las personas, en ocasiones, pueden sentirse abrumadas al tratar de interactuar con la tecnología moderna. Ciertos productos de uso cotidiano cuentan con diseños deficientes, por lo que pueden provocar una experiencia insatisfactoria y frustración, produciéndose con ellas una carga mental en el usuario que pueda inducir al error. El uso de técnicas para la identificación del error humano y de la evaluación de carga mental en el diseño y evaluación de productos, puede proporcionar información relevante y útil, para mejorar la experiencia del usuario. El objetivo de este trabajo fue proponer una metodología para integrar la evaluación de carga mental y el análisis del error humano en el diseño de productos. Se evaluó la carga mental mediante la técnica perfil de carga de trabajo, Workload Profile (WP), y se utilizó una metodología de identificación del error humano, Task Analysis For Error Identification (TAFEI), en la configuración de audífonos inalámbricos. Diez usuarios participaron voluntariamente en el estudio; sus experiencias en el uso de los audífonos fueron videogradas. Se utilizaron formularios para evaluar carga mental, y se identificaron errores humanos durante la etapa de configuración de los audífonos con el teléfono móvil. El método utilizado en este trabajo ofrece una mayor sensibilidad en la evaluación de la carga mental y permite determinar los recursos de atención que más se utilizan en la realización de la tarea. Se detectaron dos oportunidades de rediseño, una relacionada con la señal lumínica, y la otra para la identificación de las puntas para cada oído. A partir de los resultados de la aplicación de la metodología propuesta en este estudio, los diseñadores pueden mejorar la interacción entre las personas y los productos.

PALABRAS CLAVE: prevención de error, carga mental, experiencia de usuario, TAFEI, Workload Profile.

ABSTRACT

People can sometimes feel overwhelmed when trying to interact with modern technology. Some everyday products have deficient designs which can result in an unsatisfactory experience and even frustration. Additionally, they may produce a mental workload that can induce the user to make mistakes during their usage. The use of techniques for human error identification and mental load assessment in products evaluation and design can provide relevant and useful information to improve the user's experience. The objective of this work was to propose a methodology for integrating mental workload assessment and human error analysis into product design processes. In this work, mental workload was evaluated during the configuration of wireless earphones using the Workload Profile (WP) technique, and the Task Analysis for Error Identification (TAFEI). Ten users voluntarily participated in the study; their experiences during the use of mobile phone earphones were video recorded. Rating sheets were used to assess mental workload and human errors were identified during the earphones' setup stage with the mobile phone. The method employed for this research offers higher sensitivity in the assessment of mental workload. It also enables the identification of attention resources that were more frequently used during task completion. Two opportunities for redesign were identified. The first one is related to the light signal detection and the second one to the correct identification of ear tips. Conclusions and recommendations are given for designers to improve the interaction between people and products.

KEYWORDS: error prevention, mental workload, user experience, TAFEI, Workload Profile.

*Correspondencia: amaldona@uacj.mx / Fecha de recepción: 16 de mayo de 2018 / Fecha de aceptación: 11 de julio de 2019 / Fecha de publicación: 29 de julio de 2019

¹Universidad Autónoma de Cd. Juárez, Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte. ²Universidad Autónoma de Cd. Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología, av. del Charro, núm. 450 Nte., col. Partido Romero, Cd. Juárez, Chihuahua, México, C. P. 32310.

INTRODUCCIÓN

En ocasiones, la introducción de nuevas tecnologías provoca problemas y frustraciones a los usuarios en general, y particularmente en personas mayores (Cabero-Almenara y col., 2002; Márquez, 2002). Esto se debe a que, al comprar un producto nuevo, se generan expectativas acerca de su uso, en gran medida, por la publicidad y la mercadotecnia. Sin embargo, de acuerdo con Nielsen (1994), los usuarios pueden perder un promedio de 10 min diarios en problemas relacionados con el mal diseño de productos, por lo que el usuario puede sentirse frustrado. Esta frustración afecta la experiencia de uso de un producto, lo que puede terminar en una llamada al centro de atención a clientes, abandonar su uso o incluso dejar de consumir productos de la misma marca. Los sentimientos y percepciones originados de la interacción del usuario y los productos, se denomina experiencia de usuario (Albert y Tullis, 2013), y es de elevada importancia en el diseño o mejora de todo tipo de productos.

Uno de los factores a considerar en el diseño de nuevos productos, con el fin de mejorar la experiencia de usuario, es la funcionalidad; la cual refleja la percepción del usuario de cómo un producto tiene la capacidad para cumplir con su propósito (Homburg y col., 2015). En el caso de productos con una funcionalidad limitada, que generan errores y frustración en el usuario, se recomienda realizar evaluaciones pertinentes del uso del producto, con el objetivo de prevenirlos (Nielsen, 1994).

En este sentido, a partir de las opiniones y experiencias de un grupo de usuarios es posible detectar problemas y deficiencias en la interacción humano-artefacto. El análisis de esta interacción ofrece oportunidades para mejorar, principalmente en aspectos cognitivos y de configuración. Debido a lo anterior, la mejora de la experiencia de usuario, por medio de análisis cognitivos, como la evaluación de la carga mental y el análisis de error humano, se está incorporando poco a poco. Al respecto, Bustamante y col. (2018), hicieron

uso del Índice de Carga de la Tarea (NASA-TLX, por sus siglas en inglés: NASA- Task Load Index) para evaluar la carga mental, y del enfoque sistemático de predicción y reducción de errores humanos (SHERPA, por sus siglas en inglés: Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach) para el análisis preventivo del error humano.

Previo a la realización de cualquier análisis cognitivo, el análisis jerárquico de tareas (HTA, por sus siglas en inglés: Hierarchical Task Analysis), es el método más generalizado que aporta información esencial para iniciar una evaluación de carga mental o de error humano (Stanton y col., 2013).

El HTA es una herramienta que brinda al analista una visión amplia acerca del funcionamiento de un determinado proceso, e implica realizar una jerarquización de los objetivos, subobjetivos, operaciones y planes de la tarea, a un nivel de detalle deseado (Annett, 2004), y que originalmente fue desarrollado como un medio para determinar los requisitos de capacitación (Stanton, 2006).

En cuanto al error humano, este se presenta cuando una secuencia planeada de actividades mentales o físicas fallan en alcanzar cierto resultado, siempre y cuando dichas fallas no sean atribuibles al azar (Forsythe y col., 2014), por lo que la evaluación del error es una tarea importante en el diseño de productos. Uno de los métodos más utilizados para la identificación del error humano es el Análisis de Tareas para la Identificación del Error (TAFEI, por sus siglas en inglés: Task Analysis For Error Identification). Este método permite identificar errores en el uso de dispositivos mediante el modelado de la interacción bajo análisis (Stanton y Baber, 2005). TAFEI supone que las acciones están limitadas por el estado del producto en cualquier punto particular de la interacción, y que el dispositivo ofrece información al usuario sobre su funcionalidad. Por lo tanto, la interacción entre usuarios y dispositivos progresa a través de una secuencia de estados.

En cada estado, el usuario selecciona la acción más relevante para su objetivo, basado en el estado total del sistema (Baber y Stanton, 2004).

La carga mental se define en función de la diferencia entre la capacidad del individuo y las demandas de la tarea (Rubio, 2002). Existen diversas técnicas para evaluar la carga mental, de acuerdo con Milán y col. (2015), tres son las más populares: NASA-TLX, la Técnica Subjetiva de Evaluación de Carga de Trabajo (SWAT, por sus siglas en inglés: Subjective Workload Assessment Technique) y el Perfil de Carga de Trabajo (WP, por sus siglas en inglés: Workload Profile).

La técnica WP fue propuesta por Tsang y Velazquez (1996). Está basada en el supuesto

de que la carga mental puede definirse por las dimensiones descritas en la teoría de recursos de atención múltiple (MRT, por sus siglas en inglés: Multiple Resource Theory) de Wickens (Bommer y Fendley, 2018), y a diferencia de NASA-TLX y SWAT, se hace en una sola ejecución, posterior a la realización de la tarea, por lo que es recomendado para evaluaciones rápidas (Milán y col., 2015). El WP comprende las mismas dimensiones que el MRT, las cuales son listadas y explicadas en la Tabla 1 (Tsang y Velazquez, 1996).

Es recomendable, de acuerdo con Stanton y col. (2013), que antes de aplicar la técnica WP se desarrolle un HTA, para así determinar los elementos de la tarea a analizar. Una vez determinados dichos elementos, los partici-

■ **Tabla 1. Dimensiones que se consideran en MRT.**

Table 1. Dimensions considered in MRT.

Etapas de procesamiento	
Perceptual/cognitivo:	Son los recursos mentales relacionados a la atención, necesarios para realizar actividades, que pueden ser: detectar, reconocer e identificar objetos; recordar y resolver problemas y la toma de decisiones.
Respuesta	Estos son los recursos de atención necesarios para la selección y ejecución de la respuesta.
Códigos de procesamiento	
Espacial	Se refiere a la naturaleza espacial, por ejemplo, la conducción requiere prestar atención a la posición del automóvil, la distancia entre la posición actual del auto móvil y la siguiente señal de alto, la dirección geográfica a la que se dirige el automóvil, entre otros.
Verbal	Se refiere a las tareas que son de naturaleza verbal. Por ejemplo, la lectura implica principalmente el procesamiento de materiales verbales y lingüísticos.
Entrada	
Visual	Algunas tareas son ejecutadas en base a información visual recibida. Por ejemplo, jugar al baloncesto requiere un control visual de la ubicación física y la velocidad del balón.
Auditiva	Estas tareas se realizan en base a información auditiva. Por ejemplo, escuchar a la persona en el otro extremo del teléfono es una tarea que requiere atención auditiva. Escuchar música es otro ejemplo.
Salida	
Manual	Algunas tareas requieren una atención considerable de recursos mentales para producir una respuesta manual, como puede ser el teclear o tocar un piano.
Verbal	Otras tareas requieren respuestas del habla en su lugar. Por ejemplo, entablar una conversación requiere atención para producir las respuestas del discurso.

pantes deben ser instruidos en los principios de la MRT. Cuando estos principios hayan sido comprendidos, se procede a la realización de la tarea, y finalmente al llenado de los formatos de evaluación o también denominada, proforma WP. Es importante señalar que, hasta el momento, se carece de una unidad de medida de carga mental, además de un método estandarizado para su evaluación. Por ello, la técnica de WP, a pesar de ser de las técnicas subjetivas de evaluación más recientes, y tener un fundamento en la teoría de MRT, solo determina si la tarea presenta carga mental para el usuario, así como las fuentes principales de dicha carga.

El objetivo de este trabajo fue proponer y validar una metodología que hace uso de análisis cognitivos para integrar la evaluación de la carga mental y el análisis del error humano en el diseño de productos, para así contribuir a detectar deficiencias de diseño y mejorar la experiencia de usuario, mediante el desarrollo de un caso de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Se trabajó con audífonos inalámbricos (marca JBL® Reflect, Harman, USA), diseñados para escuchar música con fines de entretenimiento, sobre todo al realizar actividades deportivas (JBL, s/f), en lo particular, este modelo de audífonos utiliza tecnología bluetooth®, la cual, es una especificación industrial que permite la conexión inalámbrica entre diferentes dispositivos electrónicos, como un teléfono celular o una tableta electrónica, mediante un enlace de radiofrecuencia (Haartsen, 1998).

En el presente estudio, se usaron los teléfonos celulares, propiedad de los 10 participantes, quienes eran estudiantes universitarios de entre 18 a 25 años, que se incluyeron en el estudio de manera voluntaria, al mostrar una buena habilidad en el uso del teléfono para escuchar música. Los teléfonos eran de diferentes modelos y de dos sistemas operativos

diferentes (Android™ e iOS™). Sin embargo, fue posible desarrollar el HTA apropiadamente, ya que la mayoría de los participantes pudieron realizar las subtareas sin inconvenientes, y solo para uno de los participantes la subtarea “sincronizar los audífonos” fue omitida por problemas de incompatibilidad con los audífonos.

Se utilizó un equipo de cómputo marca DELL, modelo Inspiron N4050, hecho en China, con Microsoft Office™ 2016 para la captura y validación de los resultados de este trabajo. Así mismo, se empleó una cámara videogradora Polaroid T831 para llevar registro de los participantes y realizar el análisis de la tarea.

Metodología

La evaluación de los videos se hizo por dos especialistas en diseño, de manera simultánea, utilizando como indicadores de usabilidad cuantificables propuestos por Nielsen (2001), el tiempo que requiere una tarea (registrando minutos y segundos), la tasa de error (tomando en cuenta las tareas completadas con éxito en el primer intento), y la satisfacción subjetiva de los usuarios. Los evaluadores realizaron una revisión simultánea y de forma consensada para asegurar la consistencia del análisis. Para fines de este trabajo, la interacción analizada del participante y los audífonos inalámbricos se delimita a la colocación de las puntas para los oídos, el encendido y la sincronización con un teléfono móvil. Se excluye el estudio de tareas, como escuchar música, subir y bajar el volumen de los audífonos, contestar una llamada, apagar los audífonos y poner a cargar los audífonos.

El diseño que se presenta es cuantitativo, con un diseño transversal. La metodología de este trabajo fue realizada en 3 etapas, las cuales son descritas a continuación:

Etapas 1. Elección de la tarea y análisis jerárquico de tareas (HTA). En esta etapa, se llevó a cabo una serie de entrevistas con los 10 participantes, para determinar aquella ta-

rea que resultara la más complicada de realizar en el uso de sus propios teléfonos móviles. Se les pidió ejecutar la tarea seleccionada por la mayoría de los participantes, y su interacción fue video-grabada y observada por un analista.

A partir de este análisis, se procede al desarrollo del HTA, el cual precede cualquier análisis cognitivo, como en este caso TAFEI y WP. Para su elaboración se utilizó la metodología propuesta por Stanton y col. (2013), detallada en la Tabla 2.

Etapla 2. Análisis para la identificación del error humano. Se aplicó el método TAFEI para identificar posibles errores humanos. A partir del desarrollo del HTA mostrado anteriormente, se analizan todos los posibles estados de la interacción humano-dispositivo y se representan en forma gráfica a través de los diagramas de estado-espacio (SSD, por sus siglas en inglés: State-Space Diagrams). Los SSD, como ya se mencionó, son representaciones gráficas del comportamiento del dispositivo o producto en interacción con el usuario. Cada uno de ellos, representa uno de los posibles estados de la interacción humano-dispositivo durante la tarea, enunciando cada uno de ellos desde el inicial hasta el final (Mohammadian y col., 2012).

Una vez mostrados todos estos, son analizados dentro de la matriz de transición, en la cual pueden estudiar las transiciones de un estado a otro, y se adoptan tres enfoques:

A. Si la transición dada es imposible, se pone un guión (-) en la celda respectiva.

B. Si una transición dada es posible y deseable (es decir, el usuario se dirige hacia el objetivo), es una transición legal que se representa con una letra "L" en la matriz.

C. Si una transición dada es posible pero indeseable (desviación del acto deseado), es una transición ilegal que se muestra en la matriz representada con una letra "I".

Una vez analizadas todas las posibles intersecciones de un estado a otro del dispositivo en la matriz dada, el analista debe dirigir su atención principalmente hacia aquellos casos en donde se presenta una transición ilegal (I). Este análisis resulta útil y conveniente, ya que es posible desarrollar soluciones de diseño para reducir o eliminar el error humano en la interacción humano-dispositivo.

Etapla 3. Análisis de la carga mental. Por medio de la evaluación de carga mental se pretende determinar cuáles tareas o subtareas pueden representar mayor dificultad en el logro de un objetivo dado en la interacción con el producto; asimismo, determinar cuáles pueden ser las principales fuentes de dicha carga. Para evaluar la carga mental, se utilizó la técnica WP. El método requiere del conocimiento de las dimensiones de carga mental derivadas de la MRT, por lo que se instruyó a los participantes sobre ellas, y su descripción para realizar el análisis. Se utilizaron las subtareas propuestas en el HTA de la tarea en estudio. Algunas fueron descartadas porque no son desarrolladas por el usuario. En la Tabla 3 se muestra el formato en blanco de WP usado.

Los participantes disponían de la definición de cada dimensión en el momento de la clasificación. En cada celda del formato, los participantes proporcionaron un número entre 0 y 1 para representar la proporción de recursos atencionales, utilizados en una dimensión particular para la subtask dada. Una calificación de "0" significa que la tarea no implica ninguna exigencia sobre la dimensión evaluada, mientras que una calificación de "1" significa que la tarea requiere de la máxima atención del mismo recurso.

La obtención de la carga mental de cada subtask se obtiene al sumar la valoración de cada dimensión, esto es representado por la Ecuación 1.

$$C_t = \sum_i^8 d_i$$

■ **Tabla 2. Pasos para el desarrollo del HTA.**
Table 2. Steps for the development of the HTA.

Paso	Nombre	Descripción
1	Definir la tarea para el análisis	Además de identificar la tarea que se está analizando, también debe definirse el propósito de realizar el estudio.
2	Proceso de recolección de datos	Se deben obtener datos específicos sobre la tarea. Deberán recopilarse datos sobre los pasos de la tarea, la tecnología utilizada, la interacción entre el hombre, la máquina e individuos del equipo de trabajo, la toma de decisiones y las limitaciones de la tarea.
3	Determinar el objetivo general de la tarea	El objetivo general de la tarea analizada deberá especificarse primero en la parte superior de la jerarquía.
4	Determinar subobjetivos de la tarea	Implica el dividir el objetivo general en subobjetivos significativos (generalmente 4 ó 5), que juntos forman las tareas requeridas para lograr el objetivo general.
5	Descomposición de subobjetivos	Se deben desglosar los subobjetivos identificados en otros subobjetivos y operaciones, según el número de pasos de la tarea en cuestión. Este proceso debe continuar hasta que se alcance una operación apropiada. El nivel inferior de cualquier rama en un HTA debe ser siempre una operación. Mientras que todo lo que está por encima de una operación ayuda a especificar metas u objetivos de la tarea, las operaciones realmente dicen lo que hay que hacer. Por lo tanto, las operaciones son acciones que deben realizarse para alcanzar el objetivo asociado.
6	Análisis de planes	Una vez que se hayan descrito todos los subobjetivos y las operaciones en su totalidad, es necesario añadir los planes. Los planes dictan cómo se alcanzan las metas. Un plan simple sería: hacer 1, después 2 y después 3. Los planes no tienen que ser lineales y existen en otras formas de planes.

Dónde:

C_i es la carga mental de la subtarea.

d_i es la valoración que cada participante asigna a las dimensiones carga mental del formato de evaluación.

Mientras $\sum_i^8$ es la sumatoria de los ítems 1 al 8.

RESULTADOS

Los resultados se muestran para cada una de las etapas propuestas en la metodología.

Etapla 1. Elección de la tarea y análisis jerárquico de tareas. La tarea más complicada de realizar, de acuerdo con la observación de la videograbación y la apreciación expresada por los participantes se muestra a través del de-

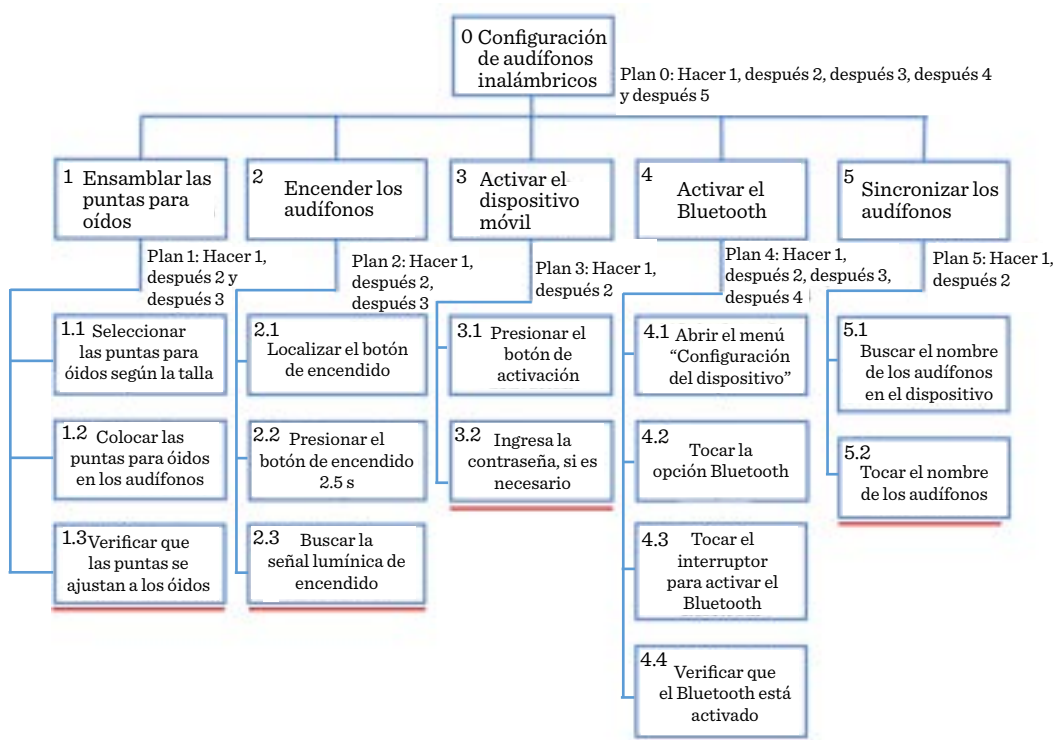
sarrollo del HTA (Figura 1), donde se tomaron en cuenta los siguientes pasos:

1. Definición de la tarea para el análisis: la tarea que se determinó, para realizar este trabajo fue la configuración de audífonos inalámbricos con el teléfono móvil en su modalidad de bluetooth®, ya que los 10 participantes del estudio experimentaron dificultades para realizar la configuración.

2. Proceso de recolección de datos: los datos fueron recolectados mediante videograbaciones de la tarea realizada por los 10 participantes, y evaluados por dos analistas en forma independiente, cuyos criterios coincidieron.

■ **Tabla 3. Formato de evaluación, proforma, para WP utilizado en este trabajo.**
Table 3. WP pro-forma evaluation used in this work.

Dimensiones de la carga mental								
Tarea	Etapa de procesamiento		Código de procesamiento		Entrada		Salida	
	Perceptual/ cognitivo	Respuesta	Espacial	Verbal	Visual	Auditiva	Manual	Verbal
	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8
1.1. Seleccionar las puntas para oídos según la talla.								
1.2. Colocar las puntas para oídos en los audífonos.								
1.3. Verificar que las puntas se ajusten a los oídos.								
2.1. Localizar el botón de encendido.								
2.2 Presionar el botón de encendido 2.5 s.								
2.3 Buscar la señal lumínica de encendido.								
3.1. Presionar el botón de activación.								
3.2. Ingresar la contraseña, si es necesario.								
4.1. Abrir el menú "Configuración" del dispositivo.								
4.2. Tocar la opción "bluetooth".								
4.3. Tocar el interruptor para activar el "bluetooth".								
4.4. Verificar que el "bluetooth" está activado.								
5.1. Buscar el nombre de los audífonos en el dispositivo.								
5.2. Tocar el nombre de los audífonos.								



■ Figura 1. HTA desarrollado para este caso de estudio.

Figure 1. HTA developed for this case study.

3. Determinar el objetivo general de la tarea: el objetivo principal de análisis fue: configuración de audífonos inalámbricos. Esto es representado en el primer nivel, subíndice 0, del HTA (Figura 1).

4. Determinación de subobjetivos de la tarea: los subobjetivos planteados para la realización del HTA son, ensamblar las puntas para oído, encender los audífonos, activar el dispositivo móvil, activar el bluetooth y sincronizar los audífonos. Lo anterior es mostrado con los índices 1, 2, 3, 4 y 5 (Figura 1).

5. Descomposición de subobjetivos: cada uno de los subobjetivos fue descompuesto en elementos simples que detallan el proceso de la tarea, y son mostrados en la Figura 1 como objetivos del tercer nivel jerárquico.

6. Análisis de planes: se utilizó un plan lineal y selectivo para desplegar 3 niveles jerárquicos para las subtareas. Las subtareas 1, de ensamblar las puntas para el oído, y la 4, acti-

var el bluetooth®, son aquellas que se observaron como las más complejas.

Etapas 2. Análisis para la identificación del error humano. Partiendo del HTA, se desarrollaron los SSD (Figura 2). En este caso, se tuvieron 4 estados distintos, partiendo desde el estado inicial o estado 0: audífonos apagados, audífonos con las puntas colocadas, audífonos encendidos, audífonos sincronizados. La transición entre estados se da por medio de las tareas 1, 2 y 5 del HTA (representadas por una línea azul en la Figura 2). Posteriormente, se desarrolló la matriz de transición (Tabla 4), en la cual, se pueden observar 3 situaciones, donde se puede generar una transición ilegal (identificadas con líneas rojas en la Figura 2 y con las letras A, B, y C en la Tabla 4). Estas situaciones son las siguientes: la transición del estado 0 (audífonos apagados) al 2 (puntas para oídos colocadas), e identificada con la letra A, en la Figura 2 y la Tabla 4; se presenta, ya que los usuarios son incapaces de reconocer fácilmente las puntas correctas para



■ Figura 2. Diagramas de espacio-tiempo para el TAFEI.

Figure 2. Space-time diagrams for the TAFEI.

■ Tabla 4. Matriz de transición.

Table 4. Transition matrix.

Desde el estado	Al estado				
		0	1	2	3
	0	-	L	I (A)	I (B)
	1		-	L	I (C)
	2			-	L
	3				-

cada oído. El diseño de las puntas para los oídos cuenta con una letra en relieve que ayuda a identificar cada lado de la punta y su correspondencia a cada oído (Figura 3). Otros errores identificados como transiciones ilegales se presentan en la transición del estado 0 al 3, representado con la letra B en la Figura 2 y la Tabla 4, así como la transición del estado 1 al 3, representado por la letra C, en la Figura 2 y Tabla 4. Dichos errores, se presentan debido a que en el diseño de los audífonos en estudio, la señal lumínica de encendido no es lo suficientemente visible para de-

tectarla, y el usuario pasa por alto esta condición, por lo que la sincronización entre el teléfono móvil y los audífonos es imposible.

En la Figura 4 se muestra la ubicación de la señal lumínica de encendido en el diseño estudiado.

Etapas 3. Análisis de la carga mental. En la Tabla 5 se muestra el resultado del análisis de carga mental efectuado por WP. Esta tabla presenta resultados correspondientes a las subtarefas numeradas en el HTA, que se muestra en la Figura 1. Dicha tabla fue elaborada en base a la sumatoria final por tarea de la evaluación de la carga mental realizada por cada uno de los participantes, e indica que las 6 subtarefas que más carga mental presentaron, basándose en el promedio de las subtarefas individuales fueron: subtarea 1.1. “Seleccionar las puntas para oídos según la talla” (con un promedio de carga mental de 1.35); subtarea 1.2. “Colocar las puntas para oídos en los audífonos” (con un promedio de 1.61); y subtarea 1.3. “Verificar que las puntas se ajusten a los oídos” (con un promedio de 1.79).

El análisis de las videgrabaciones mostró que los participantes se confundían al tratar de



■ Figura 3. Letra en relieve que identifica el lado de la punta.

Figure 3. A relief letter identifying the side of the tip.



■ Figura 4. Posición de la señal lumínica de encendido en los audífonos inalámbricos.

Figure 4. Position of the light signal on the wireless earphones.

elegir las puntas para los oídos correctas, ya que fallaron al colocarlas. Este error, se debe a que, los caracteres alfabéticos utilizados para identificar la talla y la lateralidad, de cada una de las puntas para los oídos fueron indetectables para ellos. Al notar los participantes que las puntas no se ajustaban a sus oídos, algunos procedían a realizar los cambios necesarios, y algunos otros optaban continuar su uso sin realizar ningún cambio.

En cuanto a la detección de la señal lumínica, se observó que todos los participantes tuvieron problemas con la subtarea 2.2. “Presionar el botón de encendido 2.5 s” (1.41), ya que presionaban el botón por menor tiempo del requerido, y daban por hecho que los audífonos estaban encendidos. Algunos de los participantes descubrieron casualmente la señal lumínica y confirmaron que los audífonos estaban encendidos, sin embargo, la mayoría de los participantes no lo hizo, por lo que se tenía que repetir la ejecución de la tarea hasta lograrlo. La subtarea 3.1 “Presionar el botón de activación” (1.54), presentó carga mental por la dificultad para identificar el lugar del botón. La subtarea 2.3. “Buscar la señal lumínica de encendido” registró el promedio

más elevado de carga mental con 2.09, ya que el análisis reveló que todos los participantes presentaron problemas para localizar la señal de encendido, situación que muestra una oportunidad de mejora en la experiencia del usuario.

DISCUSIÓN

Aunque la literatura acerca de WP y TAFEI es escasa, se ha encontrado que estos métodos son usados en diversas áreas. Por ejemplo, TAFEI se ha utilizado en la evaluación de una amplia variedad de aplicaciones, como procesadores de texto, cajeros automáticos, video-grabadoras, productos para automóviles, un camión de succión de drenaje, máquinas expendedoras de boletos (Stanton y Barber, 2005), en el uso de máquinas de rayos X (Alferez-Padron y col., 2017), en máquinas para moler carne (Mohammadian y col., 2012), robots ortopédicos (Kuang y col., 2009), entre otros. De acuerdo con Glendon y col. (2016), la técnica TAFEI puede proporcionar una imagen útil de las interacciones entre los operadores humanos y los componentes de la máquina, dentro de un sistema con respecto a posibles acciones y errores. El uso de TAFEI para evaluar una máquina ex-

■ **Tabla 5. Resultado del análisis de carga mental del Workload Profile.**
Table 5. Workload Profile mental load analysis result.

	Participante										Total	Promedio	Desviación estándar
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10			
1.1. Seleccionar las puntas para oídos según la talla.	1.6	0.4	0.5	1.5	3.6	2.0	1.1	1.0	1.7	0.1	13.5	1.35	1.00
1.2. Colocar las puntas para oídos en los audífonos.	1.9	0.7	0.8	1.6	3.5	2.7	1.8	1.1	1.7	0.3	16.1	1.61	0.96
1.3. Verificar que las puntas se ajusten a los oídos.	4.4	2.9	1.2	0.8	4.0	1.3	0.8	0.8	0.4	1.3	17.9	1.79	1.44
2.1. Localizar el botón de encendido.	1.2	0.4	0.9	0.0	3.7	1.8	0.7	1.1	0.2	0.5	10.5	1.05	1.07
2.2. Presionar el botón de encendido 2.5 s.	0.0	0.5	0.6	0.0	3.5	2.5	1.3	2.1	2.2	1.4	14.1	1.41	1.16
2.3. Buscar la señal lumínica de encendido.	0.6	3.5	6.1	0.0	5.2	3.3	0.3	1.9	0.0	0.0	20.9	2.09	2.30
3.1. Presionar el botón de activación.	0.9	0.4	6.5	1.1	3.8	0.9	0.4	0.8	0.3	0.3	15.4	1.54	2.03
3.2. Ingresar la contraseña, si es necesario.	0.0	0.0	0.0	0.4	3.4	0.0	0.9	0.5	0.3	0.2	5.7	0.57	1.04
4.1. Abrir el menú “Configuración” del dispositivo.	0.5	0.5	0.7	0.9	2.6	1.7	0.4	0.5	0.7	0.3	8.8	0.88	0.72
4.2. Tocar la opción “bluetooth”.	0.5	0.0	0.5	0.7	2.1	1.0	0.4	0.3	0.4	0.3	6.2	0.62	0.58
4.3. Tocar el interruptor para activar el “bluetooth”.	0.5	0.5	0.5	0.0	2.9	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	6.2	0.62	0.81
4.4. Verificar que el “bluetooth” está activado.	0.2	0.1	0.3	0.0	3.2	0.3	0.1	0.3	0.0	0.0	4.5	0.45	0.97
5.1. Buscar el nombre de los audífonos en el dispositivo.	0.2	0.8	6.5	0.3	2.7	0.8	0.1	0.2	0.8	0.2	12.6	1.26	1.99
5.2. Tocar el nombre de los audífonos.	0.8	0.5	0.0	0.0	3.2	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	6.1	0.61	0.94

pendedora de boletos, utilizada en el metro de Londres, permitió realizar la evaluación en solo 3.5 h, en comparación con el tiempo de observación directa de 31.5 h de acuerdo con Stanton y Baber (2005).

En el presente trabajo, se corroboraron las ventajas del uso de TAFEI para evaluar la facilidad de uso de un equipo, en este caso el teléfono móvil. Esta técnica está diseñada para detectar con facilidad el número de transiciones ilegales que realiza el usuario, al observar la forma en la que opera o sigue las instrucciones de uso del artículo de interés (Stanton y col., 2013). En el caso particular de los audífonos analizados, se detectó que hay tres posibles situaciones que pueden generar un error en este caso de estudio. El diseño parece presentar deficiencias para que el usuario identifique correctamente las puntas para cada oído, además, el tamaño de la señal lumínica y su ubicación son difíciles de detectar por el usuario. En el caso del análisis de carga mental, realizado por medio de WP, se encontró que, en aquellas subtareas con una mayor carga mental, se tenían elementos en común, como son la correcta colocación de las puntas y el correcto encendido de los audífonos.

Para el caso de WP, Tsang y Velazquez (1996), informaron que la técnica WP logró un nivel similar de validez concurrente y confiabilidad test-retest, con respecto a las otras técnicas de evaluación de carga de trabajo probadas. Además, WP también demostró un nivel de sensibilidad a las diferentes demandas de tareas. En un estudio realizado por Rubio y col. (2001), se compararon las técnicas WP, NASA-TLX y SWAT, en términos de intrusión, diagnóstico, sensibilidad, validez (convergente y concurrente) y aceptabilidad. Y se encontró que la técnica WP posee una sensibilidad más alta que las técnicas de NASA-TLX y SWAT. Por otra parte, WP es rápido y fácil de usar, y requiere una formación mínima del analista (Stanton y col., 2013). Además, como la técnica se aplica después del ensayo, puede aplicarse en entornos reales.

Durante la evaluación de la carga mental de tareas, el WP proporciona los valores promedio de carga a partir de solo 8 dimensiones o fuentes posibles. Este número reducido de valores, podría interpretarse como relativamente poco significativos para declarar la presencia de carga mental. Sin embargo, en algunos estudios, como el presente, en el que el propósito de la evaluación se enfoca principalmente en determinar aquellos elementos o subtareas cuyos valores de carga aportan más a la carga mental total de la tarea, dando origen a errores humanos en el uso de dispositivos, el WP se vuelve una herramienta muy útil.

Entre las ventajas encontradas en la utilización de estos métodos en conjunto, está el contar con un análisis más completo de las tareas y de los elementos que pueden ser fuente de carga mental de trabajo, y con ello, una mayor comprensión de la posible ocurrencia del error. Así, en este análisis, se puede observar que los dos errores analizados en TAFEI, como lo son la errónea identificación de las puntas para los oídos y la falta de detección de la señal lumínica, se presentan en dos de las subtareas que registraron mayor carga mental de trabajo.

CONCLUSIONES

La implementación de la metodología propuesta en este trabajo, para mejorar la experiencia de usuario, por medio de análisis cognitivos permitió detectar aspectos de diseño o empaque que pueden causar cierta confusión en el usuario, así como aquellas acciones que ocasionan una mayor carga mental, que podrían desalentar el consumo de más productos de la marca. Esta técnica puede ser de utilidad para aquellos diseñadores de productos en donde la interacción humano-artefacto sea relevante, desde el punto de vista de eficiencia, *confort* y seguridad. Incluso, puede contribuir a marcar la diferencia como ventaja competitiva entre una marca y otra, no sólo al brindar una mejor experiencia de usuario, sino también una experiencia más segura, confortable y confiable en el uso de

productos. A partir de estos análisis, es posible recomendar cambios en el diseño del producto, de tal forma que se facilite la identificación correcta de las puntas para cada oído a través de una codificación por color o ubicación dentro del empaque. En base a lo anterior, se puede considerar que realizar un análisis de los errores potenciales, así como determinar la carga mental generada en el uso de los productos, proporciona valiosa información, que puede ser utilizada al momento de diseñarlos y evaluarlos. De esta manera, se puede asegurar su correcta utilización, e incrementar su nivel de usabilidad,

y entonces poder reducir el nivel de frustración de los usuarios. Si bien, por medio de este trabajo se presenta una metodología para la evaluación de los posibles elementos que afectan la experiencia de usuario de los productos, es necesario realizar más estudios que involucren activamente a los diseñadores de productos, también es recomendable que se utilicen otros métodos de análisis de error humano y de carga mental, para que el diseñador aplique el que más se adapte a sus necesidades.

REFERENCIAS

- Albert, W. and Tullis, T. (2013). *Measuring the User Experience: Collecting, Analyzing, and Presenting Usability Metrics*. United States of America: Newnes. 320 Pp.
- Alferez-Padron, C., Maldonado-Macías, A. A., García-Alcaraz, J., Avelar-Sosa, L., and Realyvasquez-Vargas, A. (2017). Workload assessment and human error identification during the task of taking a plain abdominal radiograph: A case study. In C. Baldwin (Ed.), *Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering* (pp. 108-119). United States of America: Springer.
- Annett, J. (2004). Hierarchical Task Analysis (HTA). In N. Stanton, A. Hedge, K. Brookhuis, E. Salas, and H. Hendrick (Eds.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods* (pp. 329-337). United States of America: CRC Press.
- Baber, C. and Stanton, N. (2004). Task Analysis for Error Identification. In N. Stanton, A. Hedge, K. Brookhuis, E. Salas, and H. Hendrick (Eds.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods* (pp. 378-389). United States of America: CRC Press.
- Bommer, S. C. and Fendley, M. (2018). A theoretical framework for evaluating mental workload resources in human systems design for manufacturing operations. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 63: 7-17.
- Bustamante, N. G., Maldonado-Macías, A. A., Durán, A. A., Ortiz-Nicolás, J. C., and Quiñones, A. R. (2018). Usability Test and Cognitive Analyses during the task of using wireless earphones. In J. Hernández-Arellano, A. Maldonado-Macías, J. Castillo-Martínez, and P. Peinado-Coronado (Eds.), *Handbook of Research on Ergonomics and Product Design* (pp. 241-263). Hershey, PA: IGI Global. 446 Pp.
- Cabero-Almenara, J., Tena, R. R. y Osuna, J. B. (2002). Las personas mayores y las nuevas tecnologías: Una acción en la sociedad de la información. *Innovación educativa*. (12): 319-337.
- Forsythe, C., Liao, H., Trumbo, M. C. S., and Cardona-Rivera, R. E. (2014). *Cognitive Neuroscience of Human Systems: Work and Everyday Life*. United States of America: CRC Press. 316 Pp.
- Glendon, A. I., Clarke, S., and McKenna, E. (2016). *Human Safety and Risk Management* (Second Edition). United States of America: CRC Press. 528 Pp.
- Haartsen, J. (1998). Bluetooth-The universal radio interface for ad hoc, wireless connectivity. *Ericsson review*. 3(1): 110-117.
- Homburg, C., Schwemmler, M., and Kuehnl, C. (2015). New product design: concept, measurement, and consequences. *Journal of Marketing*. 79(3): 41-56.
- JBL (s/f). Reflect BT. Workout-ready, Bluetooth®-enabled, in-ear headphones. [En línea]. Disponible en: https://www.jbl.com/on/demandware.static/-/Sites-masterCatalog_Harman/default/dw16fbdae7/pdfs/ReflectBT_SS_EN.pdf. Fecha de consulta: 12 de noviembre de 2017.
- Kuang, S. L., Hu, L., Zhang, S. T., and Gao, D. H. (2009). Applying TAFEI method to orthopaedic robot system's requirements analysis. In *2009 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/5339384/proceeding>. Fecha de consulta: 14 de noviembre de 2017.
- Márquez, L. D. M. (2002). Las personas mayores ante las tecnologías de la información y la comunicación. Estudio valorativo. *Profesorado, Revista de Currículum y*

Formación del Profesorado. 6(1): 1-9.

Milán, E. G., Salazar, E., Domínguez, E., Iborra, O., de-la-Fuente, J. y de-Córdoba, M. J. (2015). Neurotermografía y termografía psicósomática. Fundación Internacional artecittà, en *ReseachGate*. [En línea]. Disponible en: <http://goo.gl/Af5kov>. Fecha de consulta: 14 de octubre de 2017.

Mohammadian, M., Choobineh, A. R., Mostafavi-Nave, A. R., and Hashemi-Nejad, N. (2012). Human errors identification in operation of meat grinder using TAFEI technique. *Journal of Occupational Health and Epidemiology*. 1(3): 171-181.

Nielsen, J. (1994). *Usability Engineering*. San Diego: Morgan Kaufmann. 369 Pp.

Nielsen, J. (2001). Usability Metrics, de Nielsen Norman Group website. [En línea]. Disponible en: <https://www.nngroup.com/articles/usability-metrics/>. Fecha de consulta: 10 de julio de 2019.

Rubio, S. (2002). Evaluación y medida de la carga de trabajo mental en una tarea de diagnóstico de fallos. [En línea]. Disponible en: <http://eprints.ucm.0es/tesis/19911996/S/4/S4002601.pdf>. Fecha de consulta: 27 de octubre de 2017.

Rubio, S., Díaz, E. M. y Martín, J. (2001). Aspectos metodológicos de la evaluación subjetiva de la carga mental de trabajo. *Archivo de Prevención de Riesgos Laborales*. 4(4): 160-168.

Stanton, N. (2006). Hierarchical task analysis: Developments, applications, and extensions. *Applied Ergonomics*. 37(1): 55-79.

Stanton, N. and Baber, C. (2005). Validating task analysis for error identification: reliability and validity of a human error prediction technique. *Ergonomics*. 48(9): 1097-1113.

Stanton, N., Salmon, P. M., and Rafferty, L. A. (2013). *Human Factors Methods: A Practical Guide for Engineering and Design*. United States of America: Ashgate Publishing. 657 Pp.

Tsang, P. S. and Velazquez, V. L. (1996). Diagnosticity and multidimensional subjective workload ratings. *Ergonomics*. 39(3): 358-81.



Imagen de ar130405 de pixabay

Retos para las *spin-off* académicas en México como resultado de la valorización económica de I+D+i de las universidades

Challenges for the academic spin-offs in Mexico as a result of the economic valorization of RD & I from the universities

María Teresa Maldonado-Sada^{1*}, Frida Carmina Caballero-Rico¹, Loecelia Ruvalcaba-Sánchez²

RESUMEN

El modelo de valorización económica, de los resultados de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) de las universidades, mediante la creación de empresas *spin-off*, ha demostrado tener un alto índice de éxito e impacto social en diferentes países. En las universidades de Latinoamérica se está fomentando la cultura emprendedora para su creación, por los beneficios económicos que se generan para la universidad y los investigadores participantes. El objetivo del presente trabajo fue analizar el contexto nacional e internacional de las *spin-off* académicas, para identificar algunos de los factores que favorecen u obstaculizan su creación y éxito, como estrategia para acelerar su implementación en México. Al ser un modelo recientemente introducido al país, las *spin-off* académicas requieren la creación de un nuevo marco legal dentro de las universidades para establecer con claridad beneficios y compromisos de la institución y participantes, así como, favorecer su gestión, implementación y crecimiento. Además, de encaminar los resultados de I+D+i para que puedan ser comercializables, capacitar a los investigadores en emprendimiento y propiedad intelectual, aumentar la inversión en investigación privada, y generar políticas y condiciones para incrementar el número de investigadores en México.

PALABRAS CLAVE: valorización económica, *spin-off*, *spin-off* académica, I+D, innovación.

ABSTRACT

The economic valorization model from the Research Development and Innovation (RD & I) for higher education research results through the creation of spin-offs, has demonstrated to attain a high success index and a positive social impact in several countries. Accordingly, Latin American Universities are encouraging an entrepreneurship culture for the creation of spin-offs since it leads to economic profits for both, the University and the participating researchers. The objective of this paper was to analyze the national and international context of academic spin-offs in order to identify some factors that promote or prevent their creation and success as strategy to accelerate their implementation in Mexico. Since this model has recently been introduced to the country, academic spin-offs require the creation of a new legal framework inside the universities in order to achieve two main goals: one is to establish clearly the rights and responsibilities of the institution and the participants, and the second one entails fostering their management, implementation and development. In addition, there is similarly a need to channel the RD & I results in order to transform them into marketable goods; to train researchers in entrepreneurship and intellectual property; increase private research investment, and generate policies and conditions to increase the number of researchers in Mexico.

KEYWORDS: economic valorization, spin-offs, academic spin-offs, RD & I, innovation.

*Correspondencia: mmaldonado@uat.edu.mx/ Fecha de recepción: 9 de Abril de 2018/ Fecha de aceptación: 3 de Julio de 2019/ Fecha de publicación: 29 de julio de 2019

¹Universidad Autónoma de Tamaulipas, Gestión y Transferencia del Conocimiento, Centro Universitario Adolfo López Mateos, Edificio Centro de Excelencia, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México, C. P. 87149. ²Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial Aguascalientes, CONACYT.

INTRODUCCIÓN

La creación de nuevas empresas, en particular las de base tecnológica, ha sido uno de los principales factores que favorecen el crecimiento de la economía en ámbitos locales, regionales y a nivel nacional (Lejpras, 2014). Los emprendimientos *spin-off*, como empresas de base tecnológica, han ofrecido una oportunidad para crear un cambio sustancial y positivo en los países en donde se crean (Bruton y col., 2013; Castillo-Vergara y Alvarez-Marin, 2015). Lo anterior se ha dado mediante la investigación de valor (Leten y col., 2014; Gusberty y Dewes, 2017), la transferencia del conocimiento (Audretsch, 2014) y el desarrollo tecnológico (Leten y col., 2014).

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) define a las *spin-off* como: a) empresas creadas por investigadores de universidades u otras organizaciones del sector público; b) empresas emergentes de licencias de explotación de tecnologías creadas en el sector público; y c) empresas emergentes por la participación directa de fondos públicos, o que fueron creadas a partir de instituciones públicas de investigación (OCDE, 2001). Lo anterior se muestra en la de Figura 1.

Naranjo (2011), sugiere que el término *spin-off* nació en Estados Unidos en los años setenta, tomando como ejemplo la generación de empresas espontáneas e independientes que surgieron como nueva actividad de otras ya existentes, o de los laboratorios universitarios de California, en Silicon Valley. Por otra parte, Bernasconi y Jolly (2007), diferenciaron el concepto genérico de *spin-off* de la *spin-off* universitaria o académica, debido a que mientras estas últimas hacen hincapié en la transferencia de conocimiento, las primeras hacen mayor énfasis en la transferencia de personal. Técnicamente, las *spin-off* académicas se basan en la innovación y se originan de un organismo público de investigación o una institución de educación superior (Helm y Mauroner, 2007). Pueden ser de base tecnológica, de I+D+i (Czarnitzki y Ram-

mer, 2014), de servicios o negocios (Zarrabeitia y col., 2016).

La importancia atribuida a la utilización del conocimiento producido en las universidades y en las empresas, ha generado un gran interés por el estudio a profundidad de este tema, sobre todo por el impacto económico y social que puedan generar (Zucker y col., 1998). En este sentido, las *spin-off* cobran importancia dentro de un modelo de valorización económica de los resultados de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) de las universidades, ya que se ha demostrado tener un alto índice de éxito e impacto social en diferentes países desarrollados y en vías de desarrollo (Lejpras, 2014). Así mismo, se puede obtener un beneficio económico, tanto para la universidad donde se desarrolla (Castillo-Vergara y Alvarez-Marin, 2015), como para los investigadores involucrados.

El tema es reciente en México, por lo que hay pocas *spin-off* académicas reportadas en la literatura; se puede destacar a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) con dos empresas exitosas: una en la Facultad de Ciencias Físicas denominada Corrosión y Protección Ingeniería, y otra, Agro&Biotechnia, en el Instituto de Biotecnología, en conjunto con el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo de Culiacán (CIAD) (Galindo y col., 2015; CCC, 2019); y a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) con la empresa INNTECVER (CCC, 2019).

El objetivo de este trabajo fue determinar el contexto nacional e internacional de *spin-off* académicas, para identificar algunos de los factores que han favorecido o han sido un reto para su creación y éxito en las universidades, y valorarlos como parte de las estrategias de modelos de *spin-off* para su implementación en México.

Creación de *spin-off*

Las *spin-off* académicas pueden surgir del modelo de triple hélice (universidad, Estado y sector privado) (Grasmic, 2016), en donde la uni-



■ Figura 1. Principales orígenes de las empresas *spin-off*. Modificado a partir de OCDE, 2001.

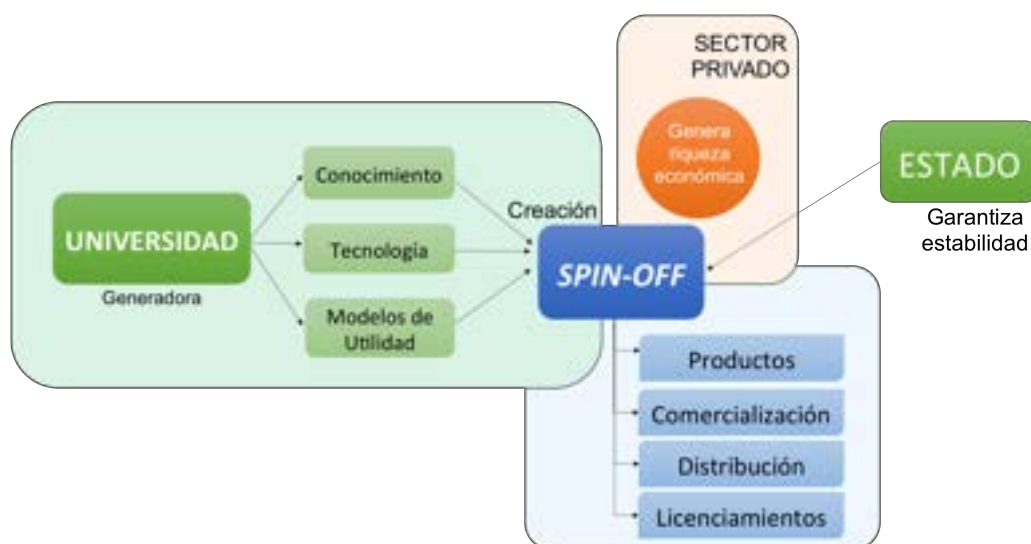
Figure 1. Main origins of Spin-off companies. Modified from OCDE, 2001.

versidad es la generadora del conocimiento, la empresa es el lugar donde se comercializa el producto o servicio, y el estado garantiza su estabilidad, el intercambio y el financiamiento de la investigación (Botero y col., 2014). Este modelo ha sido superado y se han incorporado nuevas hélices, como el sector social, que aunque no forma parte del sistema productivo, puede ser parte del conocimiento generado o el usuario que recibe la transferencia de este conocimiento o tecnología (Morales-Rubiano y col., 2015). En la Figura 2 se contemplan las hélices elementales del concepto de *spin-off* universitaria. Narváez-Vásquez y col. (2016), señalan que las *spin-off* académicas: 1) son creadas en las universidades o centros públicos de investigación; y 2) son resultado de las investigaciones del personal que funge como propietario; y se originan del emprendimiento académico. Los aspectos más importantes para la creación de las mismas son las habilidades del investigador(es), que a su vez se influyen por la creatividad, la aplicación percibida y la experiencia empresarial (Miranda y col., 2017).

Las etapas para la creación de las *spin-off* son la idea, el concepto de negocio, los recursos fi-

nancieros y la cultura emprendedora (Elpida y col., 2010). Estas etapas deben tener un soporte estructural y operacional, como las necesidades del mercado, las habilidades del capital humano, las políticas públicas, el marco jurídico, los recursos de capital y las universidades como semilleros para la creación de empresas. El desarrollo de una *spin-off* académica representa un gran reto para sus creadores, quienes se enfrentan a obstáculos importantes, particularmente porque el crecimiento de la *spin-off* se relaciona con competir en un ambiente comercial o industrial muy diferente al contexto universitario. Además de que, en muchas ocasiones, los investigadores poseen poca o nula capacitación relacionada con la gestión de negocios para explotar las oportunidades de mercado. Otras de las barreras para la creación de las *spin-off* son la falta de recursos financieros, el alto riesgo, la información de mercado, así como, falta de tiempo de los investigadores (Rodeiro-Pazos y col., 2010; Fernández-Alles y col., 2015).

Zúñiga-Zapata (2013), recomienda que las universidades interesadas en iniciar una *spin-off* realicen un análisis profundo de las condiciones que cuentan, tales como las caracte-



■ Figura 2. Concepto de *spin-off* universitaria o académica. Modificado a partir de Bernasconi y Joly (2007); Botero y col. (2014); Narváez-Vásquez y col. (2016).

Figure 2. Concept of University or Academic Spin-off. Modified from Bernasconi y Joly (2007); Botero y col. (2014); Narváez-Vásquez y col. (2016).

rísticas del investigador y compromiso emprendedor, características del entorno y de la tecnología, reconocimiento de la oportunidad emprendedora, características de apoyo o unidad de transferencia de la tecnología, marco jurídico y legal, y la disponibilidad de recursos, entre otros.

Monge y col. (2010), señalan que el conocimiento que se constituye como base de la empresa *spin-off* universitaria puede ser tácito o explícito. En ambos casos, su aprovechamiento y explotación adecuada puede producir un desarrollo empresarial, y con ello un crecimiento económico, que incide sobre la mejora competitiva del sector productivo y beneficiar a la institución educativa (Helm y Mauroner, 2007; Narváez-Vásquez y col., 2016).

Las *spin-off* y la valorización económica de las universidades

Una forma de impulsar la formación de negocios *spin-off* relacionados con nuevas tecnologías, es a través de las instituciones de educación superior (IES). Lo anterior, específicamente, por su contribución en la formación

de recursos humanos de alto nivel y la investigación aplicada, para el desarrollo de tecnología, patentes, contratos y licenciamientos (Iacobucci y Micozi, 2014). Es por ello que, las potencias mundiales tienen un alto grado de inversión en I+D+i, así como un gran número de investigadores y estudiantes trabajando en la generación y transferencia de conocimiento (Rodeiro-Pazos y col., 2010).

En la Figura 3, se muestra un esquema general de la valorización económica del conocimiento generado a través de los diferentes procesos de I+D+i universitaria, donde la creación de una *spin-off* es una manera de agregar valor comercial a los productos de una IES. En este esquema, los resultados de I+D+i de la IES, a través de distintos medios de financiamiento (recursos propios, privados, estatales o federales), tradicionalmente generan productos susceptibles para protección de propiedad intelectual, ya que es una de las vías para producir valor económico a la institución. Otras opciones son la venta y el licenciamiento de los derechos de explotación de la propiedad intelectual.



■ Figura 3. Valorización económica de los resultados de I+D+i de una IES. Modificado a partir de los planteamientos de Helm y Mauroner (2007); Narváez-Vásquez y col. (2016).

Figure 3. Economic value of results of RD & I from a Higher Education Institution. Modified with the approach of Helm y Mauroner (2007); Narváez-Vásquez y col. (2016).

Así mismo, las IES pueden comercializar los resultados de las investigaciones, financiadas por medios públicos mediante otras estrategias, aparte de las que se mencionan en la Figura 3. Estas pueden ser, la creación de *spin-outs*, *start-ups*, oficinas de transferencia de tecnología, incubadoras de empresas, parques científicos y tecnológicos, consultorías, centros de investigación, organizaciones regionales de innovación, centros o unidades empresariales, entre otros (Helm y Mauroner, 2007; De-Cleyn y col., 2015).

Inversión en investigación de las instituciones de educación superior

Otro factor que limita o favorece directamente la creación y éxito de las *spin-off* es la inversión destinada a I+D+i de las universidades. La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), observó que algunas IES destinan un presupuesto importante en este rubro y promueven, además, la transferencia del conocimiento a la industria, mediante contratos de investigación de la IES hacia el exterior (UNESCO, 2010). En este contexto, se muestra en la Tabla 1, la inversión en I+D+i y el presupuesto total de algunas de las princi-

pales IES de Estados Unidos, Europa y América Latina. En los países de América Latina, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Politécnico Nacional (IPN) se encuentran entre las universidades con mayor presupuesto total (UNAM, 2016; IPN, 2018). En cambio, otras universidades de América Latina como la Universidad de Chile (UCHILE) y la Universidad de Santiago de Chile (USACH), tienen un presupuesto escaso en comparación de los demás países (UCHILE, 2017; USACH, 2018). Entre mayor presupuesto tenga la universidad, mayor debiera de ser su inversión en I+D+i, sin embargo no siempre es así, tal es el caso del IPN con \$ 860.47 MDD, el cual, sólo invierte el 1.4 % de su presupuesto en I+D+i, mientras que la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), con \$ 394 MDD, destina el 8.6 % a este rubro (UANL, 2017; IPN, 2018).

Visto de una manera global, en la inversión que realizan distintas universidades en I+D+i destaca el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) de Estados Unidos, con un 70 % (MIT, 2016), ocupando el tercer lugar en el *ranking web* mundial de universidades; y el ETH de Zürich, Suiza (por sus siglas en in-

■ Tabla 1. Inversión en I+D+i en algunas universidades del mundo. Modificado a partir de datos de las de las universidades y los Gobiernos del país de origen.

Table 1. Investment on RD & I in some Universities around the world. Modified with the most recent data found from the Universities and Governments of the country of origin.

Nombre de la universidad	Total del presupuesto	Inversión en I+D+i	% en I+D+i	Fuente (Presupuesto e Inversión I+D+i)	Spin-offs registradas en literatura	Fuente Spin-off	Ranking mundial (WEBOMETRICS, 2019)
MIT (EU)**	\$ 3 349.90	\$ 2 333.80	69.7	MIT, 2016	1 865	Roberts y Eesley, 2011	3
Standford Univeristy (EU)***	\$ 6 500.00	\$ 1 105.00	17.0	Stanford University, 2018	2 700	Lebret, 2010	2
ETH Zürich (Suiza)	\$ 1 770.83	\$ 1 009.38	57.0	ETH, 2015	364	ETH, 2019	27
University of Cambridge (Reino unido)**	\$ 2 554.50	\$ 682.37	26.7	CAM, 2018	135	Spinouts, 2019	11
UNAM (México)	\$ 2 150.00	\$ 569.00	26.5	UNAM, 2016	11	Torres, 2017	128
IPN (México)	\$ 860.47	\$ 12.15	1.4	IPN, 2018	0	NA	892
UANL (México)	\$ 394.00	\$ 34.00	8.6	UANL, 2017	0	NA	1320
UAT (México)	\$ 47.50	\$ 3.80	8.0	MILENIO, 2018	0	NA	3133
Universidad de Chile (Chile)*	\$ 0.99	\$ 0.18	18.2	UCHILE, 2017	10	UCHILE, 2011	371
USACH (Chile)*	\$ 0.26	\$ 0.07	27.0	USACH, 2018	2	USACH, 2019	1265
Universidad de Granada (España)**	\$ 486.36	\$ 123.57	25.4	UGR, 2018	59	UGR, 2019	226
Universidad Politécnica de Madrid (España)	\$ 288.00	\$ 163.00	56.6	UPM, 2016a	88	UPM, 2016b	323
Universidad de Sevilla (España)	\$ 357.00	\$ 126.00	35.3	USEV, 2017	18		350

Se tomaron en cuenta el promedio del tipo de cambio del año de los datos: \$ 19 MXN/USD (2017), \$ 1.2 EURO/USD; \$ 680 CLP/USD (2018); \$ 0.96 CHF/USD. *Se tomó en cuenta el Gasto en Personal en I+D+i o académico como Inversión en I+D. **La inversión para la investigación es de fuentes internas y patrocinadas. ***La inversión para la investigación es de fuentes patrocinadas.

glés: Swiss Federal Institute of Technology Zurich) (ETH, 2015), donde tienen actualmente 364 *spin-off* académicas, desde sus inicios, un poco antes del año 2000 (ETH, 2019); y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), ambas con alrededor del 57 %, aunque con una diferencia en el *ranking* muy amplia, ubicándose en el lugar 27 y 323, respectivamente. Así mismo, aunque en la Universidad de Stanford (Stanford University, 2018), sólo se invierte el 17 % en investigación, esta inversión es completamente financiada por fuentes externas, por lo que la cantidad de *spin-off* creadas es superior a otras universidades (Tabla 1). En los países de América Latina, en inversión en I+D+i, destaca en primer lugar la USACH con 27 %, en segundo la UNAM, con un 26.5 % (UNAM, 2016); y en tercer lugar la UCHILE con un 18.2 % (UCHILE, 2017). Otras universidades en México, como la UANL, sólo destina el 8.6 % (UANL, 2017), y la Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT) el 8 %. (MILENIO, 2018). En España, la Universidad de Granada (UGR), la Universidad de Sevilla (US) y la UPM invierten un porcentaje arriba del 25 % a la I+D+i, esto debido a las nuevas metas trazadas por cada una de estas universidades para los próximos años (UPM, 2016a; USEV, 2017; UGR, 2018).

La Universidad de Stanford y el MIT de Estados Unidos, coinciden en que, entre mayor inversión en I+D+i destinen, mayor será el número de *spin-off*. La primera tiene 1 865 empresas *spin-off* registradas en la literatura (Roberts y Eesley, 2011) y la segunda 2 700 (Lebret, 2010). En México, por ejemplo, la universidad que tiene más posibilidades para la creación de *spin-off*, si se tomara en cuenta solo la inversión en I+D+i, es la UNAM, lo cual coincide con lo registrado en la literatura de 11 *spin-off* creadas (Torres, 2017), sin embargo, siguen siendo pocas con respecto a otras universidades con casi el mismo presupuesto para I+D+i, como la Universidad de Cambridge (CAM, 2018), donde se tienen 135 *spin-off* creadas (Spinouts, 2019). En las dos universidades chilenas analizadas (Tabla 1),

la premisa “mayor inversión en investigación, más cantidad de *spin-off*” muestra una especial particularidad, ya que ambas presentan bajo presupuesto total, pero un alto porcentaje de inversión en I+D+i, y presentan *spin-off* registradas en la literatura, contrario a lo observado en algunas de las instituciones mexicanas estudiadas (IPN, UANL y UAT). Así mismo, en España, y posteriormente en Chile, la creación e implementación de *spin-off* se ha desarrollado mucho antes que en México, por las políticas de estos países. Destaca entre ellas, la UPM con 56.6 % de inversión en investigación (UPM, 2016a) y 88 empresas *spin-off* creadas (UPM, 2016b); la UGR con 59 *spin-off* (UGR, 2019), la US con 18 *spin-off* (UPM, 2016b), y por último la UCHILE con 10 *spin-off* (UCHILE, 2011).

El éxito de las *spin-off* académicas

Las *spin-off* que han resultado más exitosas son aquellas creadas para resolver problemas de la región (Helm y Mauroner, 2007). Estas empresas pueden ser de base tecnológica o de I+D+i. Algunos ejemplos muy claros de éxito ampliamente reconocido en el mundo, por ser pioneros en la creación e implementación de *spin-off*, son las empresas que se sitúan en Estados Unidos, en el área de Silicon Valley, en California y Boston; y en Reino Unido, destacan Cambridge y Oxford. Por otro lado, el Instituto de Investigación de la Universidad de Stanford (Stanford University, 2018), en Estados Unidos, ha creado más de 60 *spin-off*, con una capitalización en el mercado de casi 20 billones de dólares. Entre los factores que han destacado para el éxito de estas *spin-off*, están los modelos de negocios de los resultados de investigación, y tener en cuenta las diferentes habilidades de cada uno de los miembros del equipo de investigación, considerando estrategias para fomentar las capacidades del equipo. Lo anterior, independientemente del perfil técnico de los investigadores. Así mismo, se debe considerar la formación en negocios para el éxito de la creación de *spin-off* (Castillo-Vergara y Alvarez-Marín, 2015). Para la supervivencia de las

spin-off también se deben de tomar en cuenta: a) el incremento en las ventas; b) crecimiento de empleos; c) rentabilidad; d) eficiencia en costos; e) oportunidad de obtener un mayor crédito bancario; f) tiempo en el mercado; y g) más apoyos de inversión de capital (Helm y Mauroner, 2007; Czarnitzki y Rammer, 2014). Además de considerar que, las *spin-off* universitarias con capital de riesgo, que exportan y poseen patentes, tienen una supervivencia mayor que el resto (Pazos y col., 2016).

Contexto mundial de las *spin-off*

En algunos países, como Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, España e Italia, se ha facilitado la creación de *spin-off* dentro de las IES. El apoyo del gobierno y de organizaciones públicas de investigación, son de suma importancia para su creación, mantenimiento y crecimiento; este apoyo se brinda a través de fondos y políticas específicas (Czarnitzki y Rammer, 2014).

En la I+D+i, el licenciamiento de tecnologías es una manera de generar ingresos para las *spin-off* y una forma de transferencia del conocimiento, por lo que es importante mencionarla. Estados Unidos, por ejemplo, lidera el licenciamiento de tecnologías en el mercado mundial generado en las IES (UNESCO, 2010; Gresser, 2014), con una cuota o tasa de licenciamiento para el 2013 de 128 billones de dólares, comparado con el total mundial de 329 billones de dólares, que es el 38.9 % de las regalías en licenciamiento de tecnologías del mundo (Gresser, 2014).

Las *spin-off* en Alemania e Italia son más recientes, y tienen su origen en las nuevas políticas y programas para la investigación pública (Czarnitzki y Rammer, 2014; Iacobucci y Micozzi, 2014; Stephan, 2014). Estas *spin-off* se desarrollan en los clústeres de IES basadas en ciencia y desarrollo tecnológico. En Italia, a través de la Agencia Italiana de Investigación sobre Nuevas Tecnologías, Energía y Desarrollo Económico Sostenible (ENEA, por sus siglas en italiano: Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo

economico sostenibile), se realizaron varios polos italianos como Parto, Sassuolo, Como, Viena y Capri; y por la Agencia de Desarrollo Económico Emilia-Romagna (ERVET, por sus siglas en italiano: Emilia-Romagna Valorizzazione Economica Territorio SpA) se produjeron centros sectoriales de servicio. Así mismo, Lombardía es el motor económico de Italia y es el responsable del 21 % del producto interno bruto (PIB) italiano, y del 30 % de las exportaciones de este país; la mayoría de las *spin-off* de Italia operan en Milán, y la mayoría de ellas obtienen financiamiento por inversión o por capital (Coletti, 2015). En Alemania, a través de la Asociación Helmholtz, se han establecido más de 175 *spin-off* directamente de los centros de investigación, como un canal importante de transferencia. Estas *spin-off* se basan en tecnologías y desarrollos específicos por científicos de todo el país, y están activas en todos los sectores tecnológicos de la economía (Helmholtz, 2019).

En España, las leyes que sustentan la creación de las *spin-off*, son la Ley Española de Patentes y la Ley Orgánica de Universidades (LOU). Estas nuevas leyes liberaron a los profesores-empresarios de sus obligaciones docentes, y como consecuencia, se generó una gran cantidad de empresas (Otrín y col., 2007). Las *spin-off* en España son de dos tipos: 1) las de negocios innovadores de las áreas de ciencias sociales y leyes (menos susceptibles para protección); y 2) las de base tecnológica, que surgen de las ciencias experimentales, logrando mejores resultados en el número de empleos generados, emprendedores con más experiencia para crear *spin-off*, mayores registros de propiedad intelectual, entre otros (Zarrabeitia y col., 2016).

En Andalucía, una región de bajo nivel económico, las universidades han considerado como factores principales para la creación de *spin-off* universitarias, que se tengan suficientes recursos y la posibilidad de vincularse con algún parque tecnológico. Sin embargo, muchas de estas empresas se quedan solamente

en la etapa previa a la incubación (Cáceres-Carrasco y Aceytuno, 2015).

En general, es posible apreciar que Estados Unidos fue el pionero en la creación de *spin-off*, por la facilidad de contar con fondos y políticas específicas. En Europa, Italia y Alemania, adoptaron el modelo y se crearon clústers en donde interactúan las universidades y las *spin-off* que surgen. En España, la implementación de *spin-off* es reciente, y se empiezan a ver resultados favorables desde que se eliminó o se redujo la carga académica a los investigadores.

Las *spin-off* en Latinoamérica

En países de Latinoamérica, la creación o implementación de *spin-off* universitarias se ha estudiado muy poco. Se reconoce que las IES han aportado esfuerzos para realizar actividades emprendedoras y de innovación. Sin embargo, las *spin-off* no han sido estimuladas desde las universidades latinoamericanas (Castillo-Vergara y Alvarez-Marin, 2015). En México, Colombia, Chile y Brasil, es un tema reciente, en gran medida por las políticas de algunos de estos países que son poco flexibles o no tienen un plan enfocado a ciertas áreas estratégicas como la propiedad intelectual (Naranjo, 2011; Jiménez y col., 2013; López-Obando, 2017). Se considera a Colombia y Brasil, como pioneros en Latinoamérica en la adopción de este tipo de valorización económica del conocimiento. Sin embargo, encontraron dificultades en la adaptación del concepto de *spin-off* por parte de la IES, debido a la falta de entendimiento o nulo marco legal y políticas públicas para su creación, lo que retrasó la aplicación exitosa de este modelo (Hernández-Mondragón y col., 2016). Se ha observado que algunos integrantes del personal académico o de investigación en las universidades latinoamericanas, optan por crear una empresa o compañía fuera de la universidad, debido a que buscan alternativas de actividades empresariales, pero la universidad no les brinda el apoyo adecuado (Meoli y Vismara, 2016). En el año 2010, en Chile, y en el 2015 en Colombia, se empezaron a establecer estra-

tegias para la creación, desarrollo y consolidación de *spin-off* para el fortalecimiento económico (Castillo-Vergara y Alvarez-Marin, 2015; López-Obando, 2017).

En Brasil, el principal motivo de la creación de las *spin-off* es el involucramiento de personal altamente capacitado con la universidad, y que, en la mayoría de los casos, continúa laborando en ella de tiempo parcial o completo. Así mismo, las nuevas empresas en Brasil se basan principalmente en la prestación de consultoría o de servicios de I+D y no en el desarrollo tecnológico (Jiménez y col., 2013).

En Colombia se utilizan las “innovaciones colaborativas”, que se basan en las alianzas para la transferencia del conocimiento de la IES con la industria (Naranjo, 2011). La primera *spin-off* denominada Conocimiento y Servicios de Ingeniería (Conoser) surgió en la Universidad de Antioquia, y para su creación requirió cuatro años de investigación, estudio de mercado y el apoyo económico gubernamental. Posterior a ella, surgieron empresas como BIOINNCO, en esta misma universidad; Place to Train, MercaLAB, Quantum, Plasma y Augura de la Universidad de EAFIT; Bioingeniería Core S.A. de la Universidad del Norte; INNPULSA y Tecno parque del Sena en la Universidad del Valle, entre otras (Botero y col., 2014).

Por otro lado, el gobierno de Chile, a través de su Política de Innovación 2010-2014, promulgó la Ley de Incentivo Tributario a la I+D, para modernizar y agilizar las agencias ejecutoras de I+D, y diseñar e implementar políticas de innovación a través de Estrategias Regionales de Innovación (Proyecto RED), aumentando hasta un 50 % los fondos gubernamentales. Actualmente, se hacen esfuerzos para la adaptación al nuevo paradigma de una universidad más emprendedora a través de *spin-off* académicas mediante fondos públicos (Castillo-Vergara y Alvarez-Marin, 2015). En general, en Latinoamérica se han hecho esfuerzos para la creación y desarrollo de

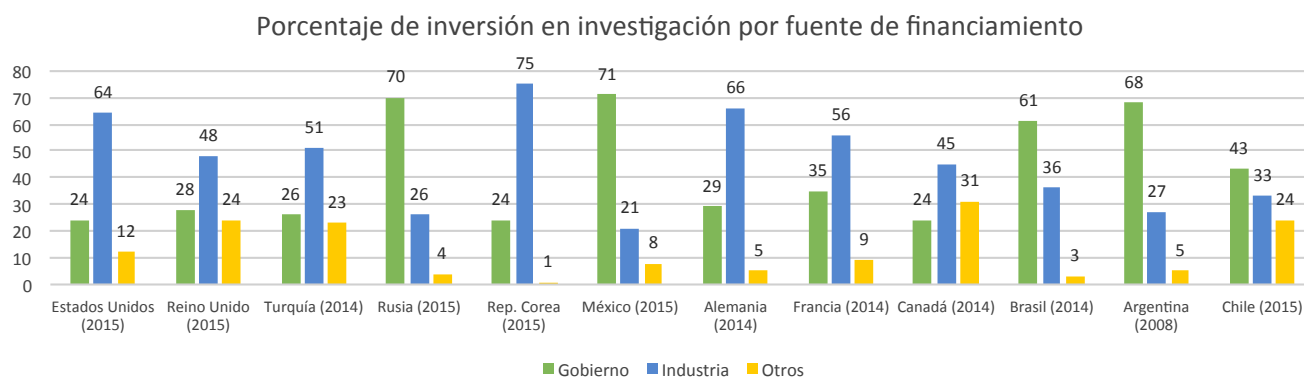
spin-off académicas. En algunos casos, como el de Chile y Colombia, a través de los gobiernos, o como en Brasil, y recientemente en México, a través de las propias universidades. Sin embargo, sigue habiendo retos y oportunidades para facilitar su mantenimiento y éxito.

Las *spin-off* en México y casos de éxito

El gobierno mexicano ha mantenido interés en la creación y desarrollo de empresas de base tecnológica, incluyendo la creación de las *spin-off*. Sin embargo, los resultados no han sido los esperados. El crecimiento de empresas de base tecnológica o de alta tecnología es muy bajo, ya que las grandes empresas son las que tienen los recursos que se necesitan para incubar proyectos tecnológicos, pero en su conceptualización, la empresas de base tecnológica debieran formarse con poco capital humano de alta especialidad y estar relacionadas con las universidades, institutos o centros de investigación (Meritt, 2012). Así mismo, hay una escasa cultura de inversión en ciencia y tecnología por parte la iniciativa privada, ya que el gobierno invierte más en este rubro que la industria. Se puede observar en la Figura 4, que la inversión pública de México es del 71 %, seguido de Rusia con el 70 %, y de Argentina con el 68 %. Por otro lado, en los países desarrollados, la inversión pública es igual o inferior al 35 % (UNESCO, 2015).

Algunas universidades, en México, ya están haciendo los primeros esfuerzos de valorización económica de I+D+i a través de *spin-off* académicas, en las que los investigadores siguen siendo parte de la universidad donde se desarrolla la empresa. Apenas en los últimos 4 años se empiezan a ver casos de éxito de *spin-off* académicas, especialmente de la UNAM. Uno de estos casos es el de la empresa “Corrosión y Protección Ingeniería”, desarrollada por el Dr. Lorenzo Martínez Gómez, investigador del Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM. Esta *spin-off* tiene la licencia exclusiva del programa de certificación y capacitación de ingenieros y técnicos en control de corrosión más reconocido en el mundo (CCC, 2019).

El Instituto de Biotecnología (IBt) de la UNAM, es el que cuenta con más casos de éxito recientes de empresas *spin-off*, en las que algunos investigadores siguen siendo parte de la UNAM y accionistas de sus empresas; y otros, donde el investigador decide emprender su camino fuera de la universidad, formando una nueva empresa *spin-off*, siendo licenciarios de la tecnología que desarrollaron como investigadores o estudiantes del IBt. Tal es el caso de la empresa GIFISA (Grupo Alimentario Farmacéutica Industrial SAPI de C.V), fundada por el Dr. Alejandro Torres Gavián, quien trabajando en equipo con otros



■ **Figura 4. Distribución de inversión en investigación por fuente de financiamiento. Modificado a partir de datos del instituto de estadística de la UNESCO (2015).**

Figure 4. Distribution by founding sources in different countries in 2015. Modified with data from UNESCO Institute of Statistics (2015).

3 investigadores, creó esta empresa por su investigación en la extracción y síntesis de capsaicinoides durante su maestría y doctorado. El Dr. Torres mencionó que, al día de hoy, GIFISA es exitosa gracias a la vinculación que tuvo con el IBt y la OTT “Inno-Ba” de la UNAM, y por poder contar con un apoyo del programa FINNOVA, así mismo, por la gran competencia, cobijo y respaldo de Inno-Ba, y por ser el pilar de su desarrollo e innovación en el futuro de esta *spin-off* (CCC, 2019).

Otro caso de éxito, es el desarrollo del biofungicida FUNGIFREE AB. Este producto es resultado de un proyecto del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD). Después de presentarse en un congreso del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) se empezó una investigación conjunta con el Instituto de Biotecnología de la UNAM, y se optó por su protección a través de una patente ante el IMPI (Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial) por medio de las IES. Los investigadores ofrecieron el licenciamiento de la tecnología a las empresas productoras de mango, sin tener ningún éxito, por lo que se fundó la *spin-off* Agro&Biotecnia para su comercialización. Por lo anterior, se obtuvo apoyo por el Fondo Mixto de Conacyt y el estado de Morelos para industrializar el producto, lograr los registros de efectividad biológica de inocuidad, efectuar el trámite de la patente en otros países y desarrollar un plan de negocios de la empresa. Sin embargo, uno de los principales retos para el buen funcionamiento de la *spin-off* fue el licenciamiento de la patente y las negociaciones con los investigadores socios de la empresa. Esto debido a que la UNAM no contaba con marco legal de este tipo de transferencia tecnológica (Galindo y col., 2015). El éxito de la empresa, no sólo se obtuvo por un buen producto o un resultado de investigación, sino por la visión multidisciplinaria de la protección industrial y de la comercialización del producto. Así mismo, fue importante el recurso humano de alta capacidad para la producción del biofungicida, y para el futuro desarrollo

de productos con valor agregado en el área de la biotecnología (Galindo y col., 2015).

En este contexto, se presenta el caso de la creación de la *spin-off* INNTECVER, que surge del desarrollo de la antena más pequeña del mundo para televisión abierta. Esta empresa fue fundada por la Dra. Tecpoyotl Torres, de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). Esta empresa fue seleccionada en el programa de becas “Líderes en Innovación 2015”, que patrocinan Newton Foundation y la Academia Real de Ingeniería de Reino Unido, donde eligen casos de éxito de transferencia tecnológica y emprendimiento (CCC, 2019).

En estos tres casos de éxito de *spin-off* académicas en México, se puede identificar que, para su creación, las IES presentan tres elementos importantes: 1) el fomento a la cultura emprendedora; 2) la oferta de servicios tecnológicos de las IES; y 3) la creación y estabilización de incubadoras de empresas (Santamaria-Velasco y Brunet-Icart, 2014).

El 89.6 % de las IES mexicanas promocionan la cultura emprendedora, y el 85.6 % de ellas tiene algún programa académico con relación a la cultura emprendedora, a través de: 1) eventos de emprendimiento; 2) cursos, talleres, seminarios y lecturas; 3) eventos de creatividad; 4) promover en los estudiantes su participación en eventos de emprendimiento fuera de la IES; y 5) promover en los estudiantes la participación en eventos de creatividad fuera de la IES. En cuanto al 89.6 % de las IES que promocionan la cultura emprendedora, resaltan las universidades públicas federales, con una promoción de sólo 50 %, mientras las universidades públicas estatales tienen un 96.9 % (Santamaria-Velasco y Brunet-Icart, 2014).

De acuerdo con la literatura, uno de los modelos que se pueden aplicar para establecer la creación de *spin-off* exitosas y/o emprendimiento académico en México, es el modelo “Investigación-Ecosistema-Gente-Propiedad

Intelectual-Transferencia-Alineación” (REPITA, por sus siglas en inglés: Research-Ecosystem-People-Intellectual Property-Transfer-Alignment), debido a que en este modelo se toma en cuenta: 1) promover la investigación aplicada; 2) ecosistema emprendedor: catalizar *spin-off* combinando recursos e incentivos; 3) recursos humanos: equipos emprendedores con habilidades de alta especialización; 4) transferencia tecnológica: llevar a cabo una estrategia de entrada y salida; y 5) enfocar: alinear la tecnología con la incubación empresarial (Cantu-Ortiz y col. 2017). Lo anterior, independientemente de si la universidad, o el instituto, tiene bajo perfil emprendedor. Este modelo es una propuesta de mejora al “Ecosistema Emprendedor” del Tecnológico de Monterrey, hacia programas de “Células de Incubación”, donde se introducen: las habilidades de investigación de graduados, el emprendimiento de base tecnológica y la transferencia de tecnología a través de *spin-off* (Cantu-Ortiz y col., 2017).

Retos para las *spin-off* en México

La creación de las *spin-off*, en las universidades de México, se puede facilitar a través de los nuevos desarrollos científicos y tecnológicos, en conjunto con la capacidad para conocer la demanda del mercado (empresas) y transferir este conocimiento (Torres y Jasso, 2019). Sin embargo, algunos de los retos de la implementación de *spin-off* en México, incluyen: a) la estructura legal e institucional de sus universidades; b) el número y las características de los investigadores dedicados a la generación de conocimiento; c) poca noción sobre negocios o emprendimiento de los investigadores; y d) la inversión en investigación de las universidades (Santamaria-Velasco y Brunet-Icart, 2014; Galindo y col., 2015; Hernández-Mondragón y col., 2016; Cantu-Ortiz y col., 2017).

a) La estructura legal e institucional de sus universidades:

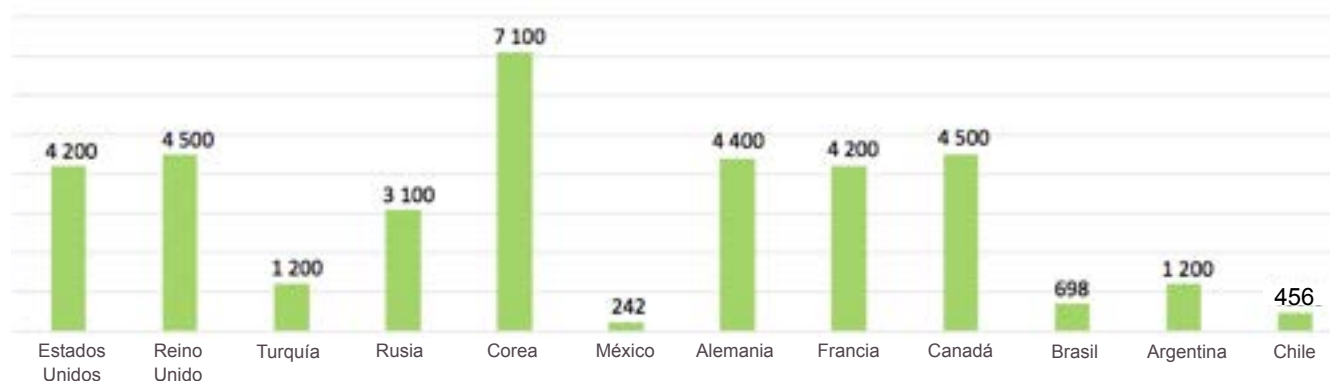
Algunos investigadores de México están interesados en comercializar los productos de sus investigaciones. Sin embargo, hay conflic-

to de interés dentro de la Ley General de Responsabilidades Administrativas, debido a que la investigación se realiza dentro de instituciones públicas, es decir, que los investigadores son servidores del gobierno de acuerdo con la ley. Por lo tanto, la transferencia tecnológica y la comercialización de su investigación es un conflicto de interés bajo este marco legal. Otros factores son, la falta de claridad de las regulaciones institucionales para que los investigadores sean socios de sus propias compañías, y la falta de financiamiento (Hernández-Mondragón y col., 2016).

b) Número y características de los investigadores: En 2017, de los 54 180 investigadores de México, sólo se encontraban asociados al Sistema Nacional de Investigadores (SNI), 27 017 investigadores (Conacyt, 2017). El número total de investigadores en México es relativamente bajo, en comparación con la población del país, toda vez que hay 242 investigadores por millón de habitantes (Figura 5) (UNESCO, 2015). Como puede verse, México está muy por debajo de países más desarrollados en I+D+i, como Alemania y Corea, o en los países donde las *spin-off* académicas han hecho crecer la economía, como Estados Unidos y Reino Unido. Así mismo, de países en vías de desarrollo, como Brasil, Argentina y Chile, donde el número de investigadores también es mayor que el de México.

c) Poca noción sobre negocios o emprendimiento entre los investigadores:

Dentro de las deficiencias que enfrenta el país, para contar con un modelo exitoso, se puede destacar: las habilidades de investigación, alta tecnología y la transferencia tecnológica (Cantu-Ortiz y col., 2017). Lo que preocupa más son los Centros de Investigación Pública con un escaso 26.7 % como anfitriones de eventos de cultura emprendedora, y entre un 0 % y 18.2 % de actividades de emprendimiento dentro de los institutos. Lo anterior resulta en la falta de comercialización de los resultados de investigación (Santamaria-Velasco y Brunet-Icart, 2014). En las universidades de México hay poca cultura emprendedora, a pe-



■ **Figura 5. Investigadores en algunos países del mundo. Modificado a partir de datos del Instituto de Estadística de la UNESCO (2015).**

Figure 5. Researchers in some countries around the world. Modified with data from UNESCO Institute for Statistics (2015).



■ **Figura 6. Inversión en investigación de algunos países del mundo (UNESCO, 2015).**

Figure 6. Research investment in some countries (UNESCO, 2015).

sar de los esfuerzos por fomentarla, por lo que los profesores y estudiantes dedicados a la investigación, aunque tienen gran capacidad de producción, la falta de capacitación en el área de emprendimiento o negocios y propiedad intelectual, influye negativamente en la creación de *spin-off*.

d) Inversión en investigación de las universidades:

México invierte más en I+D (12 MDD) que otros países de Latinoamérica, como Argentina (5 MDD) y Chile (2 MDD), sin embargo, no es suficiente la inversión. El porcentaje de inversión privada y la cantidad destinada con respecto al PIB (0.48 %) es de las más bajas

del mundo (Conacyt, 2017). En Estados Unidos y Alemania, donde existen más casos de éxito de *spin-off* académicas, se invierten 503 y 113 millones de dólares, respectivamente (Figura 6). Es decir, entre mayor inversión reciban los investigadores, se podrían generar más ingresos para el país a través de la creación de *spin-off* universitarias.

CONCLUSIONES

En México, uno de los factores determinantes y limitantes para la implementación de *spin-off* académicas, como parte de la valorización económica de los resultados de I+D+i en las universidades, son el marco administrativo y legal, por lo que no quedan claros los benefi-

cios de los investigadores al crear una *spin-off* en la universidad, como por ejemplo, el porcentaje de participación correspondiente a cada investigador por la venta de patentes o licenciamientos de desarrollos tecnológicos o científicos, entre otros. Así mismo, como es un tema reciente en México, en las universidades hay poca cultura emprendedora, sobre todo en la academia y entre los investigadores, sin embargo, hay reportes de éxito de *spin-off* que se han creado desde las universidades. Otro factor que obstaculiza la creación de *spin-off*, es el reducido número de investigadores y poca inversión en I+D+i en las universidades. En los gobiernos de otros países, como España, Chile y Colombia, se hicieron políticas específicas para la creación de *spin-off*, y se han visto resultados favorables, a pesar de que la inversión en investigación no es tan grande como la que se realiza en países desarrollados. En Estados Unidos y Reino Unido, la inversión en investigación es mayor que en México, y la creación de *spin-off* es un éxito en las universidades más reconocidas de estos países como en el MIT, Stanford, Cambridge, entre otras. Esto permite conocer los factores que fueron determinantes para su éxito, como la visión multidisciplinaria entre

un grupo y/o varias instituciones hacia un fin común de comercializar los resultados de investigación (valorización económica de la investigación), a través de una empresa con personal altamente calificado para el desarrollo tecnológico, con el apoyo de las IES de origen y los distintos órganos de gobierno. Así mismo, conocer las limitaciones y retos que han enfrentado las *spin-off* académicas, en países de Latinoamérica, especialmente para México, permite generar nuevas propuestas para que la creación e implementación de *spin-off* sea más fluida. Con base en la revisión de la literatura, se propone para México, implementar el modelo REPITA de *spin-off* académicas, debido a que toma en cuenta las condiciones de una economía en desarrollo, las habilidades investigativas, la alta tecnología y la transferencia tecnológica. Así mismo, sería importante empezar a aplicarlo en universidades públicas, específicamente en las universidades autónomas, ya que los casos reportados de *spin-off* académicas en México han sido desarrollados en estas universidades. Sería interesante también conocer las condiciones de las universidades autónomas de México, y encontrar los factores que han favorecido la creación de *spin-off*.

REFERENCIAS

- Audretsch, D. B. (2014). From the entrepreneurial university to the university for the entrepreneurial society. *The Journal of Technology Transfer*. 39(3): 313-321.
- Bernasconi, M. and Jolly, D. (2007). The size and the characteristics of the hightech spin-off phenomenon in Sophia Antipolis. In F. Therin (Ed.), *Handbook of Research on Techno-Entrepreneurship* (pp. 12-16). EDHEC Business School, France: Edward Elgar Publishing.
- Botero, R., Gómez, S., Giraldo, J. C., Castro, C. A., and Charry, W. P. (2014). Implementación de *spin off* en el área de informática en Colombia. *Ingenierías USB-med*. 5(2): 12-17.
- Bruton, G., Ketchen, D., and Ireland, D. (2013). Entrepreneurship as a solution to poverty. *Journal of Business Venturing*. 28(6): 683-689.
- CAM, University of Cambridge (2018). Reports and Financial Statements 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.cam.ac.uk/system/files/uoc_annual_report_2018.pdf. Fecha de consulta: 25 de junio de 2019.
- Cáceres-Carrasco, F. R. y Aceytuno, M. T. (2015). Academic spin-offs incubation strategies: the case of the Andalusian region. *Cuadernos de Gestión*. 15(2): 113-142.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2017). Ley General de Responsabilidades Administrativas, en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. Disponible en: <https://declaranet.gob.mx/docs/LGRA.pdf>. Fecha de consulta: 10 de junio de 2019.
- Cantu-Ortiz, F. J., Galeano, N., Mora-Castro, P., and Fangmeyer, J. Jr. (2017). Spreading academic entrepreneurship: Made in Mexico. *Business Horizons*. 60(4): 541-550.
- Castillo-Vergara, M. y Alvarez-Marin, A. (2015).

La transferencia de investigación en Instituciones de Educación Superior mediante *spin-off*. *Actualidades Investigativas en Educación*. 15(3): 1-23.

Coletti, M. (2015). Dati Sulla Lombardia, Highlits, News: "Milan is a cluster of Innovation". *Invest in Lombardy*. [En línea]. Disponible en: <http://www.investinlombardyblog.com/2016/10/milan-is-a-cluster-of-innovation/>. Fecha de consulta: 15 de enero de 2018.

Conacyt, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (2017). Informe general del estado de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. [En línea]. Disponible en: <http://www.siicyt.gob.mx/index.php/transparencia/informes-conacyt/informe-general-del-estado-de-la-ciencia-tecnologia-e-innovacion/informe-general-2017/4813-informe-general-2017/file>. Fecha de consulta: 20 de noviembre de 2018.

CCC, Consejo Consultivo de Ciencias (2019). *Spin-offs* de México. *Consejo Consultivo de Ciencias*. [En línea]. Disponible en: <http://www.cccciencias.mx/es/spin-offs.html>. Fecha de consulta: 15 de marzo de 2019.

Czarnitzki, D. and Rammer, C. (2014). University spin-offs and the "performance premium". *Small Business Economy*. 13(2): 309-326.

De-Cleyn, S. H., Braet, J., and Klofsten, M. (2015). How human capital interacts with the early development of academic spin-offs. *International Entrepreneurship and Management Journal*. 11(3): 599-621.

Elpida, S., Galanakis, K., Bakouros, I., and Platias, S. (2010). The Spin-off Chain. *Journal of Technology Management & Innovation*. 5(3): 51-68.

ETH (2015). ETH Zurich, Swiss Federal Institute of Technology in Zurich. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/ETH_Zurich. Fecha de consulta: 12 de enero de 2018.

ETH (2019). ETH spin-off machine running at full speed. [En línea]. Disponible en: <https://www.ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2019/01/eth-spin-off-machine-running-at-full-speed.html>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2019.

Fernández-Alles, M., Camelo-Ordaz, C., and Franco-Leal, N. (2015). Key resources and actors for the evolution of academic spin-offs. *Journal of Technology Transfer*. 40(6): 976-1002.

Galindo, E., Serrano-Carreón, L., Gutiérrez, C. R., Balderaz-Ruiz, K. A., Muñoz-Celaya, A. L., Mezo-Villalobos, M. y Arroyo-Colín, J. (2015). Desarrollo Histórico y los Retos Tecnológicos y Legales para Comercializar Funifree AB, el primer Biofungicida 100 % mexicano. *TIP Revista Especializada en*

Ciencias Químico-Biológicas. 18(1): 52-60.

Grasmic, K. (2016). Academic spin-offs as triple hélix element: Case-Study of Russian Regions. *Journal of Technology Management & Innovation*. 11(3): 127-136.

Gresser, E. (2014). U.S. share of world intellectual property revenue – 39 percent. *Progressive Economy*. [En línea]. Disponible en: http://progressive-economy.org/trade_facts/u-s-share-of-world-intellectual-property-revenue-39-percent/. Fecha de consulta: 1 de enero de 2018.

Gusberti, T. and Dewes, M. (2017). Impact evaluation for University-Business Cooperation and Technology Transfer in higher education systems: cluster analysis. *Production*. 27.

Helm, R. and Mauroner, O. (2007). Success of research-based spin-offs. State-of-the-art and guidelines for further research. *Review of Managerial Science*. 1(3): 237-270.

HELMHOLTZ (2019). Spin-off companies. [En línea]. Disponible en: https://www.helmholtz.de/en/transfer/technology_transfer/projects_and_initiatives/spin_off_companies/spin_offs/. Fecha de consulta: 4 de marzo de 2019.

Hernández-Mondragón, A. C., Herrera-Estrella, L., and Kuri-Haruch, W. (2016). Legislative environment and other factors that inhibit transfer of Mexican publicity funded research into commercial ventures. *Technology in Society*. 46: 100-108.

Iacobucci, D. and Micozzi, A. (2014). How to evaluate the impact of academic spin-offs on local development: an empirical analysis of the Italian case. *The Journal of Technology Transfer*. 40(3): 434-452.

IPN, Instituto Politécnico Nacional (2018). Presupuesto 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.ipn.mx/assets/files/secgeneral/docs/cgc/CGC%202017/2-SO-XXXVI-PRES.pdf>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2019.

Jiménez, C. N., Maculan, A., Otálora, I., Moreira Cunha, R. y Castellanos, O. (2013). *Reflexiones sobre los mecanismos de transferencia de conocimiento desde la universidad: el caso de las Spin-off*. [En línea]. Disponible en: http://www.altec2013.org/programma_e_pdf/1119.pdf. Fecha de consulta: 20 de septiembre de 2017.

Lebret, H. (2010). Stanford University and High-Tech Entrepreneurship: an empirical study. *SSRN Electronic Journal*. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228315334_

Stanford University and High-Tech Entrepreneurship An Empirical Study. Fecha de consulta: 20 de junio de 2019.

Lejpras, A. (2014). How innovative are spin-offs at later stages of development? Comparing innovativeness of established research spin-offs and otherwise created firms. *Small Business Economics*. 43(2): 327-351.

Leten, B., Landoni, P., and Van-Looy, B. (2014). Science or graduates: How do firms benefit from the proximity of universities? *Research Policy*. 43(8): 1398-1412.

López-Obando, P. (2017). Surgimiento de empresas catalogadas como *spin-off* universitarias en Colombia, análisis desde la gerencia de proyectos (fase 1). *Revista Escuela de Administración de Negocios*. 82: 61-72.

Meoli, M. and Vismara, S. (2016). University support and the creation of technology and nontechnology academic spin-offs. *Small Business Economics*. 47(2): 345-362.

Merrit, H. (2012). Las empresas mexicanas de base tecnológica y sus capacidades de innovación: una propuesta metodológica. *Trayectorias*. 34: 27-50.

MILENIO (2018). "UAT tendrá 2 mil 500 mdp de presupuesto para 2018", en *Periódico Milenio*. [En línea]. Disponible en: http://www.milenio.com/region/presupuesto_uat_2018-milenio_noticias_0_1102090006.html. Fecha de consulta: 20 de enero de 2018.

Miranda, F. J., Chamorro-Mera, A., and Rubio, S. (2017). Academic entrepreneurship in Spanish universities: An analysis of determinants of entrepreneurial intention. *European Research on Management and Business Economics*. 23(2): 113-122.

MIT, Instituto Tecnológico de Massachussets (2016). MIT Facts, Financial Data. [En línea]. Disponible en: <http://web.mit.edu/facts/financial.html>. Fecha de consulta: 10 de enero de 2018.

Monge, M., Briones, A. y García, D. (2010). La creación de *spin-off* universitaria: caso del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). *Cuadernos de Administración*. 27(43): 23-38.

Morales-Rubiano, M., Sanabria-Rangel, P. y Caballero-Martínez, D. (2015). Características de la Vinculación Universidad-Entorno en la Universidad Nacional de Colombia. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*. 23(1): 189-208.

Naranjo, G. (2011). *Spin-off* académica en Colombia: estrategias para su desarrollo. *Multiciencias*. 11(1): 35-45.

Narváez-Vásquez, G., Maridueña, A., Milton, R.,

Chávez-Ferreiro, J. y González-Garcilazo, M. A. (2016). Las *spin-off* universitarias: revisión de la literatura sobre la ambigüedad del constructo. *Revista Global de Negocios*. 4(7): 95-108.

OCDE, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (2001). Introduction: The New Spin on Spin-offs. [En línea]. Disponible en: <http://www.oecd.org/sti/inno/introductionthenewspinonspin-offs.htm>. Fecha de consulta: 26 de septiembre de 2016.

Otrín, P., Salas, V., Trujillo, M. y Vendrell, F. (2007). El *spin-off* universitario en España como modelo de creación de empresas intensivas en tecnología. Estudio DGPYME. [En línea]. Disponible en: <http://www.ipyme.org/Publicaciones/Informe%20spinoff.pdf>. Fecha de consulta: 27 de octubre de 2014.

Pazos, D. R., Bua, M. M. V., López, S. F. y Gulías, M. J. R. (2016). Análisis de la supervivencia de las *spin-offs* universitarias creadas en España: Factores diferenciales respecto a empresas similares. *Investigaciones de Economía de la Educación*. 1(11): 435-4549.

Roberts, E. B. y Eesley C. E. (2011). Entrepreneurial Impact: The Role of MIT – An Updated Report. *Foundations and Trends in Entrepreneurship*. 7(1-2): 1-149.

Rodeiro-Pazos, D., Fernández-López, S., Otero-González, L. y Rodríguez-Sandiás, A. (2010). Factores determinantes de la estructura de capital de las *spin-offs* universitarias. *Academia. Revista Latinoamericana de Administración*. 44: 65-98.

Santamaria-Velasco, C. y Brunet-Icart, I. (2014). Creación de empresas y *spin-off* universitarias en México. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*. 5(9): 16-41.

Spinouts (2019). UK University Listings Spinouts, From Research to Market. [En línea]. Disponible en: <http://www.spinoutsuk.co.uk/listings/university-listings/default.aspx>. Fecha de consulta: 26 de junio de 2019.

Stanford University (2018). Stanford Facts 2018-2019. [En línea]. Disponible en: <http://facts.stanford.edu/administration/finances>. Fecha de consulta: 25 de marzo de 2019.

Stephan, A. (2014). Are public research spin-offs more innovative? *Small Business Economy*. 43(2): 353-368.

Torres, I. (2017). Diseña UANL programa de emprendimiento e innovación. Foro Consultivo. [En

[línea]. Disponible en: <http://www.foroconsultivo.org.mx/FCCyT/boletines-de-prensa/diseña-uanl-programa-de-emprendimiento-e-innovación>. Fecha de consulta: 22 de junio de 2019.

Torres, A. y Jasso J. (2019). Capabilities and knowledge transfer: evidence from a university research center in the health area in Mexico. *Contaduría y Administración, Especial Innovación*. 64(1): 1-16.

UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2010). Informe de la UNESCO Sobre la Ciencia 2010. [En línea]. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001898/189883S.pdf>. Fecha de consulta: 10 de junio de 2017.

UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2015). Global overview of the numbers of researchers. [En línea]. Disponible en: tellmaps.com/uis/rd/#!/tellmap/187250920. Fecha de consulta: 2 de enero de 2017.

UANL, Universidad Autónoma de Nuevo León (2017). Presupuesto de Ingresos y Egresos del 2017. [En línea]. Disponible en: http://www.transparencia.uanl.mx/informacion_presupuestal/presupuesto_2017/archivos/presupuesto_2017.pdf. Fecha de consulta: 9 de enero de 2018.

UCHILE, Universidad de Chile (2011). Diez *spin off* desde la Universidad de Chile. [En línea]. Disponible en: <http://www.uchile.cl/noticias/69255/diez-spin-off-desde-la-universidad-de-chile>. Fecha de consulta: 26 de junio de 2019.

UCHILE, Universidad de Chile (2017). Aprueba balance de ejecución presupuestaria año 2017 de la Universidad de Chile. [En línea]. Disponible en: <http://web.uchile.cl/transparencia/archivos/iep2017.pdf>. Fecha de consulta: 26 de junio de 2019.

UNAM, Universidad Nacional Autónoma de México (2016). Aprueba UNAM su presupuesto para 2017. *Boletín UNAM-DGCS-860, Antigua Escuela de Medicina*. [En línea]. Disponible en: http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2016_860.html. Fecha de consulta: 7 de enero de 2018.

UGR, Universidad de Granada (2018). Presupuesto 2018 definitivo. [En línea]. Disponible en: https://gerencia.ugr.es/pages/vger_eco/presupuestos/presupuesto2018definitivo. Fecha de consulta: 25 de junio de 2019.

UGR, Universidad de Granada (2019). *Spin-off* de la UGR. *Oficina de Transferencia y Resultados de Investigación*. [En línea]. Disponible en: <https://spinoff.ugr.es/showcase/>. Fecha de consulta: 26 de junio de 2019.

UPM, Politécnica de Madrid (2016a). Presupuestos 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.upm.es/sfs/Rectorado/Vicerrectorado%20de%20Asuntos%20Economicos/Area%20de%20Gestion%20Economicas%20y%20Financiera/Presupuestos/presupuesto2016/Presupuesto%202016.pdf>. Fecha de consulta: 11 de enero de 2018.

UPM, Universidad Politécnica de Madrid (2016b). La UPM, líder en transferencia de conocimientos entre las universidades españolas. [En línea]. Disponible en: <http://www.upm.es/UPM?fmt=detail&prefmt=articulo&id=9a0bff265b425510VgnVCM10000009c7648a>. Fecha de consulta: 27 de junio de 2019.

USACH, Universidad de Santiago de Chile (2018). Aprueba presupuesto de ingresos y gastos de año 2018 de la Universidad Santiago de Chile. [En línea]. Disponible en: https://www.transparenciaactiva.usach.cl/sites/default/files/paginas/aprueba_presupuesto_2018.pdf. Fecha de consulta: 26 de junio de 2019.

USACH, Universidad de Santiago de Chile (2019). Emprendimiento incubado en Innovo distinguido por Banco Santander. [En línea]. Disponible en: <https://www.usach.cl/news/emprendimiento-incubado-innovado-distinguido-banco-santander-1>. Fecha de consulta: 26 de junio de 2019.

USEV, Universidad de Sevilla (2017). Presupuesto 2017. [En línea]. Disponible en: <http://servicio.us.es/gesteco/presupuesto-cuenta/presupuesto-2017/presupuesto2017.pdf>. Fecha de Consulta: 10 de enero de 2018.

WEBOMETRICS (2019). Ranking web de Universidades. [En línea]. Disponible en: <http://webometrics.info/es/WORLD>. Fecha de consulta: 25 de junio de 2019.

Zarrabeitia, E., Ruiz-de-Arbulo, P., and Diaz-de-Basurto, P. (2016). The need for a change in the paradigm of entrepreneurship at Universities: differences between innovative spin-offs and technology-based spin-offs. *Independent Journal of Management & Production*. 7(2): 465-487.

Zucker, L., Darby, M., and Brewer, M. (1998). Intellectual human capital and the birth of U.S. biotechnology enterprises. *American Economic Review*. 290-306.

Zúñiga-Zapata, A. C. (2013). Las *spin-off* en el contexto universitario colombiano: consideraciones generales. *Journal of Engineering and Technology*. 2(2): 82-95.



Imagen de [freepic.diller](#) en [freepik](#)

Los jóvenes universitarios y su apreciación sobre algunos elementos que miden la calidad en la educación superior

Undergraduate students and their views about some elements which measure the quality in higher education

Claudia Alejandra Hernández-Herrera*

RESUMEN

La educación de calidad permite a los jóvenes adquirir habilidades y desarrollar conocimientos que facilitan su inserción en el mercado laboral, y de esta forma mejorar su calidad de vida y bienestar social. El objetivo de este artículo fue analizar las percepciones de los jóvenes de dos instituciones de educación superior en México, con respecto a variables que miden la calidad en los rubros de los planes de estudio, los profesores, las actividades extracurriculares y la tutoría, para determinar sus posibles diferencias, y de esta forma, realizar un comparativo que permita ubicar las zonas de posible mejora. El estudio fue de tipo transversal y descriptivo. Los datos se recabaron a través de un cuestionario aplicado a una muestra de 3 431 estudiantes. Se realizaron inferencias estadísticas a través del análisis factorial, prueba U de Mann-Whitney y los modelos lineales generalizados. Se encontró que en el caso del Instituto Politécnico Nacional (IPN), los alumnos de la licenciatura en administración industrial tuvieron una buena percepción con respecto al plan de estudios, caso contrario pasó con la ingeniería en informática y ciencias de la informática que obtuvieron menor puntuación. También se halló que los jóvenes de este instituto que no laboraban, valoraron más el trabajo de los profesores, mientras que los estudiantes del Instituto Tecnológico Nacional de México (TecNM), que señalaron estar en el campo laboral, calificaron de mejor manera a sus maestros. Se concluye que ambas instituciones trabajan en condiciones disímiles, sin embargo, las dos requieren esforzarse para cambiar la percepción de los estudiantes en las diversas esferas que evalúan la calidad de la educación.

PALABRAS CLAVE: educación superior, calidad, estudiantes, evaluación curricular.

ABSTRACT

Providing quality education allows young people to acquire skills and develop knowledge that can facilitate their insertion into the labor market, which in turn can help them improve the quality of their life and social welfare. The aim of the paper was to analyze the perceptions of students from two institutions of higher education in Mexico regarding variables that measure quality, including the academic curriculum, faculty, extracurricular activities and tutoring, in order to determine similarities and differences and to identify areas in need of improvement. A cross-sectional and descriptive study was conducted. Data were collected through a questionnaire administered to a sample of 3 431 students. Statistical inferences were made through a factor analysis, a Mann-Whitney U test and the generalized linear models. It was found that in the case of the Instituto Politécnico Nacional (IPN), undergraduate students of industrial management had a positive perception of the curriculum, unlike those majoring in technology related areas who rated it low. It was also found that the IPN students who do not have a job value the work of the faculty members more than those who do. In contrast, the TecNM students who indicated that they are in the labor market gave their faculty higher ratings. The article concludes by highlighting that both institutions work under different conditions. However, it also stresses the need for the two of them to engage in further efforts to change the perception that students have about the various areas that evaluate the quality of education.

KEYWORDS: higher education, quality, students, curriculum evaluation.

*Correspondencia: al9505@gmail.com / Fecha de recepción: 28 de marzo de 2018 / Fecha de aceptación: 8 de julio de 2019 / Fecha de publicación: 29 de julio de 2019

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, av. Té, núm. 950 esquina Resina, col. Granjas México, Del. Iztacalco, Ciudad de México, México, C. P. 08400.

INTRODUCCIÓN

Las universidades que ostentan ser de calidad, son las que atraen a los mejores estudiantes y profesores, y, por lo tanto, generan los mecanismos necesarios para retenerlos (Guironnet y Peypoch, 2017). Las universidades de calidad son aquellas que tienen programas de estudio, se dedican a la investigación, desarrollan publicaciones con altos estándares y trabajan el tema de la internacionalización a través de la movilidad. El resultado de lo anterior se refleja en los egresados, cuando ocupan altas posiciones jerárquicas, y las escuelas son capaces de autogenerar recursos financieros, además del despliegue de los apoyos que la universidad destina para la formación y la capacitación de los profesores (Şen y col., 2012; Naidu y Derani, 2016; Artés y col., 2017 y Kirk y col., 2018).

Es difícil ofrecer una definición de calidad, por su complejidad y la diversidad de variables que interactúan en el concepto (Bernhard, 2012). La calidad de la educación conlleva a que las instituciones comprueben su capacidad de gestión, a través del trabajo sistemático, que garantice la calidad en los procesos que se desarrollan en beneficio de los jóvenes universitarios. Una de las formas de evidenciar la calidad es por medio de la acreditación (Holm y col., 2014; Hou, 2015). Las acreditaciones de los organismos internacionales permiten efectuar valoraciones de indicadores, y de esa forma, encontrar las áreas de mejora continua y de mantener la vigilancia de los parámetros que garantizan la calidad de la educación (Power, 2013; Busco y col., 2017; Rezaei, y col., 2017). Sin embargo, Martínez-Iñiguez y col. (2017), señalan que los procesos de acreditación de las escuelas de educación superior se enfrentan a múltiples problemáticas, ya que los procesos aumentan la burocracia; también reconocen que no todos los integrantes de las comunidades universitarias participan de forma activa en las evaluaciones, y señalan la emergencia de cambiar esta visión de los procesos de acreditación en las escuelas.

En los procesos de evaluación de la acreditación se califican una diversidad de variables,

como el personal docente, la investigación, los recursos materiales, la gestión académica y administrativa de la universidad, la situación de los egresados, procesos de admisión, capacidad de investigación, productos de investigación, movilidad internacional, satisfacción de los estudiantes, padres de familia y empleadores (Dill y Soo, 2005; Schwarz y Westerheijden, 2007; Quinn y col., 2009; Baartman y col., 2013; Vîiu y Miroiu, 2015).

En los modelos educativos basados en competencias, se privilegian los resultados del aprendizaje sobre las acciones orientadas al mismo, lo anterior se evalúa presentando evidencias del aprendizaje alcanzado. Estos medios de verificación permiten analizar el progreso en los conocimientos y habilidades, aunado a que permite desarrollar la mejora continua (Rubin y Brown, 2019). En modelos educativos avanzados, la evaluación de los aprendizajes está centrada en los estudiantes, por los que se ocupan modelos que apoyan a la inclusión y el diálogo entre los alumnos, y ayuda a los jóvenes a comprender su aprendizaje e identificar sus progresos generados a partir de la enseñanza (Lähdemäki, 2019).

Cabe destacar que, en la actualidad, en los modelos educativos basados en competencias, el profesor es visto como el facilitador del conocimiento, en él recae la responsabilidad de la enseñanza, por lo que se dice que los buenos maestros son aquellos que cuentan con habilidades técnicas, demuestran entusiasmo, cuentan con conocimiento sobre la asignatura, saben evaluar competencias de los estudiantes, se comprometen en la evaluación; es profesional, es ético, y mejora sus formas de enseñar. Además, un profesor que trabaja en un programa considerado de alta calidad es aquel que cuenta con grados académicos, usa herramientas innovadoras para la enseñanza y realiza investigación (Wiśniewska y Grudowski 2015; El-Miedany, 2019).

Los universitarios son los clientes directos de las instituciones, y los resultados de su aprendizaje tienen relación con variables como la

gestión y el liderazgo que se ejerce en las escuelas (Asif y col., 2013; Wu y col., 2014). La calidad de la educación empodera a los estudiantes de conocimientos y habilidades para el futuro, además, enseña valores y actitudes positivas hacia el aprendizaje (Ng, 2015). Siguiendo el orden de las ideas, una manera de medir la calidad es: la percepción que tienen los estudiantes sobre los servicios que ofrece la escuela, además del proceso de enseñanza-aprendizaje, de la manera de transferir conocimiento, de los planes y programas de estudio y de la planta docente (Hu y Xu, 2012; Alvarado-Lagunas y col., 2015). Naidu y Derani (2016) y Ferrante (2017) indicaron que la calidad se puede analizar en función de la satisfacción de los estudiantes. Al respecto, Masserini y col. (2018), hallaron que los estudiantes le dan importancia a la enseñanza y la organización de los cursos como determinantes de su satisfacción. Por otro lado, autores como Taraman (2017) y Masserini y col. (2018), encontraron en sus estudios, que los alumnos son los actores principales en la educación, por lo que los profesores y la administración deben ser tolerantes y escuchar las opiniones que ellos tienen con respecto a las variables que están relacionadas con la calidad; sugieren que para lograr una mayor participación, los jóvenes deben sentir la confianza de que sus puntos de vista no serán usados en su contra.

El objetivo del trabajo fue analizar las percepciones de los jóvenes en dos instituciones de educación superior, con respecto a variables que miden la calidad de los planes de estudio, los profesores, las actividades extra-curriculares y la tutoría, para determinar sus posibles diferencias, y de esta forma realizar un comparativo que permita ubicar las zonas de posible mejora.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue de tipo transversal y descriptivo. Los participantes fueron alumnos que estaban inscritos en dos instituciones de educación superior públicas, el Instituto Politécnico Nacional (IPN), y el Tecnológico Nacional

de México (TeCNM, 2019). Se tomó la decisión de estudiar a estas instituciones, ya que ambas cuentan con modelos educativos basados en competencias, son pilares de la educación pública en la Ciudad de México, y se especializan en educación en ingenierías y ciencias sociales. Además, se detectó por medio de la observación y de algunas preguntas que se han realizado al personal cercano a los procesos de acreditación de las carreras que, en las dos instituciones se realizan encuestas de satisfacción de servicios a los jóvenes. La aplicación de los cuestionarios se llevó a cabo en el mes agosto de 2017. Los datos fueron recabados haciendo uso de un cuestionario aplicado a 3 431 estudiantes inscritos, 2 627 participantes del IPN y 804 estudiantes del TeCNM; el número de estudiantes por carrera, semestre y tipo de acreditación se encuentra en la Tabla 1. El repliegue de instrumentos se realizó con el apoyo de cuatro jóvenes que fueron capacitados. Se llevó a cabo el pilotaje del instrumento con 60 estudiantes del IPN, para identificar el comportamiento de los datos y las simulaciones en cada una de las pruebas estadísticas que se emplearían. Se obtuvo un alfa de Cronbach de 0.907. Además, se buscó la opinión de un experto en la gestión de instituciones educativas para la revisión en la redacción de los enunciados que integraban el cuestionario.

El instrumento se integró por 22 preguntas con escala tipo Likert, en donde 1 significaba totalmente en desacuerdo y 5 totalmente de acuerdo. Se obtuvo una alfa de Cronbach de 0.917, que ofrece validez y consistencia interna de los ítems. Las variables contextuales fueron, la carrera, el semestre, la instituciones de educación media superior en donde cursaron el bachillerato, la escolaridad de los padres, la actividad laboral de los padres, si contaban con un tutor, si tenían beca, número de asignaturas reprobadas y si contaban con empleo al momento del estudio. La muestra se calculó considerando que se tenía una población conocida en la escuela del IPN de $N = 14\ 000$, con una probabi-

■ Tabla 1. Nivel de certificación de las carreras en que estaban inscritos los universitarios evaluados del IPN y TecNM.

Table 1. Level of certification of the academic programs in which the participating students of the IPN and TecNM were registered.

IPN	Estudiantes	Semestres							Acreditador
		2	3	4	5	6	7	8	
Licenciatura en administración industrial	876	130	98	60	142	133	169	144	CACECA*
Ingeniería en informática	278	44	39	59	57	33	33	13	CACEI**
Ciencias de la informática	342	28	36	47	68	51	58	54	CONAIC***
Ingeniería Industrial	742	114	118	72	178	101	118	41	CACEI
Ingeniería en transporte	362	74	40	28	35	51	72	62	CACEI
Ingeniería en sistemas automotrices	27	5	2	1	11	1	4	3	CACEI
TecNM	Estudiantes	Semestres							En proceso de Acreditación
		2	3	4	5	6	7	8	
Ingeniería industrial	172	27	9	8	28	36	45	19	CACEI
Ingeniería en gestión empresarial	166	13	8	15	24	46	50	10	CACEI
Ingeniería ambiental	20	0	1	6	4	4	4	1	CACEI
Ingeniería en logística	25	2	0	0	12	5	4	2	CACEI
Ingeniería en Tecnologías de la Información y Comunicación	421	48	45	64	74	60	87	43	CACEI

*Consejo de Acreditación en Ciencias Administrativas, Contables y Afines. **Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería. ***Consejo Nacional de Acreditación en Informática y Computación.

lidad de respuesta de $P < 0.50$, un nivel de confianza del 0.95 y de error de 0.05, siendo el resultado $n = 374$. En el caso del TeCNM, se tenía una población conocida de $N = 2\ 500$ estudiantes, un nivel de confianza del 0.95 y de error de 0.05, siendo el resultado $n = 334$, con una probabilidad de respuesta de $P < 0.50$. Los datos de las poblaciones de las escuelas fueron proporcionados por sus departamentos de control escolar. En ambas instituciones se obtuvo un mayor número de cuestionarios que (3 431) los esperados por la muestra. Los datos se trabajaron haciendo uso

del *software* SPSS, versión 20. Se llevó a cabo un análisis factorial, que arrojó en la prueba de Kaiser Meyer Olkin de $0.959 > 0.50$, que indica que los elementos tienen la capacidad de agruparse, y esto se confirma con la prueba de esfericidad de Bartlett con un $P = 0.000 < 0.05$. Se obtuvieron cuatro factores, de los cuales, el primero, que agrupa las variables del plan de estudio, representó el 37.63 % de la varianza total.

Se empleó el análisis factorial, ya que permite interpretar una gran cantidad de variables y

reducirlas en dimensiones. Se aplicó el método de los componentes principales, donde la rotación fue Varimax, lo que permitió obtener el análisis de los componentes rotados. También, se utilizaron las pruebas de U de Mann-Whitney. Se debe señalar que el análisis se trabajó por medio de P-value, que interpreta la probabilidad de rechazo o aceptación de una hipótesis, que indica diferencia o no de los grupos que integran las variables; las comparaciones se realizan con el nivel de significancia ($P < 0.05$).

RESULTADOS

La Tabla 2 muestra la agrupación de ítems de acuerdo con su coeficiente de correlación, que representan las cargas factoriales que se obtuvieron, recordando que la correlación no implica la causalidad de las variables.

Modelo lineal generalizado del plan de estudio

De acuerdo con la prueba estadística no paramétrica de U de Mann-Whitney, se obtuvieron diferencias entre las dos instituciones. En el IPN se registraron menores puntuaciones con relación a la percepción del plan de estudio, que en el TeCNM (Tabla 3). La prueba de contraste Omnibus mostró que en los modelos lineales, se detectaron diferencias en todas las variables entre el IPN y el TeCNM (Tabla 3).

En la Tabla 4 se muestran las variables que presentaron diferencia significativa ($P < 0.05$) dentro de cada uno de los factores estudiados en ambas instituciones. En el caso del IPN, se observaron diferencias en la carrera, el semestre, en la educación media superior, becas, actividad laboral del estudiante y el

■ **Tabla 2. Análisis de factores, matriz de componentes rotados.**

Table 2. Factor analysis, matrix of rotated components.

Factor	Ítems	Correlación	IPN*	TeCNM*
Plan de estudio	Los contenidos de las asignaturas se encuentran actualizados y están acordes con las demandas del mercado laboral.	0.730	3.19	3.46
	El plan de estudio de la carrera está actualizado.	0.677	2.95	3.44
	El programa educativo me permitirá una adecuada inserción laboral.	0.641	3.33	3.65
	La enseñanza en la escuela es capaz de combinar la teoría con la práctica.	0.639	3.35	3.60
	La formación académica permitirá resolver problemas reales que se presenten en el campo laboral.	0.628	3.29	3.66
	La escuela cuenta con el equipo necesario para los requerimientos de las asignaturas.	0.623	3.02	3.32
	Los contenidos de las unidades de aprendizaje hasta este momento han cumplido las expectativas de conocimiento.	0.599	3.25	3.59
	Los profesores son capaces de interrelacionar su asignatura con las demás para conseguir proyectos integradores.	0.588	3.24	3.51
	El plan de estudio apoya en el incremento de la capacidad emprendedora.	0.565	3.43	3.78
	Las asignaturas cursadas se ajustan adecuadamente al perfil profesional.	0.554	3.54	3.85

Continúa...

Profesores	Los profesores que imparten clases cuentan con las habilidades y conocimientos necesarios.	0.705	3.18	3.50
	Los profesores demuestran una planeación de sus clases.	0.699	3.14	3.51
	Los profesores escuchan las opiniones de los estudiantes para mejorar el aprendizaje.	0.672	3.04	3.38
	Los profesores son facilitadores del conocimiento.	0.670	3.27	3.65
	Los profesores hablan del modelo educativo.	0.501	3.25	3.51
Actividades extracurriculares	Se reconoce la importancia de realizar el servicio social.	0.728	3.47	3.72
	Movilidad nacional e internacional	0.662	3.46	3.57
	Actividades que ofrecen créditos de actividades extracurriculares.	0.655	3.79	4.08
Tutoría	Los tutores promueven las convocatorias de becas.	0.779	2.87	3.19
	Durante mi estancia en la escuela he recibido asesoría de parte de un tutor.	0.624	2.80	3.20
	El programa institucional de tutorías apoya en incrementar el rendimiento académico de los jóvenes.	0.612	3.10	3.55

*Media.

■ Tabla 3. Prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney y Prueba de contraste de Omnibus de los factores evaluados.

Table 3. Non-parametric Mann-Whitney U test and Omnibus contrast test of the evaluated factors.

Factores	U de Mann-Whitney		Omnibus	
	IPN	TeCNM	IPN	TeCNM
	Rangos promedio	Rangos promedio	Rangos promedio	Rangos promedio
Plan de estudio	1 621.25 ^a	2 025.59 ^b	2 61.015 ^a	202.325 ^b
Profesores	1 619.11 ^a	2 032.57 ^b	2 11.683 ^a	289.564 ^b
Actividades extracurriculares	1 660.74 ^a	1 896.55 ^b	1 83.955 ^a	269.452 ^b
Tutoría	1 622.73 ^a	2 020.75 ^b	1 69.556 ^a	240.177 ^b

^{a,b}Letras distintas indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

■ Tabla 4. Pruebas de efectos de los cuatro factores evaluados en las dos instituciones.
Table 4. Effects test of the four factors evaluated in the two institutions.

Variables	IPN				TeCNM			
	Factores				Factores			
	Plan de estudio	Profesores	Actividades extracurriculares	Tutoría	Plan de estudio	Profesores	Actividades extracurriculares	Tutoría
Carrera	**	*	-	-	**	**	**	**
Semestre	**	*	**	**	-	**	*	-
Medio superior	*	**	*	-	**	**	**	**
Escolaridad madre	-	-	-	-	**	**	**	**
Actividad madre	-	-	-	-	*	**	-	**
Escolaridad padre	-	*	-	-	-	-	**	**
Actividad padre	-	-	-	-	**	**	**	-
Tutoría	-	-	-	**	**	**	**	**
Becas	**	**	**	**	**	**	**	**
Materias reprobadas	-	**	-	**	-	**	**	**
Actividad laboral	**	**	*	*	**	**	**	**
Promedio agrupado	**	**	**	-	-	-	-	-

No hay efecto *P < 0.05, **P ≤ 0.01.

promedio agrupado ($P < 0.05$) (Tabla 4). Los estudiantes de la licenciatura en administración industrial calificaron de mejor forma su percepción con respecto al plan de estudio (34.17), caso contrario pasó con la ingeniería en informática (30.98) (Tabla 5). Por otro lado, los estudiantes del segundo semestre evaluaron de mejor forma este factor (37.77), que los alumnos de semestres más adelantados, ya que conforme avanzaban en la carrera, disminuía su percepción de satisfacción con respecto al plan de estudio, siendo los alumnos del séptimo semestre, quienes le otorgaron menor puntuación al factor (35.38). Además, se detectó que los jóvenes que estudiaron en el Colegio de bachilleres fueron los que mejor percibieron el plan de

estudio (38.00), mientras que los estudiantes que cursaron la preparatoria en el Colegio Nacional de Educación Profesional Técnica (Conalep), calificaron con menos puntos el factor (35.71).

También, se encontró que los jóvenes que no tenían becas (34.43) y aquellos que no trabajaban (34.58) percibían mejor el plan de estudio ($P < 0.05$). Los estudiantes con promedio agrupado de 7.0 (38.00) calificaron mejor el plan de estudio que aquellos con promedio superior (Tabla 5).

En el caso del TeCNM, se observaron diferencias significativas ($P < 0.05$) en el comportamiento de las carreras, la educación media su-

■ Tabla 5. Rangos promedios de los factores obtenidos y las categorías de las variables.
Table 5. Average ranges of the related factors and the categories of the variables.

	IPN				TeCNM				
	Factores				Factores				
	Plan de estudio	Profesores	Actividades extracurriculares	Tutoría	Variables	Plan de estudio	Profesores	Actividades extracurriculares	Tutoría
Carrera					Carrera				
Ingeniería industrial	33.70	15.13	10.33	7.49	Ingeniería industrial	33.93	17.69	10.27	10.20
Ingeniería en transporte	33.14	15.27	10.50	7.49	Ingeniería en gestión	34.05	18.07	9.91	9.28
Ingeniería en informática	30.98	14.25	10.70	7.31	empresarial	-	-	-	-
Ingeniería en sistemas automotrices	31.18	14.56	9.39	6.70	Ingeniería en medio ambiente	37.24	20.33	11.56	11.20
Licenciatura en Administración industrial	34.17	15.15	10.70	7.42	Ingeniería en logística	38.83	22.07	11.44	11.78
Ciencias de la informática	32.40	14.78	10.38	7.72	Ingeniería en TIC	33.53	17.92	10.33	9.36
Semestre					Semestre				
Segundo	37.77	16.93	10.41	8.24	Segundo	36.79	20.45	10.66	10.47
Tercero	36.51	15.89	10.12	8.15	Tercero	33.85	17.80	9.97	10.32
Cuarto	36.12	16.29	10.10	7.83	Cuarto	35.23	17.48	10.76	10.34
Quinto	35.69	16.40	9.89	7.90	Quinto	36.05	17.22	10.68	11.05
Sexto	35.86	16.37	9.70	7.68	Sexto	35.31	18.30	11.19	10.83
Séptimo	35.38	15.94	9.98	7.46	Séptimo	36.38	17.47	10.57	10.51
Octavo	35.87	16.10	10.03	7.67	Octavo	34.20	16.83	10.81	10.40
Medio superior					Medio superior				
Cecyt	36.55	16.23	10.32	-	Cecyt	37.19	19.83	11.23	10.84
Preparatoria UNAM	36.90	17.77	10.39	-	Preparatoria UNAM	37.61	21.70	11.65	12.06
CCH UNAM	37.14	14.80	9.35	-	CCH UNAM	35.40	18.46	11.61	10.77
Conalep	35.71	15.82	9.65	-	Conalep	36.18	19.55	10.73	11.12
Colegio de bachilleres	38.00	16.78	10.36	-	Colegio de bachilleres	34.88	18.49	10.94	9.92
Preparatoria oficial	37.44	16.20	10.37	-	Preparatoria oficial	34.86	19.00	10.34	10.38
Preparatoria particular	36.89	16.53	10.20	-	Preparatoria particular	34.93	17.13	11.23	10.39

Continúa...

Escolaridad de la madre					Escolaridad madre				
No tiene estudios	36.57	15.72	9.96	8.80	No tiene estudios	35.65	18.56	10.99	10.65
Primaria	36.60	16.37	10.39	8.55	Primaria	40.34	20.87	11.75	11.25
Secundaria	37.55	16.55	10.61	8.86	Secundaria	37.24	18.89	11.25	10.37
Preparatoria	37.86	16.53	10.69	8.82	Preparatoria	36.05	18.46	11.01	9.97
Licenciatura	37.29	16.43	10.80	8.83	Licenciatura	37.42	19.24	10.93	9.16
Posgrado	36.45	16.02	11.18	8.66	Posgrado	26.96	17.96	8.77	9.08
Actividad de la madre					Actividad de la madre				
Trabaja en una empresa	38.05	16.60	10.72	8.59	Trabaja en una empresa	38.46	20.79	11.15	11.93
Trabaja en el gobierno	37.50	16.83	10.61	8.61	Trabaja en el gobierno	35.53	18.21	10.67	10.12
Desempleada	38.24	17.08	10.72	8.68	Desempleada	35.55	19.41	11.34	10.71
Se dedica al hogar	37.87	17.04	10.65	8.74	Se dedica al hogar	36.53	19.76	10.99	10.30
Negocio propio	35.65	17.50	11.40	7.84	Negocio propio	36.19	18.60	10.61	9.58
Escolaridad del padre					Escolaridad del padre				
No tiene estudios	37.48	17.04	9.69	8.70	No tiene estudios	36.81	18.22	11.62	10.84
Primaria	37.32	16.66	9.92	8.62	Primaria	34.20	18.67	10.40	9.70
Secundaria	37.61	16.34	10.24	8.72	Secundaria	34.11	17.66	11.29	11.07
Preparatoria	38.26	17.13	10.26	8.88	Preparatoria	35.83	18.73	12.29	10.72
Licenciatura	38.25	16.88	10.04	8.79	Licenciatura	35.73	18.97	12.23	11.60
Posgrado	39.56	17.54	10.48	8.60	Posgrado	33.20	18.36	8.85	11.58
Actividad del padre					Actividad del padre				
Trabaja en una empresa	37.65	18.51	9.45	8.58	Trabaja en una empresa	39.41	21.23	11.40	11.11
Trabaja en el gobierno	36.73	18.23	9.18	8.56	Trabaja en el gobierno	38.60	20.76	10.79	10.69
Desempleado	38.10	18.62	9.44	8.63	Desempleado	39.13	21.28	11.22	11.16
Negocio propio	35.97	12.84	9.07	7.88	Negocio propio	29.29	14.24	7.98	10.93
Tutoría					Tutoría				
Si	38.03	17.80	9.67	8.87	Si	38.11	20.29	10.51	9.06
No	37.19	17.43	9.58	8.16	No	34.67	18.03	10.10	7.78
Becas					Becas				
Si	33.26	18.33	10.01	9.00	Si	32.50	17.29	9.30	7.22
No	34.43	19.10	10.31	9.18	No	34.84	18.60	9.78	8.27
Materias reprobadas					Materias reprobadas				
Ninguna	38.85	19.93	9.91	9.45	Ninguna	34.32	18.68	9.68	8.26
Una	38.66	19.44	9.82	9.19	Una	33.38	18.63	9.43	8.33

Continúa...

Dos	38.48	19.05	9.71	8.80	Dos	33.02	16.66	8.77	7.39
Tres	39.47	19.89	9.82	9.41	Tres	32.47	17.57	8.42	7.49
Cuatro	38.56	19.11	9.82	9.41	Cuatro	35.15	18.21	8.41	7.23
Cinco	34.10	19.28	8.41	8.25	Cinco	-	-	-	-
Más de cinco	27.36	10.58	8.53	8.15	Más de cinco	-	-	-	-
Actividad laboral					Actividad laboral				
Si	34.03	17.02	9.11	8.77	Si	37.71	19.99	10.90	9.01
No	34.58	17.25	9.25	8.71	No	34.91	18.23	10.36	8.27
Promedio agrupado					Promedio agrupado				
6.0	36.30	18.07	8.90	8.98	6.0	-	-	-	-
6.5	34.34	17.85	8.08	8.34	6.5	-	-	-	-
7.0	38.00	19.33	9.49	9.27	7.0	-	-	-	-
7.5	37.15	18.58	9.34	9.10	7.5	-	-	-	-
8.0	36.85	18.46	9.57	9.03	8.0	33.32	17.80	9.57	7.70
8.5	36.30	18.15	9.77	8.91	8.5	34.18	17.67	9.53	7.57
9.0	35.44	17.77	9.67	8.71	9.0	33.51	18.37	9.53	7.95
9.5	37.03	18.26	10.04	9.02	9.5	-	-	-	-

perior, escolaridad de la madre, actividad laboral de la madre, actividad laboral del padre, tutoría, becas y la actividad laboral del estudiante (Tabla 4).

Los estudiantes de la carrera de ingeniería en logística fueron los que percibieron mejor al plan de estudio (38.83), mientras que los alumnos de la carrera de ingeniería en Tecnologías de la información y la comunicación (TIC) le asignaron la menor puntuación (33.53) (Tabla 5). Por otra parte, los jóvenes que estudiaron el bachillerato en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) le otorgaron más puntos al plan de estudio (37.61) que los que cursaron en alguna preparatoria oficial (34.86). Los jóvenes, quienes su madre había concluido únicamente la primaria, valoraron mejor el plan de estudio (40.34), que los estudiantes, quienes su madre contaba con un posgrado (26.96). En el caso de los estudiantes, en el que su madre trabajaba en una empresa, percibieron mejor el plan de estudio (38.46), sin embargo, los alumnos, quienes sus madres laboraban en el gobierno (35.53) o estaban desempleadas en el mo-

mento del estudio (35.55), fueron los que le dieron menos puntos a este factor. De igual forma, los estudiantes, cuyos padres trabajan en una empresa, le asignaron mayor valor al plan de estudio (39.41), que aquellos que sus padres tenían negocio propio (29.29). Por otra parte, los alumnos con tutor valoraron más el programa (38.11). Un dato interesante es que los alumnos sin becas calificaron de mejor forma su plan de estudio (34.84). Por último, el estudiantado que trabajaba fueron los que consideraron más positivamente su programa de estudios (37.71).

Modelo lineal generalizado de los profesores

De acuerdo con los estadísticos de la prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney, se encontraron diferencias significativas entre las dos instituciones. Los alumnos del IPN registraron menores puntuaciones promedio hacia los profesores, que los estudiantes del TeCNM (Tabla 3).

La prueba de contraste de Omnibus arrojó variaciones en las variables del modelo que analiza el factor dos, respecto a los profes-

res del IPN, esto es: la carrera, el semestre, la educación media superior, escolaridad del padre, becas, materias reprobadas, actividad laboral del estudiante y el promedio hasta ahora obtenido ($P < 0.05$) (Tabla 4). Los jóvenes de la carrera de ingeniería en transporte fueron los que otorgaron mejor satisfacción hacia el trabajo de los profesores (15.27), caso contrario sucedió con los estudiantes de la ingeniería en informática (14.25), quienes calificaron más bajo el factor (Tabla 5). Por otro lado, los alumnos del segundo semestre valoraron mejor la actividad de los profesores (16.93), mientras que los estudiantes del tercer semestre evaluaron con el menor puntaje a los académicos (15.89). Los jóvenes que cursaron su bachillerato en una preparatoria de la UNAM, le dieron mayor valor al trabajo de los docentes (17.77), sin embargo, los alumnos que provenían de un Colegio de Ciencias y Humanidades (CCH) de la UNAM no percibieron de buena manera el trabajo de los académicos (14.80), siendo los que otorgaron menor puntaje. Otro dato interesante que surgió del modelo, fue que los alumnos, cuyos padres contaban con alta escolaridad, como el posgrado, evaluaron mejor la actividad del profesor (17.54), mientras que los alumnos de padres con bajo nivel de escolaridad valoraron con menor puntaje el trabajo académico (16.34 secundaria y 16.66 primaria). Los estudiantes que no contaban con una beca, tuvieron mejor opinión de los catedráticos (19.10). Por otro lado, los jóvenes que no presentaban asignaturas reprobadas, calificaron de mejor manera el trabajo del profesor (19.93), que aquellos que presentaban más de cinco materias no acreditadas (10.58). Los alumnos que no trabajaban le dieron mejor puntuación a la actividad de los académicos (17.25). Por último, los alumnos con promedio agrupado de 7.0 consideraron mejor la función del profesor (19.33) en comparación con estudiantes con promedios más altos.

En el modelo del TeCNM, de acuerdo a la prueba de contraste de Omnibus, se obtuvieron diferencias significativas ($P < 0.05$) en las va-

riables de la carrera, el semestre, educación media superior, escolaridad de la madre, actividad de la madre, actividad del padre, tutoría, becas, materias reprobadas y la actividad laboral del estudiante (Tabla 4).

Los jóvenes de la carrera de ingeniería en logística percibieron mejor el trabajo docente (22.07), a diferencia de los estudiantes de las carreras de ingeniería industrial (17.69) y de ingeniería en TIC (17.92) (Tabla 5). Los estudiantes del segundo semestre calificaron de mejor manera la labor de los académicos (20.45), la cual disminuyó conforme avanzaron en sus carreras universitarias. Los alumnos que egresaron de la preparatoria de la UNAM percibieron mejor el trabajo de los docentes (21.70), mientras que los estudiantes que provenían del sistema de bachillerato particular calificaron más bajo el factor (17.13). Por otro lado, los alumnos, cuyas madres contaban con la educación primaria, le otorgaron mayor puntaje los profesores (20.87), que los alumnos cuyas madres contaban con un posgrado (17.96). Los estudiantes, quienes sus madres trabajaban en una empresa, valoraron más el rol de los profesores (20.79), que los alumnos, cuyas madres trabajan para el gobierno federal (18.21). En el caso de los padres de familia, se obtuvo que los alumnos que señalaron que sus padres se encontraban desempleados (21.28) y los que trabajaban para una empresa (21.23), fueron los que valoraron más el factor que analiza la labor de los docentes, mientras que los estudiantes, cuyos padres tenían negocio propio le dieron menor puntaje al factor (14.24).

Los estudiantes que tenían un tutor apreciaron mejor la función de los docentes (20.29). Además, los jóvenes que señalaron no tener becas percibieron mejor el trabajo de los catedráticos (18.60). Los alumnos que no tenían asignaturas reprobadas, calificaron con puntaje más alto la labor del profesor (18.68). Por último, los estudiantes que indicaron esta trabajando percibían de mejor forma el trabajo de los profesores (19.99) (Tabla 5).

Modelo lineal generalizado de las actividades extracurriculares

De acuerdo con los resultados de la prueba de U Mann-Whitney, se halló que el IPN fue la institución con menores rangos promedio, con relación a la percepción de las actividades extracurriculares (Tabla 3). La prueba de contraste de Omnibus indicó variaciones en el modelo del IPN en las variables del semestre, educación media superior, becas, actividad laboral del estudiante y el promedio agrupado ($P < 0.05$) (Tabla 4).

Los jóvenes del IPN que cursaban el segundo semestre percibieron de mejor forma las actividades extracurriculares (10.41), sin embargo, conforme avanzaban los semestres disminuía la puntuación, la cual empezó a mejorar en los últimos dos semestres (séptimo: 9.98 y octavo: 10.03) (Tabla 5). Los alumnos que estudiaron el bachillerato en la preparatoria de la UNAM reconocieron y le dieron mayor puntaje a las actividades extracurriculares (10.39), mientras que los alumnos que provenían de un CCH de la UNAM no percibieron de buena manera estas actividades, siendo los que otorgaron menor puntaje (9.35). Además, los estudiantes sin becas valoraron más las actividades consideradas como extracurriculares (10.31). También, los jóvenes que dijeron no estar trabajando en el momento del estudio percibieron mejor estas actividades (9.25). Por último, se halló que los jóvenes con calificaciones altas que promediaban 9.5 valoraban más las actividades extracurriculares (10.04), a diferencia de los jóvenes con promedio de 6.5, quienes calificaron con menor puntaje el factor (8.08).

El modelo lineal generalizado del TeCNM obtuvo diferencias en las categorías de las variables de la carrera, el semestre, la educación media superior, escolaridad de la madre, escolaridad del padre, actividad del padre, tutoría, becas, materias reprobadas y actividad laboral del estudiante ($P < 0.05$) (Tabla 4).

La carrera que más valoró las actividades extracurriculares fue la de ingeniería en medio

ambiente (11.56), y la que menos lo hizo, fue la de ingeniería en gestión empresarial (9.91); los jóvenes del sexto semestre otorgaron mayor puntuación a las actividades (11.19); caso contrario sucedió con los jóvenes del tercer semestre (9.97) (Tabla 5). Por otra parte, los alumnos que cursaron su bachillerato en la UNAM reconocieron la importancia de las actividades extracurriculares (11.65); mientras que los alumnos que realizaron su preparatoria en el sistema oficial le dieron la menor puntuación al factor (10.34). Por otro lado, se encontró que los estudiantes, cuyas madres tenían el nivel de primaria fueron los que valoraron más las actividades extracurriculares (11.75), y los que calificaron con menos, fueron los jóvenes, cuyas madres tenían estudios de posgrado (8.77). De la misma manera, los alumnos, cuyos padres tenían posgrado, le otorgaron menos puntos al factor (8.85), y los alumnos, cuyos padres contaban con preparatoria percibieron mejor las actividades extracurriculares (12.29). A su vez, se encontró que los jóvenes, quienes sus padres trabajaban en una empresa, fueron los que percibieron mejor las actividades extracurriculares (11.40), mientras que los jóvenes cuyos padres se dedicaban a trabajar en su negocio propio fueron los que asignaron menos puntos (7.98).

Los estudiantes que señalaron tener un tutor percibieron de mejor forma las actividades extracurriculares (10.51), mientras que, los jóvenes que no tenían alguna beca fueron los que mejor calificaron el factor (9.78). Y los alumnos que enfatizaron no tener materias reprobadas evaluaron de forma positiva los elementos del factor (9.68). Por último, los jóvenes que dijeron estar trabajando en el momento del estudio reconocieron la importancia de las actividades extracurriculares (10.90) (Tabla 5).

Modelo lineal generalizado de la tutoría

La prueba estadística de U de Mann-Whitney arrojó diferencias significativas con relación a la percepción de los programas de tutoría, toda vez que se halló que, el IPN obtuvo me-

nores puntuaciones promedio que el TeCNM (Tabla 3). En el modelo del IPN, la prueba de contraste de Omnibus arrojó diferencias entre las categorías de las variables de semestre, tutoría, becas, materias reprobadas y la actividad laboral ($P < 0.05$) (Tabla 4).

Los jóvenes que cursaban el segundo semestre le otorgaron mejor puntuación al proceso de la tutoría (8.24), sin embargo, mientras avanzaban en sus carreras universitarias, disminuía la percepción satisfactoria de la función de la misma, siendo los alumnos del séptimo semestre, quienes le asignaron menor puntuación al factor (7.46) (Tabla 5). Los estudiantes que señalaron tener un tutor, percibieron de mejor forma su trabajo (8.87). Por otro lado, los alumnos que no contaban con una beca calificaron de mejor manera el factor (9.18). También, se halló que el estudiante que no tenía asignaturas reprobadas valoraron más el ejercicio de la tutoría (9.45); y los que menos percibían ese trabajo fueron los alumnos con más de cinco materias reprobadas (8.15). Por último, los alumnos que trabajaban percibieron de mejor manera la tutoría (8.77).

Para el TeCNM, la prueba de contraste de Omnibus arrojó diferencias en los grupos formados por las variables de carrera, medio superior, escolaridad de la madre, actividad de la madre, escolaridad del padre, tutoría, becas, materias reprobadas y la actividad laboral del estudiante ($P < 0.05$) (Tabla 4).

Los alumnos de la carrera de ingeniería en logística calificaron mejor la tutoría (11.78), a diferencia de los jóvenes de la ingeniería en gestión empresarial, quienes percibieron menos la labor del tutor (9.28). Por otra parte, los estudiantes que concluyeron su preparatoria en el sistema de la UNAM otorgaron mayor puntuación a los elementos que miden el factor (12.06) (Tabla 5). Al respecto, los jóvenes que cursaron el Colegio de Bachilleres dieron la menor puntuación (9.92). Se encontró también que, los alumnos, cuyas madres tenían la primaria concluida, valoraron más la tutoría

(11.25), mientras que los jóvenes cuyas madres tenían posgrado le otorgaron una menor puntuación (9.08). Por otro lado, los jóvenes, quienes sus madres trabajaban en una empresa, le dieron más puntos positivos a la tutoría (11.93), que aquellos cuyas madres tenían su negocio propio (9.58) (Tabla 5).

En el caso de los padres de familia, el comportamiento fue diferente, se detectó que los estudiantes, cuyos padres tenían una licenciatura (11.60) y un posgrado (11.58) percibieron mejor la tutoría; lo contrario sucedió con los estudiantes cuyos padres presentaban solo el nivel de primaria (9.70). Los alumnos que tenían un tutor valoraron más la actividad (9.06); y los estudiantes que manifestaron no tener alguna beca apoyaron más los elementos que integran la tutoría (8.22). Por otra parte, los jóvenes que dijeron no tener asignaturas reprobadas (8.26) y los que tenían una asignatura reprobada (8.33) fueron los que dieron mayores puntos al factor. Por último, los estudiantes que dijeron estar trabajando en el momento del estudio calificaron de mejor forma el trabajo de la tutoría (9.01) (Tabla 5).

DISCUSIÓN

En este trabajo, se detectaron hallazgos importantes en las percepciones que tienen los jóvenes universitarios sobre la calidad en la educación. Las carreras del IPN estaban acreditadas al momento del estudio por el Consejo de Acreditación en Ciencias Administrativas, Contables y Afines (CACECA), el Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI) y el Consejo Nacional de Acreditación en Informática y Computación (CONAIC), mientras que las del TeCNM estaban trabajando en el proceso de acreditación por el CACEI (Tabla 1). Sin embargo, en los cuatro factores estudiados, plan de estudios, profesores, actividades extracurriculares y tutorías, con la prueba de U de Mann-Whitney, se obtuvieron menores rangos promedios en la percepción positiva de los alumnos del IPN que en los alumnos del TeCNM. Lo anterior pudiera deberse a que es posi-

ble que los procesos de acreditación, a pesar de estar cumpliendo con los indicadores, no consideran el sentir de los jóvenes del IPN, ya que ellos no están satisfechos en su totalidad, por lo que hay que analizar la situación, para detectar por qué los alumnos no están percibiendo positivamente los factores evaluados, si se cuenta con las seis carreras acreditadas.

En cuanto a la prueba de Omnibus, la puntuación fue similar a la prueba de U de Mann-Withney, a excepción del plan de estudio, en el cual, se obtuvieron menores rangos promedios en la percepción positiva de los alumnos del TeCNM que en los alumnos del IPN.

En la prueba de Omnibus, el modelo lineal generalizado detectó que, la puntuación otorgada por parte de los alumnos del IPN a los cuatro factores disminuyó conforme avanzaban los semestres, lo cual, pudiera estar relacionado con los contenidos de las asignaturas y/o con la actualización de los planes, de estudio y las actividades extracurriculares, así como, con las habilidades de los profesores, incluyendo las tutorías.

Un aspecto importante a considerar en la menor percepción de satisfacción encontrada entre los estudiantes del IPN, es que los jóvenes que ingresan a esta institución pasan por un proceso de admisión riguroso, ya que la institución de acuerdo con su informe estadístico del mes de Noviembre de 2018 señala que para el ciclo escolar 2018-2019 únicamente recibió a 18,823 estudiantes de nuevo ingreso en la educación superior escolarizada, pero en el concurso de ingreso se registraron aproximadamente unos 100, 000 aspirantes (Secretaría de Gestión Estratégica, Dirección de Evaluación del IPN, 2018). Esto sugiere que, quienes son admitidos son alumnos con un alto nivel de competencias, y que por lo tanto podrían ser muy críticos y reflexivos de la educación que reciben, por lo que si el contenido de las asignaturas que reciben no cumple con sus expectativas de

conocimiento, lo manifiestan señalando su poca satisfacción.

La prueba de Omnibus, mediante el modelo lineal generalizado permitió observar que los alumnos de las carreras de ingeniería en informática y ciencias de la informática del IPN, otorgaron bajas calificaciones al factor del plan de estudio, al igual que los alumnos de las carreras de ingeniería en TIC del TeCNM, por lo que es importante que las dos instituciones realicen un diagnóstico de los planes de las carreras de informática y de tecnologías, para analizar la situación que se está presentando, además de añadir variables como las trabajadas por Garbin-Praničević y col. (2019), que fueron la aplicación de las tecnologías en la enseñanza, el desarrollo de las competencias digitales, la infraestructura y el liderazgo tecnológico de la escuela; ya que en el factor que mide la percepción de los profesores, en el IPN, también, los alumnos de la carrera de ingeniería en informática fueron los que le dieron menos puntos, presentándose, además, un puntaje bajo en el mismo factor, en los alumnos de la carrera de ingeniería en TIC, del TeCNM.

Sifuna (2010) y Freixa-Niella y col. (2015), establecieron que la calidad depende de que los programas académicos se encuentren actualizados en temas innovadores, cuando los contenidos no responden a las exigencias de los sectores de pertinencia dejan de ser atractivos. Además, Khan y Usman (2015), enfatizaron que los planes de estudio requieren estar alineados con las demandas de los sectores de la sociedad que emplean a los egresados. Al respecto, autores como Leisyte y Westerheijden (2014), argumentaron que la calidad tiene relación en gran medida con saber la forma de integrar a los empleadores en el desarrollo curricular que permite la actualización de los planes de estudio. Por su parte, Kahloun y Ghannouchi (2017) sugieren realizar un estudio profundo de cada una de las líneas de generación y aplicación del conocimiento, para identificar las fronteras

del mismo y así desarrollar contenidos atractivos e innovadores. De acuerdo con Lammers y col. (2010), Stürmer y col. (2015) y Wiśniewska y Grudowski (2015), las escuelas tienen que trabajar en desarrollar programas de capacitación para los docentes, en donde se promueva el aprendizaje de nuevas metodologías de gestión de proyectos, estructura y uso de casos de estudio, *software* de simulación, liderazgo, generación de ambientes que desafían el aprendizaje, técnicas de motivación, tutoría y estilos de aprendizaje. Al respecto, Cheng (2016), mencionó que se deben considerar cursos para que los académicos refuercen sus habilidades para la planeación de sus clases. A su vez, es necesario establecer un sistema de recompensas docentes que no favorezca sólo a los profesores de tiempo completo, sino que tome en cuenta a los académicos contratados por tiempo parcial. El objetivo es que los profesores se sientan motivados y aporten resultados a los indicadores que miden la calidad (Gordon y Rajagopalan, 2016). Investigadores como Sifunsa (2010), señalaron que el incremento de la calidad implica un costo para el sistema educativo, de no invertir en los profesores se condena a tener un aletargamiento en el progreso. Todos estos factores podrían estar influyendo en la percepción de los estudiantes con respecto a la calidad de los programas, por ende, el menor nivel de satisfacción, especialmente en los alumnos de semestres más avanzados. Es por ello que, en ambas instituciones, es necesario cambiar la percepción de los jóvenes de los semestres avanzados, con relación a la calidad de los planes de estudio, a través de reforzar los contenidos de las asignaturas, considerando las exigencias de los mercados laborales, aunado a fortalecer la infraestructura para que sea similar a la que se emplea en los sectores laborales, trabajar con casos reales que coadyuven a incrementar la teoría y la práctica, y trabajar en las próximas revisiones y actualizaciones de los planes de las carreras mencionadas, sobre todo, realizando los estudios de pertinencia soportados por las sugerencias de los empleadores.

La disminución de la percepción positiva conforme avanzaban los semestres en el TeCNM, en el factor de los profesores, permite suponer que los estudiantes que progresan en sus programas de estudio son más críticos del trabajo de los mismos. Sin embargo, los alumnos con materias no reprobadas de las dos instituciones evaluadas, percibieron mejor la actividad académica de los profesores. Esto podría significar que el desempeño y dedicación académica permite que los jóvenes tengan otra percepción del trabajo docente. Por lo que es necesario hacer una investigación sobre lo que los jóvenes consideran que significa ser un buen profesor, lo anterior aportaría más elementos de análisis relacionados con el fenómeno. Además, se tienen que analizar las actividades extracurriculares y levantar opiniones de estas con los jóvenes, para mejorarlas y proponer aquellas que apoyan en su formación académica.

En cuanto a las actividades extracurriculares, existió una diferencia en su apreciación, asociada principalmente con la carrera y el semestre que cursaban los alumnos. En general, los estudiantes de semestres más avanzados tendieron a valorarlas mejor. Esto podría estar relacionado con una mayor conciencia de su importancia para su formación profesional, pero también con el hecho de que son un requisito obligatorio para el egreso. Es conveniente que los coordinadores de carreras establezcan si los estudiantes consideran adecuadas las actividades curriculares para el perfil profesional que buscan desarrollar, para facilitar su inserción en el ámbito laboral. En el caso del TeCNM, en las actividades extracurriculares, es necesario poner énfasis en la ingeniería de gestión empresarial, para identificar las opiniones positivas y negativas, y así conocer lo que se puede mejorar.

En lo referente al trabajo de los tutores, en ambas instituciones, debe realizarse una impresionante labor con los profesores que apoyan la función de la tutoría, ya que no cuentan con el número de académicos necesarios que atiendan a las de por sí sobrepo-

bladas comunidades estudiantiles. Es necesario precisar que el TeCNM, cuenta con 20 profesores de tiempo completo de un total de 86 académicos que atienden aproximadamente a 2 700 estudiantes, aunado a que es una planta académica relativamente joven y que requiere trabajar para profesionalizarse y encaminarse a la investigación y de esa forma alcanzar profesores que aspiren a obtener los perfiles deseables ya sea una entrevista personal (Tabla 6). En el caso de la escuela del IPN, se cuenta con un aproximado de 750 profesores, de los cuales, 330 son de tiempo completo, y sólo se tienen 14 profesores en el Sistema Nacional de Investigadores (SNI). El total de la población que se atiende es de 14 000 estudiantes. Los datos fueron proporcionados por los departamentos de Recursos Humanos de cada escuela. Al respecto, Freixa-Niella y col. (2015), enfatizaron que es necesario reconocer la labor del tutor, de tal forma que los profesores que trabajan por horas obtengan incentivos por estar en el programa institucional de tutorías. La tutoría es una de las actividades más relevantes para un estudiante que le permite visualizar y proyectar su trayectoria académica, pero la escasa participación de profesores que poseen una formación avanzada en la industria o en la academia, reduce las posibilidades de que los jóvenes accedan a otras oportunidades que se pueden encontrar en sus campos de acción como la investigación científica y las estancias empresariales nacionales e internacionales, por lo que se deben sumar esfuerzos para que todos los estudiantes puedan tener la información de forma oportuna, por

lo que es inminente enfocarlos en los programas de tutoría, sobre todo a aquellos jóvenes que provienen de sectores vulnerables.

En ambas instituciones, los jóvenes que contaban con un tutor evaluaron mejor los cuatro factores, por lo que la presencia de un tutor es percibida positivamente. Lo anterior refleja que la tutoría es un acompañamiento importante para un estudiante, que le ayuda a tener una mejor perspectiva de la institución, sus logros y futuro profesional que se enmarca en su trayectoria profesional. También es necesario trabajar de forma exhaustiva con los programas, y buscar apoyo en aquellos estudiantes de semestres avanzados que podrían funcionar como tutores entre pares, de esta forma, se sumarían manos para mitigar el problema de la sobrepoblación de las universidades.

El modelo lineal generalizado de la prueba de Omnibus reportó también que, los alumnos que no tenían beca en ninguna de las dos instituciones evaluadas calificaron mejor los cuatro factores, lo que sugiere que los jóvenes que han conseguido el apoyo económico podrían ser más perceptivos a determinados procesos académicos, por ser parte de lo que requieren aprobar para ser merecedores a las becas de manutención.

En el TeCNM, los hijos de madres que trabajaban en empresas al momento del estudio, fueron los que le otorgaron mayor puntuación a los tres factores con diferencia significativa (plan de estudios, el de los profesores y tutorías), situación similar se dio en

■ **Tabla 6. Comparativa de matrícula escolar y matrícula docente.**

Table 6. Comparison of institutions by enrollment and faculty.

	Matrícula	Profesores		Tasa alumno/profesor	
		Total	Tiempo completo	Total	Tiempo completo
TeCNM	2 700	86	20	31	135
IPN	14 000	750	330	18	103

la actividad del padre, siendo los hijos de padres que trabajaban para una empresa, quienes calificaron mejor los factores de plan de estudio, el de los profesores y actividades extracurriculares. Aunque el primer factor no tuvo diferencia significativa, lo anterior, podría significar que la actividad laboral de los padres permite que los jóvenes tengan un panorama general del trabajo en la empresa, y el valor que la educación tiene en el mercado laboral, y esto se refleja en una mejor percepción del trabajo de los docentes.

La acreditación externa de los programas académicos es la evaluación que permite identificar las mejoras a los procesos educativos, así como saber el impacto que estos tienen en la sociedad, ya que las universidades son herramientas de desarrollo y bienestar económico para las naciones, por lo que es fundamental el reconocimiento a su labor como actores principales en la formación de recursos humanos (Jiménez-Moreno, 2019). El trabajo de mejora continua, de parte de los programas académicos siempre debe estar presente.

En el caso del TeCNM, existen mayores retos, recordando que es una institución que tuvo sus inicios en la Ciudad de México en el 2008, así que los esfuerzos y los recursos siempre han estado orientados en apoyar y favorecer a los estudiantes y a la sociedad, sin embargo, el integrar grupos colegiados y demás indicadores, es una tarea compleja, pero se está trabajando en ello (TeCNM, 2019). En esta institución, los jóvenes que trabajaban al momento del estudio, concibieron de mejor forma los planes de estudio, por lo que sería interesante estudiar los aprendizajes que adquieren y saber si estos se encuentran relacionados con la carrera.

Por su parte, en el IPN, se debe analizar la situación de los jóvenes que trabajan, al ca-

lificar con menores puntuaciones los programas de estudio, por lo que es necesario que en futuras investigaciones se cuestione sobre el tipo de actividad que realizan y los sectores en donde se encuentran trabajando los alumnos, para poder saber con certeza si están desarrollando actividades relacionadas con las carreras que están estudiando, así como reflexionar sobre la flexibilidad y las trayectorias académicas de los estudiantes.

CONCLUSIONES

Las implicaciones para obtener la calidad educativa en las instituciones de educación superior, son diversas. Se requiere que las escuelas trabajen a profundidad en la actualización de los planes de estudio, con los profesores y los tutores. Se reconocen los retos a los que se enfrentan las instituciones de educación superior para sobresalir y formar profesionales en sus campos, sin embargo, la forma de enseñanza, la gestión y operación de las escuelas hace más complejo el fenómeno. Las instituciones que fueron analizadas trabajan en condiciones distintas, aunque ambas buscan la excelencia académica. Las limitaciones de la investigación están relacionadas con algunas variables que faltaron en el estudio como las capacidades de investigación de profesores y alumnos, el liderazgo en la gestión administrativa de las escuelas y la vinculación con los sectores de la sociedad. En futuras investigaciones, se propone trabajar con los egresados y los empleadores, para conocer sus opiniones sobre las variables que miden la calidad de la educación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Politécnico Nacional, a la Secretaría de Investigación y Posgrado. Este producto de investigación es derivado del proyecto SIP 2018072.

REFERENCIAS

- Alvarado-Lagunas, E., Luyando-Cuevas, J. R. y Pizarro-Palencia, E. (2015). Percepción de los estudiantes sobre la calidad de las universidades privadas en Monterrey. *Revista Iberoamericana de Educación Superior*.

perior. 6(17): 58-76.

Artés, J., Pedraja-Chaparro, F., and del-Mar-Salinas-Jiménez, M. (2017). Research performance and teaching quality in the Spanish higher education system: Evidence from a medium-sized university. *Research Policy*. 46(1): 19-29.

Asif, M., Raouf, A., and Searcy, C. (2013). Developing measures for performance excellence: is the Baldrige criteria sufficient for performance excellence in higher education? *Quality & Quantity*. 47(6): 3095-3111.

Baartman, L., Gulikers, J., and Dijkstra, A. (2013). Factors influencing assessment quality in higher vocational education. *Assessment & Evaluation in Higher Education*. 38(8): 978-997.

Bernhard, A. (2012). Quality Assurance in an International Higher Education Area: A summary of 9a case-study approach and comparative analysis. *Tertiary Education and Management*. 18(2): 153-169.

Busco, C., Dooner, C., and d'Alencon, A. (2017). Universidad de Chile: self-assessment and its effects on university's management. *Higher Education*. 75(3): 431-447.

Cheng, M. (2016). Reclaiming Quality. In M. Cheng Ed. *Quality in Higher Education: Developing a virtue of professional practice* (pp. 1-10). The Netherlands: Sense Publishers.

Dill, D. D. and Soo, M. (2005). Academic quality, league tables, and public policy: A cross-national analysis of university ranking systems. *Higher education*. 49(4): 495-533.

El-Miedany, Y. (2019). How to Be a Good Educator. In *Rheumatology Teaching, The Art and Science of Medical Education* (pp. 475-495). Springer, Cham.

Ferrante, F. (2017). Assessing quality in Higher Education: some caveats. *Social Indicators Research*. 131(2): 727-743.

Freixa-Niella, M., Vilà-Baños, R., and Rubio-Hurtado, M. J. (2015). Quality assessment for placement centres: a case study of the University of Barcelona's faculty of education. *Assessment & Evaluation in Higher Education*. 40(2): 199-217.

Garbin-Praničević, D., Spremić, M., and Jaković, B. (2019). Technology and Educational Leadership: The Role of Leaders vs. National Education Policies. In Á. Ingþórsson, N. Alfirević, J. Pavičić, and D. Vican (Eds.), *Educational Leadership in Policy* (pp. 97-116). Palgrave Macmillan, Cham.

Gordon, E. W. and Rajagopalan, K. (2016). New

Approaches to Assessment That Move in the Right Direction. In K. Rajagopalan and E. Gordon (Eds.) *The Testing and Learning Revolution* (pp. 107-146). New York: Palgrave Macmillan US.

Guironnet, J. P. and Peypoch, N. (2017). The geographical efficiency of education and research: The ranking of US universities. *Socio-Economic Planning Sciences*. 62: 44-55.

Holm, T., Sammalisto, K., and Vuorisalo, T. (2014). Education for sustainable development and quality assurance in universities in China and the Nordic countries: a comparative study. *Journal of Cleaner Production*. 107: 529-537.

Hou, A. Y. C. (2015). The Quality of Mass Higher Education in East Asia: Development and Challenges for Asian Quality Assurance Agencies in the Global Higher Education. In J. Shin, G. Postiglione, and F. Huang (Eds.), *Mass Higher Education Development in East Asia Strategy, Quality, and Challenges* (pp. 307-323). Switzerland: Springer International Publishing.

Hu, L. and Xu, P. (2012). Study on factors for teaching quality of higher education. In E. Mao, L. Xu, and W. Tian (Eds.), *Emerging Computation and Information technologies for Education* (pp. 205-212). Germany: Springer Berlin Heidelberg.

Jiménez-Moreno, J. (2019). La evaluación y acreditación de la educación profesional en México: ¿la legitimación y competitividad como fin de la universidad? *Revista de la Educación Superior*. 48(189): 55-72.

Kahloun, F. and Ghannouchi, S. A. (2017). Evaluation of the Criteria and Indicators that Determine Quality in Higher Education: A Questionnaire Proposal. In G. De-Pietro, L. Gallo, R. Howlett, and L. Jain (Eds.), *International Conference on Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services* (pp. 565-574). Switzerland: Springer, Cham.

Khan, M. A. and Usman, M. (2015). Education Quality and Learning Outcomes in Higher Education Institutions in Pakistan. In S. Tang and L. Logonathan (Eds.), *Taylor's 7th Teaching and Learning Conference 2014 Proceedings* (pp. 449-463). Singapore: Springer.

Kirk, S. H., Newstead, C., Gann, R., and Rounsaville, C. (2018). Empowerment and ownership in effective internationalisation of the higher education curriculum. *Higher Education*. 76(6): 989-1005.

Lähdemäki J. (2019). Case Study: The Finnish National Curriculum 2016—A Co-created National

Education Policy. In J. Cook Ed. *Sustainability, Human Well-Being, and the Future of Education* (pp. 397-422). Cham: Palgrave Macmillan.

Lammers, W. J., Savina, E., Skotko, D., and Churl-yaeva, M. (2010). Faculty and student perceptions of outstanding university teachers in the USA and Russia. *Educational Psychology*. 30(7): 803-815.

Leisyte, L. and Westerheijden, D. F. (2014). Stakeholders and quality assurance in higher education. In H. Eggins (Ed.), *Drivers and barriers to achieving quality in higher education* (pp. 83-97). The Netherlands: Sense Publishers, Rotterdam.

Martínez-Iñiguez, J. E., Tobón, S. y Romero Sandoval, A. (2017). Problemáticas relacionadas con la acreditación de la calidad de la educación superior en América Latina. *Innovación Educativa*. 17(73): 79-96.

Masserini, L., Bini, M., and Pratesi, M. (2018). Do Quality of Services and Institutional Image Impact Students' Satisfaction and Loyalty in Higher Education? *Social Indicators Research*. 1-25.

Naidu, P. and Derani, N. E. S. (2016). A comparative study on quality of education received by students of private universities versus public universities. *Procedia Economics and Finance*. 35: 659-666.

Ng, P. T. (2015). What is quality education? How can it be achieved? The perspectives of school middle leaders in Singapore. *Educational Assessment, Evaluation and Accountability*. 27(4): 307-322.

Power, C. (2013). A High-Quality Education for All. In P. Hughes (Ed.), *Achieving Quality Education for All* (pp. 63-68). Dordrecht Heidelberg New York London: Springer Netherlands.

Quinn, A., Lemay, G., Larsen, P., and Johnson, D. M. (2009). Service quality in higher education. *Total Quality Management*. 20(2): 139-152.

Rezaei, S., Karami-Matin, B., Hajizadeh, M., Soroush, A., Mohammadi, Z., Babakhany, M., and Jamshidi, K. (2017). Evaluating service quality in the higher education sector in Iran: an examination of students' perspective. *International Journal of Human Rights in Healthcare*. 10(2): 146-155.

Rubin A. and Brown A. (2019). Unlocking the Future of Learning by Redesigning Educator Learning. In J. Cook (Ed.), *Sustainability, Human Well-Being, and the Future of Education* (pp. 235-268). Cham: Palgrave Macmillan.

Schwarz, S. and Westerheijden, D. F. (2007). *Accreditation and evaluation in the European higher education area*. Dordrecht: Springer Science & Business

Media. 495 Pp.

Secretaría de Gestión Estratégica, Dirección de Evaluación del IPN (2018). Estadística Básica, inicio del período escolar 2018-2019/1, fin de período escolar 2017-2018/2. [En línea]. Disponible en: http://www.gestionestrategica.ipn.mx/Evaluacion/Documents/Estadistica/EBASICA_2019-1_V1.pdf. Fecha de consulta: 13 de febrero de 2018.

Şen, A., Kabak, K. E., Tüysüz, F., and Kuzaliç, D. (2012). Democratization of University Management for Quality Higher Education. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 58: 1491-1504.

Sifuna, D. N. (2010). Some reflections on the expansion and quality of higher education in public universities in Kenya. *Research in Post-Compulsory Education*. 15(4): 415-425.

Stürmer, K., Könings, K. D., and Seidel, T. (2015). Factors within university-based teacher education relating to preservice teachers' professional vision. *Vocations and Learning*. 8(1): 35-54.

Taraman, S. (2017). Students' Perceptions of the Quality of Higher Education. In N. Megahed (Eds.), *Education during the Time of the Revolution in Egypt. Comparative and International Education (A Diversity of Voices)* (pp. 155-170). Rotterdam: Sense Publishers.

TeCNM, Tecnológico Nacional de México (2019). Se crean tres institutos tecnológicos en el Distrito Federal, Ciudad de México. [En línea]. Disponible en: <https://www.tecnm.mx/dgest/se-crean-tres-institutos-tecnologicos-en-el-distrito-federal>. Fecha de consulta: 13 de febrero de 2018.

Vîiu, G. A. and Miroiu, A. (2015). The quest for quality in higher education: Is there any place left for equity and access? *Higher Education Reforms in Romania* (pp. 173-189). Cham Heidelberg: Springer International Publishing.

Wiśniewska, M., and Grudowski, P. (2015). High-quality academic teachers in business school. The case of The University of Gdańsk, Poland. *Total Quality Management & Business Excellence*. 1-13.

Wu, S. W., Lin, C. Y., Wu, S. F., Chuang, C. L., and Kuan, H. Y. (2014). Factors affecting quality of service in schools in Hualien, Taiwan. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 116: 1160-1164.



Imagen de [photosforyou](#) en [Pixabay](#)

Organogeles como mejoradores del perfil lipídico en matrices cárnicas y lácteas

Organogels as lipid profile improvers in meat and dairy matrices

Mayela García-Andrade*, José Alberto Gallegos-Infante, Rubén Francisco González-Laredo

RESUMEN

La estructuración de aceites comestibles, a través de la organogelación, tiene un potencial prometedor en aplicaciones alimenticias, al ser utilizadas como sustitutos de grasa saturada en algunos productos cárnicos y lácteos de alta demanda de consumo, con la finalidad de mejorar su perfil lipídico, el cual está relacionado con la mejora nutricional que demanda el consumidor actual, por el efecto negativo que tienen las grasas saturadas en la salud. El objetivo de este trabajo fue analizar diferentes formulaciones de organogeles, aplicados en matrices cárnicas-lácteas, y su impacto en las propiedades finales de tales productos alimentarios, implementados como sustituto de grasa saturada. Se encontró que la sustitución de grasa saturada, por este tipo de materiales, afecta principalmente las propiedades fisicoquímicas, modifica el sabor original de los alimentos y mejora su perfil lipídico; sin embargo, aún no permiten cumplir las expectativas del consumidor final, por las cualidades únicas que ofrece la grasa sólida, lo que representa la principal barrera a superar para su uso en una producción a escala industrial y venta al mercado. Es necesario desarrollar nuevas formulaciones, que asemejen dichas cualidades, para alcanzar la aceptación de los consumidores.

PALABRAS CLAVE: organogel, sustitución, grasa saturada, alimentos.

ABSTRACT

The structuring of edible oils, through organogelation, has a promising potential in food applications, when used as substitutes for saturated fat in some meat and dairy products of high consumption demand, in order to improve their lipid profile. Organogels are viable for this substitution, which is related to the nutritional improvement demanded by the current consumer, due to the negative effect of saturated fats on health. The objective of this review was to analyze different formulations of organogels, applied in meat-dairy matrices and their impact on the final properties of such food products, implemented as a substitute for saturated fat. The findings indicate that the replacement of saturated fat, by this type of materials, mainly affects the physicochemical properties, modifies the original flavor of the food and improves its lipid profile; However, they still do not meet the expectations of the final consumer due to the unique qualities of solid fat, which represents the main barrier to overcome for its application in an industrial scale production and sale to the market. It is necessary to develop new formulations, similar to those qualities, to achieve consumer acceptance.

KEYWORDS: organogel, substitution, saturated fat, food.

*Correspondencia: mayela.andrade@gmail.com / Fecha de recepción: 5 de abril de 2018 / Fecha de aceptación: 22 de febrero de 2019 / Fecha de publicación: 29 de julio de 2019

Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Durango, Unidad de Posgrado, Investigación y Desarrollo Tecnológico (UPIDET), Dpto. de Ingenierías Química y Bioquímica, blvd. Felipe Pescador núm. 1830 Ote., col. Nueva Vizcaya, Durango, Durango, México, C. P. 34080.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades funcionales de las grasas saturadas, las hacen virtualmente indispensables para la producción de alimentos, pero existen pruebas sólidas que apoyan el reemplazo parcial de alimentos ricos en ácidos grasos saturados (AGS), por aquellos ricos en ácidos grasos poliinsaturados (AGPI), para reducir el riesgo de enfermedad coronaria (Nettleton y col., 2017), ya que el consumo excesivo de grasas saturadas contribuye a efectos negativos para la salud, como el síndrome metabólico y la pre-diabetes tipo 2 (Bier, 2015). Esto hace que los consumidores cambien sus hábitos alimenticios, sacrificando sensación en la boca y un sabor agradable, por una dieta saludable, libre o reducida en grasa saturada. Lo anterior representa un problema o reto tecnológico, que impulsa cada vez más a la industria alimentaria a la búsqueda de grasas más saludables en los productos alimenticios, con el fin de mejorar sus características organolépticas, con el firme propósito de alcanzar la aceptación por parte de los consumidores.

El creciente estigma hacia las grasas saturadas, debido al aumento de las tasas de obesidad y los trastornos metabólicos asociados, ha llevado a un impulso sustancial para el desarrollo de alternativas a este tipo de grasas tradicionales. Los beneficios de salud positivos, atribuidos a las grasas no saturadas, como las encontradas en muchos aceites vegetales, han estimulado el interés en los sustitutos de grasa, a base de aceite. Una de las principales alternativas, motivo de investigación durante los últimos años, se centra en estructurar aceites líquidos e impartir características funcionales, de aspecto sólido, a través de organogeles. El estudio de organogeles, dirigidos a aplicaciones comestibles, farmacéuticas y cosméticas, se ha convertido en un campo muy activo en los últimos años y ha llevado a la identificación de una variedad de moléculas gelificadoras (Pernetti y col., 2007b; Bot y col., 2009; Co y Marangoni, 2012). Los organogeles pueden usarse eficazmente para reemplazar las grasas sólidas en cremas, galletas y productos cárnicos triturados. El per-

fil de ácidos grasos, de los aceites gelificados, se mantiene así, como la funcionalidad y textura de los productos finales (Stortz y col., 2012), siendo una estrategia para impartir las propiedades funcionales deseables propias de las grasas y eliminar las grasas *trans*, reduciendo en gran medida el contenido de grasas saturadas (Patel y Dewettinck, 2016; Wang y col., 2016).

El objetivo de este trabajo fue analizar las formulaciones de organogeles que han sido empleadas como sustituto de grasa saturada en dos matrices alimenticias: cárnicos y lácteos, y el impacto directo en algunas de sus propiedades fisicoquímicas.

Organogeles

Son definidos como sistemas semisólidos, con una fase continua hecha de un líquido hidrófobo (aceite vegetal), donde una red autoensamblada, formada por un agente estructurante, es responsable del atrapamiento físico del líquido (Garti y Marangoni, 2011; Sánchez y col., 2011); el autoensamblado se realiza a través de interacciones no covalentes, formando cristales de tipo fibrilar o plateletas (Rogers, 2009; Patel y Dewettinck, 2016). Las interacciones responsables de la gelificación incluyen enlaces de hidrógeno, apilamiento π - π , interacciones electrostáticas y de Van der Waals (Okesola y col., 2015); las fases sólidas de los lípidos se estructuran comúnmente mediante la formación de una red cristalina de triacilglicéridos (TAG) (Pernetti y col., 2007a; Patel y Dewettinck, 2016).

La naturaleza dinámica y reversible de las interacciones no covalentes, que contribuyen a la formación de dichas estructuras de red, les da a estos geles supramoleculares la capacidad inherente de responder a estímulos externos. Sin embargo, la naturaleza dinámica de los geles supramoleculares, que los dota de propiedades únicas, hace que su caracterización se diversifique al mismo tiempo. Con base en los mecanismos de gelificación y los factores de influencia de los geles supramoleculares, se deben emplear métodos

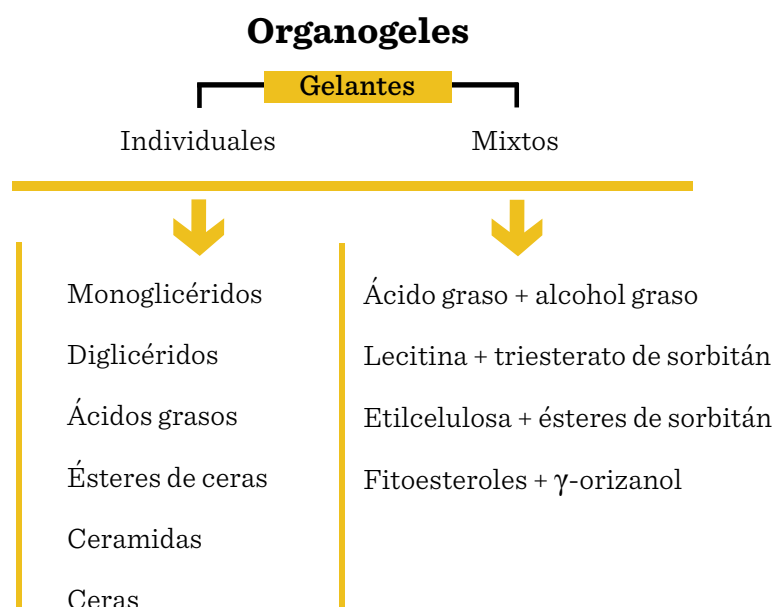
de caracterización adecuados y suficientes, para aprovechar al máximo sus ventajas (Yu y col., 2013), por lo que es necesario conocer las características de estos materiales por sí solos, y las que pueden arrojar en una matriz alimentaria, al modificarse las formulaciones tradicionales, y ver cómo esta aplicación estará afectando al producto terminado, sobre todo en las propiedades fisicoquímicas, sensoriales y perfil de ácidos grasos.

Diferentes alternativas de estructuración de aceites comestibles

Los sistemas de organogeles se pueden clasificar en sistemas de componentes únicos o mixtos, determinados por el número de gelificadores utilizados en la preparación de los geles (Bot y col., 2008; Sawalha y col., 2011). Ejemplos de componentes individuales, capaces de estructurar aceites comestibles, son monoglicéridos, diglicéridos, y ácidos grasos (Pernetti y col., 2007a; Wright y Marangoni, 2007), ésteres de cera, monoestearatos de sorbitán (MS), ceramidas, ceras, alcoholes grasos, ácidos dicarboxílicos y ácidos grasos deriva-

tizados (Murdan y col., 1999). Ejemplos de sistemas mixtos son ácidos grasos + alcoholes grasos (Gandolfo y col., 2004; Schaink y Van-Malssen, 2007), lecitina + triestearato de sorbitán (Pernetti y col., 2007b), fitoesteres + γ -orizanol (Bot y col., 2008) (Figura 1).

Existen diferentes formas de categorizar los enfoques de organogelación y estructuración de los organogeles: la primera categoría se basa en las características moleculares de los gelantes (compuestos orgánicos de bajo peso molecular) (Vintiloiu y Leroux, 2008; Patel y Dewettinck, 2015), tipo de gelantes químicos (lipídicos y no lipídicos) (Co y Marangoni, 2012), número de gelantes usados (mono componentes y sistemas mixtos) (Pernetti y col., 2007b; Patel y Dewettinck, 2015). La segunda categoría incluye (compuestos de alto peso molecular), a los polímeros, en específico la etilcelulosa (EC), el único organogelador de grado alimenticio directo, el cual puede formar una red de gel a través de la dispersión directa del estructurante en aceite o mediante un procedimiento de plantilla, para



■ **Figura 1. Clasificación de organogeles en sistemas de componentes individuales o mixtos, determinados por el número de geladores utilizados en su elaboración.**

Figure 1. Classification of organogels in systems of individual or mixed components determined by the number of gelators used in their preparation.

facilitar la absorción de aceite. La característica de los organogeles estructurados con este polímero semicristalino (EC), es que pasa por una transición termorreversible sol-gel en presencia de aceite líquido, cuyo comportamiento resulta en la capacidad de asociarse a través de enlaces físicos, donde el tipo de solvente y el tipo de surfactante afectan dichas interacciones (Davidovich-Pinhas y col., 2016). Más recientemente, se ha identificado que la hidroxipropil metilcelulosa también tiene la capacidad de impartir estructura en aceites comestibles (Patel y col., 2013), en combinación con otros hidrocoloides, que incluyen gelatina y goma xantana (Patel y Dewettinck, 2016).

Características de moléculas gelificadoras

Los agentes estructurantes deben gelificar aceites a temperaturas de enfriamiento y ambiente, permitiendo aplicaciones en alimentos procesados. El uso de bases lipídicas y diversos agentes estructurantes y sus combinaciones, para la composición de organogeles, debe considerar los siguientes criterios (Pernetti y col., 2007a; Rogers y col., 2014; Siraj y col., 2015):

- i) uso de bases lipídicas, con características excepcionales de funcionalidad y estabilidad entre aceites y grasas comercialmente disponibles;
- ii) uso de agentes estructurantes, a partir de materiales renovables, incluidos en la categoría de alimentos seguros para la aplicación de alimentos;
- iii) formulaciones de sistemas lipídicos, con características de composición química y propiedades de cristalización compatibles con la aplicación de alimentos basados en lípidos, tales como, fases continuas o emulsionadas.

Aplicaciones de organogeles

Los organogeles se pueden emplear en una gran variedad de aplicaciones, como en emulsiones, las cuales son adecuadas en margarina, yogur, quesos procesados en barra, mayonesa y salsas (Moschakis y col., 2016). Las variadas aplicaciones para los organogeles han llevado a un mayor interés en estos materiales, por la gran

diversidad de estructuras microscópicas y mesoscópicas posibles (Terech y Weiss, 1997).

Organogeles en diferentes matrices cárnicas y lácteas

Productos de cárnicos procesados

Los dos aspectos que se consideran, al usar sustitutos de grasa en productos cárnicos, son: reducción en el contenido total de grasa (calorías) y mejora en el perfil de ácidos grasos. El primero, se logra principalmente reemplazando una parte sustancial de grasa animal en el sistema de emulsión estructurada, que consiste en aceite líquido y agua gelificada, mientras que, en el segundo caso, el aceite líquido, gelificado utilizando agentes estructurantes, se usa como sustituto de grasa.

La organogelación, empleando aditivos lipídicos, como monoacilglicéridos y lecitina, se ha utilizado únicamente para la estabilización de suspensiones y salsas de carne, que son básicamente suspensiones a base de aceite, sin alterar significativamente el perfil de ácidos grasos o la reducción del contenido de grasa (Lupi y col., 2012; Lupi y col., 2014).

El uso de organogeles presenta oportunidades para que la industria de la carne mejore aún más la textura. En general, se pueden fabricar organogeles más duros, y esto debería permitir la adaptación de las propiedades de dureza, cuando se toman en cuenta otros factores (por ejemplo, el nivel de proteína, el tipo de relleno), en las emulsiones cárnicas (Barbut y col., 2016b). Las modificaciones que ejerce el organogel, sobre las propiedades fisicoquímicas, en la formulación tradicional de los productos cárnicos, se ven fuertemente influenciadas por las condiciones de elaboración de dichos materiales, los cuales resultan bondadosos, por todas las posibles combinaciones que se pueden llevar a cabo, preferentemente por la elección de solvente (aceite vegetal) y tipo de gelificador, en la dureza y fuerza del gel (Gravelle y col., 2014).

Se han realizado muchos intentos y numerosos estudios, para reemplazar la grasa animal

y mejorar el contenido de grasa de los productos cárnicos (Muguerza y Gimeno, 2004; Jiménez-Colmenero, 2007; Grasso y col., 2014). Los organogeles pueden ser una alternativa para impartir las propiedades funcionales deseables de las grasas, sin embargo, depende de la formulación para proporcionar estructura al producto; dicha estructura influye consecuentemente en la textura (dureza, capacidad de extensión, entre otras) y las propiedades organolépticas en los productos terminados (Patel y Dewettinck, 2015).

Salchichas

Una aplicación de organogeles, en productos cárnicos procesados, como salchichas, se centra en las características de la emulsión cárnica, la cual involucra una dispersión de lípido en agua, donde la fase dispersa es la grasa, y la fase continua está formada por el tejido muscular, agua, sales y condimentos. Adicionalmente, pueden contener proteína vegetal, almidones, gomas, colorantes y saborizantes (Ramos y col., 2004).

Las salchichas, tienen gran importancia, debido a que son un producto ampliamente consumido. Un indicativo de esto se observó en 2016, cuando las estadísticas reflejaron que los consumidores de EE. UU. gastaron 2 500 millones de dólares en salchichas para hot dogs, según el Consejo Nacional de Hot Dogs y Salchichas (NHDSC, por sus siglas en inglés: National Hot Dog and Sausage Council) (NHDSC, 2016). En México, el consumo de embutidos alcanzó los 8.6 kg/año por persona en 2017, siendo la salchicha la que ocupó el primer lugar, de acuerdo al Consejo Mexicano de la Carne (COMECARNE, 2018). Se puede entender que la sustitución de la fase lipídica, a una más saludable, es de gran importancia y pone de manifiesto que la modificación del perfil lipídico en este producto es por demás justificable.

Existen diferentes tipos de salchichas, como las Frankfurt, producidas a partir de una masa cárnica o emulsión de carne. Esta mezcla se puede describir mejor, como una combi-

nación de proteína muscular muy finamente triturada (Gordon y Barbut, 1992). Lo anterior convierte este sistema alimentario en una matriz compleja, donde la modificación, de alguna de las fases que la componen, involucra un reto técnico considerable, no solo a nivel laboratorio, sino también industrial.

Uno de los primeros intentos de reemplazo de grasa animal, en salchichas tipo Frankfurt, se realizó con organogeles elaborados con aceite de canola, y por primera vez, en un producto alimenticio de este tipo, la introducción de gelificadores poliméricos, como la EC (Zetzel y col., 2012), a diferentes concentraciones en la formulación del organogel. Dichas concentraciones revelaron que son potencialmente influyentes en las propiedades fisicoquímicas del producto, indicando que las características del polímero (peso molecular, concentración) son determinantes en las características finales de los productos terminados. A partir de este trabajo, las investigaciones se centraron en las modificaciones texturales de salchichas. El uso de un organogel, preparado con 8 %, 10 %, 12 % y 14 % de EC y 1.5 % ó 3.0 % de MS, dio como resultado un valor de dureza similar al control que tenía grasa de res (Barbut y col., 2016a), determinando que, al incrementar la concentración de EC, la dureza del embutido se veía también incrementada. Un efecto similar se encontró en la formulación de salchichas para desayuno, empleando EC 8 %, 10 %, 12 % ó 14 % y MS al 1.5 % ó 3.0 %. Los valores de dureza coincidieron con los del tratamiento de control de grasa de cerdo pero no siempre correspondía con la dureza sensorial (Barbut y col., 2016b). Algunas de las formulaciones con MS igualaron la dureza del control de grasa de cerdo; sin embargo, algunas variables, del análisis del perfil de textura y del sensorial, fueron menores, comparadas al control, a pesar de tener un potencial de reemplazo de grasa animal. Estas combinaciones resultaron aún insatisfactorias para el consumidor, debido a que las formulaciones empleadas no igualan a los productos control en todos los aspectos (Barbut y col., 2016c).

Al emplear el agente estructurante EC y gelantes, en la elaboración de organogeles, se debe considerar la cantidad de gelificador usado en la mezcla, debido a que al usar alta concentración de surfactante se puede interrumpir la formación de la emulsión de carne, y posiblemente, podría resultar en productos más blandos (Eerd, 1971; Flores y col., 2007), originando un conflicto en la aceptabilidad, convirtiéndose en el principal problema del reemplazo de grasa: la reacción del consumidor; ya que la grasa influye mucho en las características texturales y sensoriales de los alimentos (Youssef y Barbut, 2009). Los problemas tecnológicos asociados con la aplicación y sustitución directa de aceites vegetales, como oliva (Bloukas y col., 1997), canola (Youssef y Barbut, 2011) y aceite de girasol (Park y col., 1989), en la carne, enfatizaron la necesidad de una estructuración previa del aceite. La pre-emulsión de aceites con proteínas, como caseinato de sodio, aislado de proteína de suero y aislado de proteína de soja, se ha utilizado como un medio para mejorar las propiedades de tales productos (Bloukas y col., 1997; Youssef y Barbut, 2009).

La sustitución de grasa animal por organogeles, en salchichas frescas, se hace indispensable, debido a que este producto suele presentar un alto contenido de grasa (más del 20 %), con un contenido energético de 280 kcal/100 g a 300 kcal/100 g, y alto nivel de sal (3.6 %), de acuerdo a la Agencia Nacional de Seguridad Sanitaria (ANSES, 2008). Con el fin de mejorar el contenido de grasa un estudio reportó que, al usar un organogel obtenido con aceite de oliva, empleando konjac, se pudo disminuir un 53 % y 76 % la grasa animal. En esta formulación, el análisis sensorial no reveló diferencias significativas entre el control y los productos reformulados. Por lo tanto, el uso de konjac como sustituto de grasa podría reducir la energía calórica total y mejorar la formulación de las salchichas, haciéndolas más saludables (Triki y col., 2013).

El salchichón es otro producto al que se le puede reducir su alto contenido de grasa. Un

estudio propuso el reemplazar no solo la grasa, sino también la carne de cerdo por carne de venado, introduciendo un organogel elaborado con aceite de oliva. El control contenía un 75 % de carne de venado magra y 25 % de carne de cerdo; en otras formulaciones, el 15 %, 25 %, 35 %, 45 % y 55 % de la carne de cerdo, fueron reemplazados por aceite de oliva, introducido en forma de organogel (aceite de oliva emulsionado con proteína de soja y agua) (Utrilla y col., 2014). A pesar de que la mayoría de los tratamientos fueron satisfactorios, en términos de características fisicoquímicas (pH, pérdida de humedad y color), no se resuelve el problema central, debido a que el porcentaje de sustitución de carne de cerdo (25 % en la formulación propuesta), por organogel, sigue siendo minoritario. Aunque no se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en las propiedades fisicoquímicas, y en el análisis de perfil de textura, no se logró la aceptación por parte de los consumidores arbitrados, cuando se realizó un porcentaje mayor al 25 % de sustitución, de carne por organogeles.

El emplear otros aceites vegetales en la elaboración de organogeles, es sin duda, un avance importante en este tipo de materiales, donde se pretende aumentar el número de solventes para este fin, que brinden mejores características lipídicas, y que sean deseables en el producto donde se busca hacer el reemplazo; sin embargo, no se ha logrado establecer el parámetro que garantice un producto cárnico, como salchicha estilo Frankfurt, similar al índice de dureza de un producto comercial. La composición química de los aceites vegetales es de suma importancia, debido a que, un mayor número de insaturaciones presentes impacta en la dureza de los organogeles, este comportamiento permite que sea posible diseñar la composición de elaboración de los materiales al perfil de textura deseado (Zetzel y col., 2012).

Dada la modificación en la composición del tipo de ácidos grasos presentes en el producto, la búsqueda de cambios de mayor impac-

to se centra en el análisis de perfil de textura, ya que este parámetro se ve afectado, al ser modificadas las formulaciones del organogel, que se aplica como sustituto de grasa en la producción del embutido. Actualmente no se ha logrado establecer una fórmula que permita igualar las características texturales y organolépticas de un producto comercial, quedando abierta la posibilidad de mejorar las propiedades fisicoquímicas del embutido, para obtener las propiedades que tienen los productos que usan grasa animal en su formulación (Tabla 1).

La sustitución al 100 % de grasa sólida (ácidos grasos saturados), en estos productos, se

ve limitada, debido a que los resultados en las propiedades físicas y sensoriales no son las deseables para los consumidores, a pesar de que se logre el objetivo de sustituir el tipo de ácido graso saturado por mono y poliinsaturado. La inclusión de organogeles, en las formulaciones tradicionales de cárnicos procesados, modifica el perfil de lípidos, pero afecta negativamente sus propiedades organolépticas.

Productos lácteos

Se ha estudiado el empleo de distintas mezclas de organogeles en productos lácteos (Tabla 2), para reemplazar el contenido y tipo de ácidos grasos presentes en helados (Botega y col., 2013;

■ **Tabla 1. Diferentes formulaciones y tipos de aceite empleados en organogeles utilizados como sustitutos de grasa saturada en distintos procesados cárnicos.**

Table 1. Different formulations and types of oil employed in organogels used as substitutes for saturated fat in different meat processing.

Procesado cárnico	Tipo de aceite	Gelante (Mezcla)	Referencia
Frankfurt	Canola Soya Linaza	Etilcelulosa 10 %	Zetzi y col. (2012)
Salchichas frescas (merguez)	Oliva	Konjac	Triki y col. (2013)
Salchichón	Oliva	Proteína de soja y agua	Utrilla y col. (2014)
Suspensiones cárnicas (salchicha tipo italiana)	Mezcla de aceite de oliva virgen y girasol	Monoacilglicerolos (0.25 % a 0.5 %) alcoholes grasos (0.5 % a 2.5 %) y lecitina de soya (2.5 %)	Lupi y col. (2014)
Frankfurt	Girasol	Fitosteroles 10 % y γ -orizanol 20 % Emulsión: organogel en agua: 50 % aceite + 50 % agua	Panagiotopoulou y col. (2016)
Seco fermentado	Linaza	Polisorbato 80 y carragenano (organogel emulsificado)	Alejandre y col. (2016)
Frankfurt	Canola	Etilcelulosa 8 %, 10 %, 12 % y 14 %; monoestearato de sorbitán al 1.5 %, 3.0 %	Barbut y col. (2016a)
Salchicha para desayuno	Canola	Etilcelulosa 8 %, 10 %, 12 % y 14 %; monoestearato de sorbitán al 1.5 %, 3.0 %	Barbut y col. (2016b)
Frankfurt	Girasol	Monoglicéridos + fitoesteroles	Kouzounis y col. (2017)

Banupriya y col., 2016; Moriano y Alamprese, 2017), margarina (Hwang y col., 2013; Yilmaz y Ögütçü, 2014; Ögütçü y Yilmaz, 2015; Pehlivanoglu y col., 2018), queso crema (Bemer y col., 2016) y yogur (Moschakis y col., 2017), las cuales han impactado en el análisis del perfil de textura y sobre todo en el análisis sensorial.

Las formulaciones que se han utilizado, para sustituir las grasas saturadas, en helados, han mostrado un impacto positivo importante, al no modificar drásticamente las características fisicoquímicas y texturales, en tra-

tamientos, con respecto del control que no incluye organogel; los cambios más significativos se presentaron en viscosidad y sólidos solubles, quedando claro que, a una mayor concentración de agente gelante se obtienen productos similares al control, dicha tendencia se presentó solo en un 5 % de sustitución de grasa de leche por organogel (Banupriya y col., 2016). Los trabajos realizados adicionando organogeles en margarinas, registraron que los productos modificados presentaron similitud con sus controles, con influencia en sus propiedades reológicas y de textura, atribuyéndose estos re-

■ **Tabla 2. Diferentes formulaciones y tipos de aceite empleados en organogeles utilizados como sustitutos de grasa saturada en distintos procesados lácteos.**

Table 2. Different formulations and types of oil employed in organogels used as substitutes for saturated fat in different dairy products.

Procesado lácteo	Tipo de aceite	Gelante (Mezcla)	Referencia
Helado	Girasol	Cera de salvado de arroz 10 %	Banupriya y col. (2016)
	Girasol	Cera de salvado de arroz 10 % Cera de candelilla 10 % Cera de carnauba 10 % Monooleato de glicerol 0.02 %	Botega y col. (2013)
	Girasol	Fitosteroles + γ -orizanol 8 % a 12 %	Moriano y Alamprese (2017)
Margarina	Oliva	Cera de girasol 3 %, 7 % y 10 % Cera de abeja 3 %, 7 % y 10 %	Yilmaz y Ögütçü (2014)
	Girasol	Cera de carnauba Mezclas aceite normal y aceite alto en ácido oleico	Pehlivanoglu y col. (2018)
	Soja	Cera de girasol 2 %, 6 % y 10 % Cera de salvado de arroz 2 %, 6 % y 10 % Cera de candelilla 2 %, 6 % y 10 %	Hwang y col. (2013)
	Semilla de granada	Cera de carnauba 7 %, 10 % Monoglicérido 7 %, 10 %	Ögütçü y Yilmaz (2015)
Queso crema	Soja	Cera de salvado de arroz 10 % + aceite regular Cera de salvado de arroz 10 % + aceite alto en ácido oleico Etilcelulosa 10 % + aceite regular Etilcelulosa 10 % + aceite alto en ácido oleico	Bemer y col. (2016)
Yogur	Girasol	γ -orizanol + fitosterol	Moschakis y col. (2017)

sultados a las combinaciones realizadas entre tipos de gelantes y aceite. Las distintas propiedades fisicoquímicas, de diferentes productos derivados lácteos, mostraron una reducción significativa de ácidos grasos saturados; sin embargo, dejan abierta la necesidad de buscar la reformulación de los organogeles, con otras fuentes de aceites vegetales y agentes geladores, que mejoren las propiedades fisicoquímicas, a un porcentaje mayor de sustitución. Los organogeles podrían utilizarse en una variedad de alimentos, con resultados prometedores, promoviendo la reducción efectiva de ácidos grasos saturados y ácidos grasos *trans* (Chaves y col., 2018).

Ventajas y desventajas de aplicación

Los organogeles presentan características físicas y funcionales únicas, de gran interés para la industria alimentaria y farmacéutica, por su diversidad de aplicaciones potenciales industriales, como la fabricación de productos para untar o el incremento de la biodisponibilidad de los nutraceuticos. Sin embargo, muchas de esas aplicaciones se encuentran en fase de investigación y desarrollo. El énfasis en las investigaciones que involucren la aplicación de organogeles en alimentos está dirigida a la estructuración de TAG, permitiendo, mediante diversos agentes estructurantes, la reducción de ácidos grasos saturados y *trans* en la dieta (Co y Marangoni, 2012). Esta aplicación es la más importante de todos los usos que se le pueden atribuir a dichos materiales, dada su importancia, sobre todo en relación a productos más saludables, ya que una variedad de productos bajos o reducidos en grasa han ganado prominencia en estanterías de supermercado.

El campo de los organogeles es bastante amplio (Hughes y col., 2009). De manera complementaria, los sistemas de organogel también han aparecido como una tecnología emergente, con fines gastronómicos, en cocinas experimentales. Las mezclas de EC, γ -orzanol y β -sitosterol, y la cera de candelilla pueden utilizarse para conferir diferentes texturas, co-

lores y formas a los aceites vegetales, utilizados como ingredientes en productos como chocolates, productos cárnicos y muchos otros. De este modo, se puede crear una gran variedad de platillos que traerán al consumidor nuevas y emocionantes experiencias sensoriales, diferentes de las comunes (Rogers y col., 2014).

Las ventajas principales de los organogeles comestibles, incluyen su contenido predominantemente alto en grasas “más saludables” insaturadas y bajos en grasas saturadas “menos saludables”; la capacidad de proporcionar la naturaleza elástica de una grasa sólida; la capacidad de soportar transiciones sol-gel, varias veces, de manera simple, por recalentamientos, al ser termorreversibles; la formación a bajas concentraciones de moléculas gelantes ($\sim 2\%$), para lograr la estructuración (Hughes y col., 2009), y el desarrollo de materiales suaves basados en aceites líquidos (Patel y col., 2013), siendo este el principal atractivo para la industria alimentaria. También son capaces de aminorar otro problema común en una gran cantidad de productos alimentarios: la migración de aceite (Si y col., 2016).

Las desventajas se centran en la principal limitante de los organogeles, que es la dificultad de identificar gelantes baratos y de grado alimenticio; así como, de un problema relacionado con el consumidor, dado que no se ha logrado obtener los atributos que proporcionan las grasas sólidas, las cuales, por su alto contenido en ácidos grasos saturados, contribuyen a importantes propiedades organolépticas de los alimentos, incluida la palatabilidad, lubricación y estructura (Ceballos y col., 2014).

A pesar de mostrar un perfil nutricional más conveniente en los productos, a los cuales se ha realizado un reemplazo en el tipo de grasa; las características deseables, en los productos lácteos y cárnicos, siguen sin tener la aceptación sensorial general por parte de los consumidores. Además, los estudios realizados, de

los productos obtenidos con este reemplazo, se han limitado a la caracterización de los mismos, sin mostrar estudios, en cuanto a vida de anaquel y análisis sensorial, que muestren el verdadero grado de aceptabilidad de los productos alimenticios obtenidos, por lo que la industria y grupos de investigación, están en la búsqueda de mejores formulaciones, que aseguren las cualidades deseables en este tipo de sistemas alimentarios.

CONCLUSIONES

Los organogel ofrecen características físicas distintas de los aceites vegetales, sin influir directamente en su composición química, permitiendo ser empleados como sustituto de grasa sólida en algunas matrices cárnicas y lácteas, las cuales se favorecen al modificar su perfil de ácidos grasos, y con ello, considerarse más saludables. Las formulaciones de elaboración de los materiales determinan las propiedades finales de los productos obtenidos, así como el porcentaje de sustitución de grasa sólida por organogel; sin embargo, a

pesar de mejorar su perfil lipídico, e igualar, en algunas propiedades fisicoquímicas, como la textura, no se logra obtener el sabor que proporciona la grasa sólida, representando la principal barrera de aplicación industrial y lanzamiento de estos al mercado. Por lo que existe área de oportunidad para mejorar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales en nuevas formulaciones, que integren estos materiales novedosos, capaces de satisfacer las necesidades del consumidor; y posiblemente, en un futuro a corto plazo, los organogel serán la mejor opción para la eliminación de grasas saturadas y *trans*, si se regula la eliminación de estas en alimentos, en regiones como México y Latinoamérica, acciones encaminadas a la prevención de enfermedades crónico degenerativas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada a la autora Mayela García Andrade para sus estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Alejandro, M., Poyato, C., Ansorena, D., and Astiasarán, I. (2016). Linseed oil gelled emulsion: A successful fat replacer in dry fermented sausages. *Meat Science*. 121: 107-113.
- ANSES, Agencia Nacional de Seguridad Sanitaria (2008). Agence Nationale de Sécurité Sanitaire. [En línea]. Disponible en: <http://www.anses.fr/TableCIQUAL/index.htm>. Fecha de consulta: 16 de febrero de 2012.
- Banupriya, S., Elango, A., Karthikeyan, N., and Kathirvelan, C. (2016). Physico chemical characteristics of dietetic ice cream developed by with sunflower oil rice bran wax organogel. *Indian Journal of Science and Technology*. 9(32): 32-35.
- Barbut, S., Wood, J., and Marangoni, A. (2016a). Potential use of organogels to replace animal fat in comminuted meat products. *Meat Science*. 122: 155-162.
- Barbut, S., Wood, J., and Marangoni, A. (2016b). Quality effects of using organogels in breakfast sausage. *Meat Science*. 122: 84-89.
- Barbut, S., Wood, J., and Marangoni, A. (2016c). Effects of organogel hardness and formulation on acceptance of Frankfurters. *Journal of Food Science*. 81(9): 2183-2188.
- Bemer, H., Limbaugh, M., Cramer, E., Harper, W., and Maleky, F. (2016). Vegetable organogels incorporation in cream cheese products. *Food Research International*. 85: 67-75.
- Bier, D. (2015). Saturated fats and cardiovascular disease: Interpretations not as simple as they once were. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 56(12): 1943-1946.
- Bloukas, J., Paneras, E., and Fournitzis, G. (1997). Effect of replacing pork backfat with olive oil on processing and quality characteristics of fermented sausages. *Meat Science*. 45(2): 133-144.
- Bot, A., Den-Adel, R., and Roijers, E. (2008). Fibrils of γ -oryzanol + β -sitosterol in edible oil organogels. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 85(12): 1127-1134.
- Bot, A., Veldhuizen, Y., den-Adel, R., and Roijers, E. (2009). Non-TAG structuring of edible oils and emulsions. *Food Hydrocolloids*. 23(4): 1184-1189.
- Botega, D., Marangoni, A., Smith, A., and Goff, H. (2013). Development of formulations and processes to incorporate wax oleogels in ice cream. *Journal of Food Science*. 78(12): 1845-1851.
- Ceballos, M., Brailovsky, V., Bierbrauer, K., Cuffini, S., Beltramo, D., and Bianco, I. (2014). Effect of ethylcellulose on the structure and stability of non-aqueous oil based propylene glycol emulsions. *Food Research International*. 62: 416-423.
- Chaves, K., Barrera-Arellano, D., and Ribeiro, A. (2018). Potential application of lipid organogels for food industry. *Food Re-*

search International. 105:863-872.

Co, E. and Marangoni, A. (2012). Organogels: an alternative edible oil-structuring method. *Journal of American Oil Chemical Society*. 89(5): 749-780.

COMECARNE, Consejo Mexicano de la Carne (2018). Consejo Mexicano de la Carne. [En línea]. Disponible en: <https://comecarne.org/datos-de-la-industria/>. Fecha de consulta: 3 de enero de 2019.

Davidovich-Pinhas, M., Barbut, S., and Marangoni, A. (2016). Development, characterization, and utilization of food-grade polymer oleogels. *Annual Review of Food Science and Technology*. 7(1): 65-91.

Eerd, J. (1971). Meat emulsion stability. Influence of hydrophilic lipophilic balance, salt concentration and blending with surfactants. *Journal of Food Science*. 36(7):1121-1124.

Flores, M., Giner, E., Fiszman, S. M., Salvador, A., and Flores, J. (2007). Effect of a new emulsifier containing sodium stearyl-2-lactylate and carrageenan on the functionality of meat emulsion systems. *Meat Science*. 76(1):9-18.

Gandolfo, F. G., Bot, A., and Flöter, E. (2004). Structuring of edible oils by long-chain FA, fatty alcohols, and their mixtures. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 81(1): 1-6.

Garti, N. and Marangoni, A. (2011). *Edible Oleogels: An overview of the past, present, and future of organogels*. Urbana IL: AOCS Press. 1-17 Pp.

Gordon, A. and Barbut, S. (1992). Mechanisms of meat batter stabilization: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 32(4):299-332.

Grasso, S., Brunton, N. P., Lyng, J. G., Lalor, F., and Monahan, F. J. (2014). Healthy processed meat products e regulatory, reformulation and consumer challenges. *Trends in Food Science & Technology*. 39(1):4-17.

Gravelle, A., Barbut, S., Quinton, M., and Marangoni, A. (2014). Towards the development of a predictive model of the formulation-dependent mechanical behaviour of edible oil-based ethylcellulose oleogels. *Journal of Food Engineering*. 143: 114-122

Hughes, N., Marangoni, A., Wright, A., Rogers, M., and Rush, J. (2009). Potential food applications of edible oil organogels. *Trends in Food Science & Technology*. 20(10): 470-480.

Hwang, H., Singh, M., Bakota, E. L., Winkler-Moser, J., Kim, S., and Liu, S. (2013). Margarine from organogels of plant wax and soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 90(11):1705-1712.

Jiménez-Colmenero, F. (2007). Healthier lipid formulation approaches in meat-based functional foods. Technological options for replacement of meat fats by non-meat fats. *Trends in Food Science and Technology*. 18(11):567-578.

Kouzounis, D., Lazaridou, A., and Katsanidis, E. (2017). Partial

replacement of animal fat by oleogels structured with monoglycerides and phytosterols in frankfurter sausages. *Meat Science*. 130:38-46.

Lupi, F., Gabriele, D., Facciolo, D., Baldino, N., Seta, L., and de-Cindio, B. (2012). Effect of organogelator and fat source on rheological properties of olive oil-based organogels. *Food Research International*. 46(1):177-184.

Lupi, F., Gabriele, D., Seta, L., Baldino, N., and de-Cindio, B. (2014). Rheological design of stabilized meat sauces for industrial uses. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 116(12):1734-1744.

Moriano, M. and Alamprese, C. (2017). Organogels as novel ingredients for low saturated fat ice creams. *LWT - Food Science and Technology*. 86:371-376.

Moschakis, T., Dergiade, I., Lazaridou, A., Biliaderis, C., and Katsanidis, E. (2017). Modulating the physical state and functionality of phytosterols by emulsification and organogel formation: Application in a model yogurt system. *Journal of Functional Foods*. 33:386-395.

Moschakis, T., Panagiotopoulou, E., and Katsanidis, E. (2016). Sunflower oil organogels and organogel-in-water emulsions (part I): Microstructure and mechanical properties. *LWT - Food Science and Technology*. 73:153-161.

Muguerza, E. and Gimeno, O. (2004). New formulations for healthier dry fermented sausages: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 15(9):452-457.

Murdan, S., Gregoriadis, G., and Florence, A. (1999). Novel sorbitan monostearate organogels. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 88(6):608-614.

Nettleton, J., Brouwer, I., Geleijnse, J., and Hornstra, G. (2017). Saturated fat consumption and risk of coronary heart disease and ischemic stroke: A Science Update. *Annals of Nutrition and Metabolism*. 70(1):26-33.

NHDSC, National Hot Dog and Sausage Council (2016). National Hot Dog and Sausage Council. Estadísticas de consumo. [En línea]. Disponible en: <http://www.hot-dog.org/media/consumption-stats>. Fecha de consulta: 30 de enero de 2018.

Okesola, B., Vieira, V., Cornwell, D., Whitelaw, N., and Smith, D. (2015). 1,3:2,4-Dibenzylidene- D-sorbitol (DBS) and its derivatives – efficient, versatile and industrially-relevant low-molecular-weight gelators with over 100 years of history and a bright future. *Soft Matter*. 11(24):4768-4787.

Öğütçü, M. and Yilmaz, E. (2015). Comparison of the pomegranate seed oil organogels of carnauba wax and monoglyceride. *Journal of Applied Polymer Science*. 132(4):10-13.

Panagiotopoulou, E., Moschakis, T., and Katsanidis, E. (2016). Sunflower oil organogels and organogel-in-water emulsions (part II): Implementation in frankfurter sausages. *LWT - Food Science and Technology*. 73(part II): 351-356.

- Park, J., Rhee, K., Keeton, J., and Rhee, K. (1989). Properties of low-fat Frankfurters containing monounsaturated and omega-3 polyunsaturated oils. *Journal of Food Science*. 54(3): 500-504.
- Patel, A. and Dewettinck, K. (2015). Comparative evaluation of structured oil systems: Shellac oleogel, HPMC oleogel, and HIPE gel. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 117(11):1772-1781.
- Patel, A. and Dewettinck, K. (2016). Edible oil structuring: an overview and recent updates. *RSC Food Function*. 7(1): 20-29.
- Patel, A., Schatteman, D., Lesaffer, A., and Dewettinck, K. (2013). A foam-templated approach for fabricating organogels using a water-soluble polymer. *RSC Advances*. 3(45): 22900-22903.
- Pehlivanoglu, H., Demirci, M., and Toker, O. (2018). Rheological properties of wax oleogels rich in high oleic acid. *International Journal of Food Properties*. 20(3):2856-2867.
- Pernetti, M., van-Malssen, K., Flöter, E., and Bot, A. (2007a). Structuring of edible oils by alternatives to crystalline fat. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. 12(4-5): 221-231.
- Pernetti, M., van-Malssen, K., Kalnin, D., and Flöter, E. (2007b). Structuring edible oil with lecithin and sorbitan tri-stearate. *Food Hydrocolloids*. 21(5-6): 855-861.
- Ramos, G., Farias, E., Almada, C., and Crivaro, N. (2004). Estabilidad de salchichas con hidrocoloides y emulsificantes. *Información Tecnológica*. 15(4): 91-94.
- Rogers, M. A. (2009). Novel structuring strategies for unsaturated fats – Meeting the zero-trans, zero-saturated fat challenge: A review. *Food Research International*. 42(7): 747-753.
- Rogers, M., Strober, T., Bot, A., Toro-vazquez, J., Stortz, T. and Marangoni, A. (2014). Edible oleogels in molecular gastronomy. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 20(1): 22-31.
- Sánchez, R., Franco, J., Delgado, M., Valencia, C., and Gallegos, C. (2011). Rheology of oleogels based on sorbitan and glyceryl monostearates and vegetable oils for lubricating applications. *Grasas y Aceites*. 62(3): 328-336.
- Sawalha, H., Venema, P., Bot, A., Flöter, E., and van der Linden, E. (2011). The influence of concentration and temperature on the formation of γ -oryzanol + β -sitosterol tubules in edible oil organogels. *Food Biophysics*. 6(1): 20-25.
- Schäink, H. and Van-Malssen, K. (2007). Shear modulus of sintered 'house of cards'-like assemblies of crystals. *Langmuir*. 23(25):12682-12686.
- Si, H., Cheong, L., Huang, J., Wang, X., and Zhang, H. (2016). Physical properties of soybean oleogels and oil migration evaluation in model praline system. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 93(8):1075-1084.
- Siraj, N., Shabbir, M., Ahmad, T., Sajjad, A., Khan, M., Khan, M., and Butt, M. (2015). Organogelators as a saturated fat replacer for structuring edible oils. *International Journal of Food Properties*. 18(9):1973-1989.
- Stortz, T., Zetzl, A., Barbut, S., Cattaruzza, A., and Marangoni, A. (2012). Edible oleogels in food products to help maximize health benefits and improve nutritional profiles. *Lipid Technology*. 24(7):151-154.
- Terech, P. and Weiss, R. (1997). Low molecular mass gelators of organic liquids and the properties of their gels. *Chemical Reviews*. 97(8): 3133-3160.
- Triki, M., Herrero, A., Jiménez-Colmenero, F., and Ruiz-Capillas, C. (2013). Effect of preformed konjac gels, with and without olive oil, on the technological attributes and storage stability of merguez sausage. *Meat Science*. 93(3): 351-360.
- Utrilla, M., García-Ruiz, A., and Soriano, A. (2014). Effect of partial replacement of pork meat with an olive oil organogel on the physicochemical and sensory quality of dry-ripened venison sausages. *Meat Science*. 97(4): 575-582.
- Vintiloiu, A. and Leroux, J. (2008). Organogels and their use in drug delivery – A review. *Journal of Controlled Release*. 125(3): 179-192.
- Wang, F., Gravelle, A., Blake, A., and Marangoni, A. (2016). Novel trans fat replacement strategies. *Current Opinion in Food Science*. 7: 27-34.
- Wright, A. and Marangoni, A. (2007). Time, temperature, and concentration dependence of ricin elaidic acid canola oil organogelation. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 84(1): 3-9.
- Yılmaz, E. and Ögütçü, M. (2014). Properties and stability of hazelnut oil organogels with beeswax and monoglyceride. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 21(6):1007-1017.
- Youssef, M. and Barbut, S. (2009). Effects of protein level and fat/oil on emulsion stability, texture, microstructure and color of meat batters. *Meat Science*. 82(2):228-233.
- Youssef, M. and Barbut, S. (2011). Fat reduction in comminuted meat products-effects of beef fat, regular and preemulsified canola oil. *Meat Science*. 87(4): 356-360.
- Yu, G., Yan, X., Han, C., and Huang, F. (2013). Characterization of supramolecular gels. *Chemical Society Reviews*. 42(16): 6697-6722.
- Zetzl, A., Marangoni, A., and Barbut, S. (2012). Mechanical properties of ethylcellulose oleogels and their potential for saturated fat reduction in frankfurters †. *Food & Function*. 3(3): 327-337.



Imagen de: Miguel Ángel Mazorra Manzano

Propiedades y opciones para valorizar el lactosuero de la quesería artesanal

Properties and options for the valorization of whey from the artisanal cheese industry

Miguel Ángel Mazorra-Manzano^{1*}, Jesús Martín Moreno-Hernández²

RESUMEN

El lactosuero posee una gran cantidad de los componentes de la leche, sin embargo, una alta proporción del volumen generado se sigue tirando, provocando pérdida de nutrientes y problemas de contaminación. El objetivo del presente trabajo fue proveer información sobre las propiedades nutricionales, funcionales y biológicas del lactosuero, generado por la industria quesera artesanal, así como evidencias científicas recientes que sustentan, bajo distintos enfoques tecnológicos, el potencial de aprovechamiento, mediante su transformación o recuperación para adicionarle valor. Las oportunidades en la valorización del lactosuero, a través de la elaboración de diversos productos lácteos, como el requesón (queso de suero), bebidas fermentadas o con frutas, bebidas para deportistas, bebidas alcohólicas, mantequilla de suero, dulces, helados y paletas, reflejan el nicho de oportunidades para hacer la industria quesera artesanal más redituable. El cambio de paradigmas en los productores artesanales, en percibir al lactosuero como una fuente de co-productos para su recuperación, transformación y reincorporación a sus procesos, acorde a las capacidades tecnológicas de dicha industria, y no como un subproducto, reduciría las pérdidas de componentes de alto valor (e.g., proteína, lípidos y azúcares), trayendo consigo efectos benéficos, tanto ambientales como económicos.

PALABRAS CLAVE: lactosuero, subproducto, co-producto, valorización, productos lácteos.

ABSTRACT

Whey contains a high concentration of milk components. However, a high volume of it continues to be discarded to the environment, leading to a loss in nutrients and pollution problems. The objective of the present review is oriented to provide information on the nutritional, functional and biological properties of the whey generated by the artisanal cheese industry. Furthermore, scientific evidence supporting the different opportunities for its valorization, revised under different technological approaches is included. The potential of whey valorization, through its recovery or transformation into value-added products, includes its use in a diversity of food products. Whey use includes the production of requesón (whey cheese), fermented beverages, fruit-flavored drinks, sports drinks, alcoholic beverages, whey buttermilk, ice-cream, candies and popsicles. The transformation of whey produced by the artisanal cheese industry, offer a niche of opportunities to make this industry more profitable. The reduction in loss of highly valuable components (e.g., protein, fat and lactose) by using whey, according to their technological capabilities, represents a suitable option to its valorization, by changing the perception of whey as a waste, but as a source of co-products. The recovery, transformation and reincorporation into the processes, would bring beneficial economic effects to artisanal producers and reduce the environmental impact caused by this industry.

KEYWORDS: whey, by-product, co-product, value-added, dairy products.

*Correspondencia: mazorra@ciad.mx/ Fecha de recepción: 7 de abril de 2018/ Fecha de aceptación: 25 de febrero de 2019/ Fecha de publicación: 29 de julio de 2019

¹Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), A.C. Laboratorio de Biotecnología de Lácteos, Química y Autenticidad de Alimentos, carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas, núm. 46, Hermosillo, Sonora, México, C. P. 83304. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle de Culiacán.

INTRODUCCIÓN

La industria quesera es una de las áreas más dinámicas e importantes del sector agroalimentario en México. De acuerdo a los datos reportados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2016), la producción de leche de bovino alcanzó 11 600 millones de L, destinándose cerca del 23 % a la producción de quesos (ca. 266 000 T de queso). Aunque la mayor producción quesera la concentran las grandes compañías transnacionales y nacionales, la quesería artesanal tiene una participación muy destacable. La producción de quesos por productores artesanales se considera que es igual o mayor que la industria formal, sin embargo esta no se encuentra adecuadamente documentada y los datos estadísticos no son representativos (Castañeda-Martínez y col., 2009; Villegas-de-Gante y Cervantes-Escoto, 2011). No obstante, dicha industria juega un papel muy importante en la cadena de valor de la leche, pues la integran productores lecheros que realizan prácticas queseras en sus unidades de producción (farmstead) o en sus hogares. Estas empresas varían en su capacidad de procesamiento y transformación de la leche, entre ellas, se encuentran productores pequeños (< 2 000 L/d; incluyen queserías familiares que transforman pocos litros en sus hogares), medianos (2 000 L/d a 20 000 L/d) y de gran escala (> 20 000 L/d), siendo los dos primeros grupos los más representativos de la industria quesera artesanal mexicana. La producción de quesos artesanales es una actividad diaria, que se practica a lo largo del territorio nacional, con cerca de 40 variedades reportadas (González-Córdova y col., 2016). La valoración de este tipo de quesos se ha incrementado en los últimos años, con mejoras en su calidad y demanda. Sin embargo, esta industria sigue presentando rezagos en el aprovechamiento de los subproductos que genera, principalmente lactosuero. El lactosuero es el líquido que se drena durante la elaboración de quesos tras la separación de la cuajada (caseínas y grasa principalmente); posee alrededor del 55 % de los sólidos de la leche (principalmente lactosa, proteína sé-

rica, minerales y en menor proporción grasa), lo que lo convierte en un residuo altamente contaminante, si no se maneja de manera adecuada. La quesería mexicana produce una gran cantidad de lactosuero, ya que por cada kg de queso producido, se generan entre 8 L y 9 L de lactosuero, que se traduce en una producción superior a los 2.4 millones de T anuales, del cual se estima que solo la mitad es aprovechado (Mollea y col., 2013). El lactosuero obtenido por la quesería artesanal mexicana, sigue siendo considerado, erróneamente, un residuo con pocas oportunidades de aprovechamiento o comercialización, limitando el uso de una pequeña parte a la preparación de requesón y en la alimentación de ganado bovino o porcino. Ante dicho panorama, es necesario hacer un cambio de paradigmas en los productores artesanales, que les permitan incorporar procesos y tecnologías para el aprovechamiento integral del lactosuero, acorde a sus capacidades económicas y tecnológicas.

El objetivo del presente trabajo fue proporcionar información sobre las características nutricionales, funcionales y biológicas del lactosuero, así como evidencias científicas que sustentan, bajo distintos enfoques tecnológicos, el potencial de aprovechamiento y/o transformación del lactosuero generado por la industria quesera artesanal.

Composición y propiedades del lactosuero

Composición química

En términos generales, el lactosuero posee un 55 % de los nutrientes mayoritarios originales de la leche, los cuales corresponden al 96 % de la lactosa (46 g/L a 52 g/L), 25 % de la proteína (6 g/L a 10 g/L) y 8 % de la materia grasa (5 g/L) (Smithers, 2008; Yadav y col., 2015).

El lactosuero obtenido de la elaboración de queso se clasifica en suero dulce y suero ácido. El suero dulce se obtiene mediante la coagulación enzimática de las caseínas al pH fisiológico de la leche (6.5 a 6.8), utilizando cuajo comercial estandarizado (quimosina u otra proteasa con actividad similar). Presenta un

alto contenido de lactosa (46 g/L a 65 g/L) y proteína (6 g/L a 12 g/L), con bajo contenido de grasa (3 g/L a 5 g/L) y acidez (máximo 2 g/L de ácido láctico). Este suero proviene de la elaboración tradicional de queso fresco, panela y Chihuahua, mientras que el suero ácido proviene de quesos como el porro, Oaxaca, cotija y cocido, donde, en estos últimos, se utiliza una coagulación mixta en su elaboración (disminución del pH de la leche y adición de cuajo). La acidificación de la leche se realiza mediante la adición de ácidos orgánicos (e.g. ácido cítrico) o la fermentación de la lactosa con bacterias ácido lácticas (BALs) propias de la leche o con cultivos iniciadores. La composición fisicoquímica del suero ácido es muy parecida al suero dulce, oscilando de 6 g/L a 8 g/L de proteína, 3 g/L a 4 g/L de grasa, 38 g/L a 45 g/L de lactosa. Sin embargo, el suero ácido posee un mayor contenido de ácido láctico (6.4 g/L) y menor pH (< 5.6). El lactosuero también es rico en minerales, siendo los principales el calcio (0.6 g/L), fósforo (0.7 g/L), magnesio (0.17 g/L), sodio (0.3 g/L) y potasio (1 g/L). La concentración de otros minerales como zinc, hierro, cobre y manganeso depende del origen de la leche y tipo de lactosuero (Wong y col., 1978; Yadav y col., 2015).

La variabilidad en la composición, entre los distintos sueros, hace necesario determinar su calidad tecno-funcional y biológica, con el propósito de optimizar su perfil tecnológico y adaptar tecnologías acordes a las condiciones de la quesería regional, para su mejor aprovechamiento.

Calidad nutricional

La relevancia del contenido de proteína, lactosa, grasa y minerales (principalmente calcio y fósforo) en el lactosuero, se debe a su valor nutritivo como alimento y como fuente de componentes funcionales y bioactivos. La calidad nutricional de las proteínas del lactosuero es excepcional, pues presentan un valor biológico (VB) superior al de las proteínas del huevo (i.e., 104 *vs.* 100) y 1.4 veces mayor a la proteína de soya. Así como una elevada utiliza-

ción neta de proteína (NPU, por sus siglas en inglés: Net Protein Utilization) (i.e., 92 %) y una máxima digestibilidad (PDCAAS, de 1.0; por sus siglas en inglés: Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score) (Hoffman y Falvo, 2004; Smithers, 2008). Por otro lado, la lactosa [β -D-galactopiranosil-(1 $\rightarrow$ 4)-D-glucosa] es el componente energético mayoritario en el lactosuero. Sus derivados (e.g., lactulosa y lactosucrosa) poseen propiedades prebióticas que favorecen el crecimiento selectivo de microorganismos benéficos para la salud, especialmente bifidobacterias y lactobacilos (Wang, 2009). Además, la fracción lipídica de la membrana de los glóbulos de grasa de la leche (MFGM, por sus siglas en inglés: Milk Fat Globule Membrane) contiene ácidos grasos poliinsaturados, como el ácido linoleico conjugado (C18:2 *cis*-9, *trans*-11-CLA) (Benjamin y col., 2015).

Propiedades funcionales de los componentes del lactosuero

Desde el punto de vista tecnológico, la proteína es la fracción más versátil e importante de los componentes del lactosuero. Esta fracción proteica incluye β -lactoglobulina (β -LG, 40 % a 50 %), α -lactoalbúmina (α -LA, 12 % a 15 %), inmunoglobulinas (IGs, 8 %), albúmina de suero bovino (BSA, 5 %; por sus siglas en inglés: Bovine Serum Albumin), lactoferrina (Lf, 1 %), lactoperoxidasa (0.5 %), fracción proteasapectona (12 %) y el glicomacropéptido (GMP, 12 %) (Smithers, 2008; Yadav y col., 2015).

El uso de las proteínas de lactosuero incluye diversas aplicaciones en la formulación de alimentos, como en bebidas, panadería, confitería, productos lácteos y cárnicos. Entre las proteínas del lactosuero, con propiedades funcionales más sobresalientes, se encuentran β -LG, α -LA y BSA.

La β -LG es una proteína globular mayoritaria en el lactosuero y posee excelentes propiedades emulsificantes y gelificantes, caracterizándose como un ingrediente altamente versátil para la formulación de alimentos (Chatterton y col., 2006). La α -LA, además de pre-

sentar alta solubilidad en un amplio rango de pH, presenta excelentes propiedades espumantes y emulsificantes, y tiene la capacidad de ligar iones calcio (Chatterton y col., 2006) y compuestos hidrofóbicos, como vitaminas liposolubles (Vit D₃), retinol y ácidos grasos (Delavari y col., 2015). La BSA contiene propiedades similares a la α -LA, y es comúnmente utilizada como proteína modelo para el estudio de sistemas alimentarios emulsionados y aireados (Chatterton y col., 2006).

Por otro lado, la fracción lipídica del lactosuero también posee propiedades funcionales atractivas, ya que esta fracción contiene fosfolípidos de membrana (10 % a 15 % de lípidos, base seca) que rodean a la MFGM. Esta fracción es altamente valorada como ingrediente alimentario por sus excelentes propiedades emulsificantes (Jiménez-Flores y Brisson, 2008).

Componentes bioactivos en el suero de queso

Proteínas y péptidos

La mayoría de los componentes bioactivos del lactosuero corresponden a la fracción de proteínas séricas, GMP, enzimas, inmunoglobulinas y péptidos derivados de su hidrólisis. Se ha reportado que la β -LG estimula diferentes funciones intestinales (e.g. absorción de retinol y ácidos grasos), y presenta propiedades anticarcinogénicas y capacidad para modular la respuesta inmune (Chatterton y col., 2006). La α -LA se ha relacionado con su citotoxicidad hacia células tumorales, al formar complejos no covalentes con el ácido oleico (Rammer y col., 2010). Otras proteínas en el lactosuero, como BSA, GMP, Lf y lactoperoxidasa, comparten propiedades antimicrobianas, antifúngicas y antioxidantes (Hernández-Ledesma y col., 2011). Por ejemplo, el GMP, debido a su composición (libre de fenilalanina y altamente glicosilado), es adecuado para formular dietas especiales para infantes con problemas de fenilcetonuria, además de presentar propiedades anticariógenas (Salcedo y col., 2011). Las inmunoglobulinas (IgG1, IgG2) imparten inmunidad pasiva y otros efectos benéficos en per-

sonas inmunocomprometidas (Mehra y col., 2006). El lactosuero contiene cantidades considerables de factores de crecimiento similares a insulina tipo 1 y tipo 2 (IGF-1, IGF-2, por sus siglas en inglés: Insulin-like growth factor), factor de crecimiento transformante beta (TGF- β , por sus siglas en inglés: Transforming growth factor beta) y factor de crecimiento de fibroblastos (FGF, por sus siglas en inglés: fibroblast growth factor) (Forster y col., 2014).

Además de las propiedades biológicas que las proteínas séricas presentan en su estado nativo, también mediante su hidrólisis por procesos enzimáticos o fermentativos, pueden liberar péptidos bioactivos, con efectos benéficos a la salud. Se han reportado secuencias peptídicas, provenientes de la hidrólisis de la β -LG y la α -LA que poseen actividad antihipertensiva, antioxidante, antimicrobiana, anti-diabética, hipocolesterolémica, inmunoestimulante y anticancerígena (Gauthier y col., 2006; Dullius y col., 2018). El lactosuero proveniente de la producción artesanal de queso fresco, panela y ranchero (elaborado con leche cruda) contiene péptidos bioactivos con actividad antioxidante (fracción 5 kDa a 10 kDa) y antihipertensiva (fracción 1 kDa a 3 kDa) *in vitro* (Tarango-Hernández y col., 2015).

Lípidos

Dentro de la fracción lipídica de la leche, se encuentran dos sistemas de fosfolípidos de membrana, que consisten de lipoproteínas ligadas a fosfolípidos y triglicéridos: los lípidos de membrana de leche descremada (SMM, por sus siglas en inglés: Skim Milk Membrane) y los lípidos de MFGM (Jiménez-Flores y Brisson, 2008). Los glicerofosfolípidos y esfingolípidos constituyen aproximadamente el 1 % de los fosfolípidos de la fracción MFGM (Elías-Argote y col., 2013). Los esfingolípidos, como la esfingosina, ceramida y esfingomielina, presentan propiedades bioactivas, asociadas con la modulación de diferentes funciones fisiológicas y proceso patológico, tales como, el crecimiento y diferenciación celular, angiogénesis, regulación de procesos inflamatorios, enfermedades cardiovasculares y cáncer (Contarini y

Povolo, 2013). Además, también se pueden encontrar una gran proporción de ácido oléico (C18:1), palmítico (C16:0), linoléico (C18:2, ω -6) y α -linolénico (C18:3, ω -3), los cuales han mostrado (especialmente los ácidos grasos poliinsaturados) un efecto protector contra infecciones bacterianas, fúngicas, virales y parasitarias (Thormar y Hilmarsson, 2007; Benjamin y col., 2015).

Lactosa y galacto-oligosacáridos (GOS)

El suero es una fuente importante de lactosa, el cual es un disacárido de gran valor biológico, que estimula la absorción intestinal de calcio, favoreciendo la mineralización ósea y el crecimiento de bifidobacterias benéficas para la salud colorectal. Los GOS, como los sialiloligosacáridos (i.e. sialilactosa) y otros oligosacáridos ácidos, que generalmente se encuentran en la leche materna y calostro, son abundantes en el lactosuero (Barile y col., 2009). La lactosa también se puede utilizar como materia prima para producción de ácidos orgánicos (e.g., láctico, acético, entre otros), y mediante procesos enzimáticos y fermentativos, sintetizar una gran diversidad de compuestos, como galactooligosacáridos, tagatosa, lactulosa, lactosucrosa, glucosilactosa y heterooli-

gosacáridos, los cuales presentan propiedades bifidogénicas, con efectos antiinflamatorios (Fischer y Kleinschmidt, 2015; Nath y col., 2016). Estos compuestos presentan alta demanda por la industria farmacéutica, como auxiliares en el tratamiento de diferentes enfermedades crónico-degenerativas.

Opciones de aprovechamiento del lactosuero por queserías artesanales

La quesería familiar y productores de mediana escala, pueden aprovechar el lactosuero en la elaboración de productos alimenticios, como los que se muestran en la Figura 1. La infraestructura tecnológica requerida, para elaborar algunos de estos productos, forma parte de una infraestructura básica (tinajas, tanques, marmitas, enfriadores, agitadores, entre otros) con la que cuenta la mayoría de estas empresas.

Elaboración de queso de suero

La forma más tradicional en que la industria quesera aprovecha el lactosuero es mediante la producción de queso de suero, siendo el requesón el más conocido en México. El proceso de elaboración involucra la desnaturalización térmica de la fracción proteica (mayoritariamente β -LG, α -LA). Los diferentes tipos de que-



■ Figura 1. Opciones de procesamiento del lactosuero de quesería artesanal para su valorización.

Figure 1. Processing options for artisanal cheese whey to add value.

so de suero presentan algunas variantes en su elaboración y pueden incluir la adición de ácidos orgánicos, crema, leche entera o leche en polvo durante su manufactura (Pintado y col., 2001). El queso ricotta es originario de Italia y su variante en México y Latinoamérica se conoce como requesón. Sin embargo, en otras partes del mundo, tales como Rumania y Hungría, este tipo de quesos se conocen como “Urda”, y en Portugal como “Requeijão”, cada uno con sus notas distintivas de sabor y textura, las cuales se encuentran asociadas a su proceso de elaboración. Su demanda y producción se ha extendido a países como Estados Unidos y Canadá, donde generalmente son comercializados como queso ricotta (Pizzillo y col., 2005). En Grecia, los quesos “Myzithra”, “Manouri” y “Anthotiro”, son altamente valorados por las características de sabor que poseen, ya que se elaboran con lactosuero proveniente de la fabricación de quesos de leche de cabra y oveja o mezclas de estas (Alichanidis y Polychroniadou, 2008; Pappa y col., 2016). Otras variantes de quesos elaborados con lactosuero son los quesos noruegos “mysost” y “geitost”, los cuales se caracterizan por presentar un sabor dulce y acaramelado, debido al proceso de condensación del lactosuero, que se realiza durante su elaboración (Królczyk y col., 2016).

El requesón producido en México es un producto fresco, que posee una consistencia granular, habitualmente de textura blanda cremosa y sabor semidulce (Villarruel-López y col., 2016). El requesón tradicional generalmente se elabora mediante procesos no estandarizados, con rendimientos que oscilan de 4.7 % a 6.5 % p/v (1 kg de requesón por 20 L de suero) o mayor si se utilizan mezclas de suero: leche (8:2 v/v) (Ramírez-Rivas y Chávez-Martínez, 2017).

El requesón artesanal, tiene alta demanda a nivel nacional e internacional, por lo que existe un nicho de mercado atractivo para que las queserías artesanales consideren aprovechar el lactosuero en la producción de este producto, ya que la infraestructura requeri-

da en su elaboración es mínima. La elaboración de productos, como el requesón, coadyuvaría en gran medida a reducir pérdidas de componentes nutricional, biológico y funcionalmente valiosos, como las proteínas del lactosuero.

Bebidas lácteas a partir de lactosuero

La industria de bebidas en México tiene un valor de 11 700 millones de dólares, según datos de la Secretaría de Economía (SE, 2014), y de acuerdo con la Asociación Nacional de Productores de Refrescos y Aguas Carbonatadas (ANPRAC, 2014), las bebidas alcohólicas y carbonatadas son las de mayor demanda, con un crecimiento anual del 7.9 % y 5.1 %, respectivamente. El incremento en la preferencia del consumidor, por bebidas más naturales y saludables, ha permitido una evolución y diversificación del mercado hacia un nuevo grupo de bebidas funcionales, con efectos benéficos a la salud. El aprovechamiento del lactosuero, en la formulación en este tipo de bebidas, obedece tanto a la necesidad de reincorporar los componentes nutricionales y funcionales de este subproducto a la dieta humana, así como aprovechar la versatilidad funcional de sus componentes.

Bebidas de lactosuero con fruta

Las bebidas de lactosuero entero se elaboran mediante la pasteurización de suero fresco, degasificado, y adecuaciones en el color, sabor y aroma, para su embotellado. En algunas ocasiones se contempla la adición de sal, dióxido de carbono y concentrados de frutas. Las principales frutas utilizadas para la formulación de estas bebidas han sido jugos de cítricos (e.g. naranja, limón) (Sady y col., 2013). Además, los néctares de frutas como mango, fruta de la pasión (maracuyá), melón, plátano, pera, manzana, y frutillas de grosella, arándano, fresa, frambuesa, moras y saborizantes artificiales (vainilla, cocoa, chocolate y menta) también se han utilizado (Djurić y col., 2004; Naik y col., 2009). La mezcla del lactosuero líquido, con diferentes jugos de frutas, resulta muy atractiva desde el punto de vista organoléptico, nutricional y funcional. La presencia de

antioxidantes naturales (e.g. polifenoles, ácido hidroxycinámico, flavonas, pro-antocianidinas) incrementan la vida de anaquel de las bebidas y aportan un efecto benéfico a la salud (Grazyna y col., 2014; Baba y col., 2016). El aprovechamiento de frutos de temporada, en la producción de este tipo de bebidas, representa una opción muy conveniente para los pequeños productores de quesos artesanales, ya que el procesamiento es mínimo y la inversión en maquinaria baja.

Bebidas de lactosuero fermentado

Los productos lácteos (e.g. queso, suero, yogurt y leches fermentadas) proporcionan grandes beneficios a la salud intestinal, ya que son fuentes importantes de probióticos y tienen la capacidad de producir o liberar compuestos bioactivos, con propiedades antihipertensivas, inmunomoduladoras, anticarcinogénicas e hipocolesterolémicas, lo que ha resaltado su valor, por su potencial para el tratamiento de enfermedades crónico degenerativas, como la hipertensión, cáncer y obesidad (Santiago-López y col., 2015; Beltrán-Barrientos y col., 2016). El lactosuero puede ser sometido a un proceso de fermentación, ya sea mediante el aprovechamiento de la flora nativa o incorporando cultivos iniciadores de cepas específicas, como *Lactobacillus acidophilus*, *Bifidobacterium* spp, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus*. Los granos de kéfir (consorcio de bacterias lácticas, acéticas y complejo de levaduras), se han utilizado exitosamente para preparar bebidas fermentadas a base de lactosuero. El uso de dichos consorcios microbianos resulta ser más atractivo que el uso de inóculos específicos, ya que genera perfiles de aromas y sabores más complejos. Además, durante la fermentación del lactosuero se producen azúcares y exopolisacáridos, que contribuyen a la textura del producto, así como compuestos con actividad biológica-funcional (Teixeira y col., 2010; Londero y col., 2015). La fermentación del lactosuero (adicionado con azúcares) con cepas de levaduras, también puede elevar ligeramente su grado alcohólico, así como un efecto es-

pumoso, de una bebida tipo champagne (Hernandez-Mendoza y col., 2007).

Bebidas alcohólicas de lactosuero

Este grupo de bebidas presentan diferencias marcadas en su graduación alcohólica, abarcando aquellas con un bajo contenido (1 %) y las bebidas tipo cerveza o vino, que pueden contener hasta 11 % de alcohol (Kosikowski y Wzorek, 1977). El proceso de manufactura consiste en concentrar lactosuero desproteínizado y adicionarle azúcares fermentables. Algunos procesos involucran una combinación de fermentaciones lácticas-alcohólicas. La fermentación láctica se realiza con cultivos iniciadores, como granos de kéfir o cultivos de yogurth (incluyen levadura con capacidad de fermentar lactosa), mientras que para la fermentación alcohólica se utilizan cepas de *Saccharomyces cerevisiae*. La producción de bebidas tipo cerveza resulta ser muy atractiva, ya que el lactosuero contiene coloides con características similares a las encontradas en cerveza, especialmente para ligar ácido carbónico. El lactosuero se puede emplear hasta en un 50 % para sustituir mosto de malta, comúnmente usado para la producción de cerveza, obteniéndose una bebida con excelente calidad sensorial, nutricional y similar graduación alcohólica (Nayeem y col., 2015).

Por otro lado, con el lactosuero entero o desproteínizado, también se pueden preparar vinos con notas frutales, mediante la adición de néctares de frutas. El tratamiento enzimático con lactasa (β -galactosidasa) incrementa el contenido de glucosa y galactosa, utilizables por cepas de levadura productoras de alcohol (Gawel y Kosikowski, 1978).

Cervezas artesanales

En México, la producción de cervezas artesanales ha mostrado un crecimiento sostenido los últimos 6 años (Deloitte, 2017). La innovación cervecera artesanal se basa en proponer el empleo de diversos ingredientes, con sabores nuevos y distintos. El potencial del lactosuero en la producción de cerveza ha si-

do considerado en otros países. Recientemente, Arla Foods® desarrolló una línea de cerveza, comercializada bajo la marca Blue Brew®, que reincorpora el lactosuero proveniente del queso artesanal Stilton, variedad azul. La cerveza contiene 4.2 % de graduación alcohólica y presenta exquisitas notas lácteas en su sabor y textura cremosa (Arla Foods, 2018). No obstante, el uso del lactosuero en la producción de cervezas requiere de ciertas adecuaciones, como el uso de especies de levadura diferentes a *S. Cerevisae*, las cuales, deben tener la capacidad de utilizar lactosa, tales como *Kluyveromyces lactis* y *Kluyveromyces marxianus* (Rubio-Teixeira, 2006). Además, la levadura debe ser capaz de producir perfiles de sabor y aroma (utilizando los componentes del suero), similar al que se obtiene en el proceso cervecero convencional (Kobayashi y col., 2008; Dragone y col., 2009).

Bebidas para deportistas a partir de lactosuero

Este tipo de bebidas se encuentra en constante crecimiento y se elaboran a partir de lactosuero parcial o totalmente desproteinizado, adicionadas con minerales, principalmente sodio (20 mmol/L a 30 mmol/L) y potasio (5 mmol/L), y una mezcla de carbohidratos simples (80 g/L), usualmente glucosa, fructosa y sacarosa (Valadao y col., 2016). El lactosuero generado de la obtención del queso Ricotta (Valadao y col., 2016), el permeado de la ultrafiltración de leche (Manninen, 2009), aislados de proteínas (WPI, por sus siglas en inglés: Whey Protein Isolate), concentrados de proteínas de suero (WPC-80, por sus siglas en inglés: Whey Protein Concentrate) e hidrolizados, se han utilizado para preparar estas bebidas (Chavan y col., 2015). Las proteínas de lactosuero ejercen efectos fisiológicos y nutricionales, importantes en los deportistas, aumentando significativamente su desarrollo muscular en atletas bajo rutinas de alta resistencia (Beelen y col., 2008). Estos efectos fisiológicos se han atribuido al contenido de aminoácidos esenciales presentes en las proteínas lácteas, y el alto contenido de aminoácidos ramificados en las pro-

teínas del lactosuero, cuya biodisponibilidad aumenta con el proceso de hidrólisis, mejorando la síntesis proteica en atletas y rápida recuperación después de un ejercicio exhaustivo (Volpi y col., 2003). Además, los hidrolizados con propiedades bioactivas, o fisiológica-funcionales, pueden mejorar la salud de los deportistas (Yadav y col., 2015).

Recuperación de crema y mantequilla

El contenido de grasa en el lactosuero depende del proceso y tipo de queso elaborado. La mantequilla de suero presenta un mayor contenido en ácidos grasos insaturados y componentes bioactivos valiosos (e.g. esfingomielina y mucinas), que la mantequilla dulce elaborada con crema (Jinjarak y col., 2006). La mantequilla de suero posee propiedades emulsificantes y sensoriales atractivas para la industria de la panificación, producción de pastas y salsas. La mantequilla de suero se puede reincorporar al proceso durante la elaboración de quesos de textura suave, untables o tipo crema (Cruz y col., 2009). El suero remanente (suero de mantequilla) se puede aprovechar para elaborar productos fermentados, con cepas específicas de bacterias ácido lácticas. Fermentos que pueden ser utilizados como ingrediente funcional para potenciar el sabor, aroma y calidad nutricia de algunos quesos (Hickey y col., 2018).

Reincorporación del lactosuero al proceso de elaboración de queso

Las proteínas de suero pueden ser reincorporadas al proceso de quesería, tanto en su forma nativa, aislados proteicos o como proteína desnaturalizada, en forma de agregados o microparticulados proteicos. Con esto, el rendimiento quesero se ve incrementado entre 12 % y 15 %, asociado a una mayor retención de proteínas séricas, lactosa y agua en la matriz caseica (Hinrichs, 2001). Los quesos enriquecidos con proteína sérica presentan buena calidad, no obstante, es necesario considerar la máxima cantidad de proteína sérica que puede incorporarse para no afectar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de los quesos (Giroux y col., 2018).

Usos del lactosuero en la preparación de base para helados, paletas y nieves

La tendencia en la producción y consumo de productos helados y nieve es hacia productos con un menor contenido de grasa (ingredientes hipocalóricos). Sin embargo, el componente graso juega un papel clave para el desarrollo de la textura, sabor y perfil de aroma, deseables en helados y nieves (Roland y col., 1999). La incorporación de lactosuero en forma de polvo, concentrados y aislados proteicos, así como microparticulados de proteínas, han sido adecuados para sustituir la grasa en estos productos (Krzeminski y col., 2013; Torres y col., 2018). El lactosuero fresco ha sido utilizado con éxito en la elaboración de helados saborizados o con frutas (Yilsay y col., 2006). El suero en polvo podría sustituir insumos de alto costo, como la leche en polvo, mientras que en estado líquido o pre-concentrado, también puede ser utilizado en la fabricación de paletas, fórmulas lácteas, así como en la elaboración de base para helados (mixturas) (Cohene y col., 2016; Gajo y col., 2017).

Usos del lactosuero en panadería y confitería

El suero de quesería puede ser utilizado en la elaboración de productos de panadería y confitados, debido a la funcionalidad de sus componentes. Tanto el lactosuero crudo, como sus preparaciones, en forma de concentrados, aislados y permeado, pueden ser usados para remplazar total o parcialmente ingredientes como el huevo, leche en polvo, mantequilla y sacarosa (Królczyk y col., 2016). Además, el lactosuero se utiliza ampliamente para conseguir características deseables en color, sa-

bor y consistencia en cobertura de helados, jarabes de chocolate, dulce de leche y tofu, así como elevar el valor nutricional de productos horneados, tales como biscochos, galletas, *muflins*, y bollos (Munaza y col., 2012; Hartel y col., 2018). El lactosuero en polvo, líquido o pre-concentrado, también se puede usar en la fabricación de dulces o postres de leche (Cohene y col., 2016; Gajo y col., 2017).

CONCLUSIONES

El lactosuero, generado por la industria quesera artesanal, ofrece un gran potencial para el desarrollo de productos con alto valor agregado. El aprovechamiento de las propiedades funcionales, nutritivas y bioactivas de los componentes del lactosuero, en la elaboración de productos, tales como, requesón, mantequilla, dulces y bebidas, ofrece opciones tecnológicas adecuadas para la industria quesera de baja tecnificación. Su utilización como materia prima en la obtención de co-productos, mediante el uso de la infraestructura disponible, es una alternativa viable para agregar valor al lactosuero e incrementar la rentabilidad económica de estas pequeñas y medianas empresas, optimizando el aprovechamiento integral de sus recursos con un enfoque sustentable.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por el apoyo otorgado al Proyecto de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales, PDCPN 2014-1, No. 248100.

REFERENCIAS

- Alichanidis, E. and Polychroniadou, A. (2008). Characteristics of major traditional regional cheese varieties of East-Mediterranean countries: A review. *Dairy Science & Technology*. 88(4-5): 495-510.
- ANPRAC, Asociación Nacional de Productores de Refrescos y Aguas Carbonatadas (2014). La industria refresquera mexicana. [En línea]. Disponible en: <http://anprac.org.mx/industria-refresquera-incrementa-3-8-susventas-en-2016/>. Fecha de consulta: 15 de marzo de 2018.
- Arla Foods (2018). The whey to brew beer. [En línea]. Disponible en: <https://www.arlafoods.co.uk/overview/news--press/2016/pressrelease/the-wheyto-brew-beer-1664507/>. Fecha de consulta: 20 de marzo de 2018.
- Baba, W. N., Din, S., Punoo, H. A., Wani, T. A., Ahmad M., and Masoodi, F. A. (2016). Comparison of cheese and paneer whey for production of a functional pineapple beverage: Nutraceutical properties and shelf life. *Journal of Food Science and Technology*. 53(6): 2558-2568.

- Barile, D., Tao, N., Lebrilla, C. B., Coisson, J. D., Arlorio, M., and German, J. B. (2009). Permeate from cheese whey ultra-filtration is a source of milk oligosaccharides. *International Dairy Journal*. 19(9): 524-530.
- Beelen, M., Koopman, R., Gijzen, A. P., Vandereyt, H., Kies, A. K., Kuipers, H., ..., and van-Loon, L. J. (2008). Protein coingestion stimulates muscle protein synthesis during resistance-type exercise. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*. 295(1): 70-77.
- Beltrán-Barrientos, L. M., Hernández-Mendoza, A., Torres-Llanez, M. J., González-Córdova, A. F., and Vallejo-Córdova, B. (2016). Fermented milk as antihypertensive functional food. *Journal of Dairy Science*. 99(6): 4099-4110.
- Benjamin, S., Prakasan, P., Sreedharan, S., Wright, A. D. G., and Spener, F. (2015). Pros and cons of CLA consumption: An insight from clinical evidences. *Nutrition & Metabolism*. 12(1):4.
- Castañeda-Martínez, T., Boucher, F., Sánchez-Vera, E., and Espinoza-Ortega, A. (2009). La concentración de agroindustrias rurales de producción de quesos en el noroeste del Estado de México: un estudio de caracterización. *Estudios sociales*. 17(34): 73-109.
- Chatterton, D. E. W., Smithers, G., Roupas, P., and Brodtkorb, A. (2006). Bioactivity of lactoglobulin and α -lactalbumin-Technological implications for processing *International Dairy Journal*. 16(11): 1229-1240.
- Chavan, R., Shraddha, R., Kumar, A., and Nalawade, T. (2015). Whey based beverage: its functionality, formulations, health benefits and applications. *Journal of Food Processing & Technology*. 6(10): 1-8.
- Cohene, M., Sandoval, A., Dinatale, F. y Sarubbi, A. (2016). Estudio comparativo de la composición fisico-química y organoléptica del dulce de leche de elaboración artesanal utilizando leche y suero dulce de quesería en una proporción 70/30, con y sin hidrolizado de la mezcla. *Compendio de Ciencias Veterinarias*. 6(1): 17-23.
- Contarini, G. and Povolo, M. (2013). Phospholipids in milk fat: composition, biological and technological significance, and analytical strategies. *International Journal of Molecular Sciences*. 14(2): 2808-2831.
- Cruz, A. G., Sant'Ana, A. d. S., Macchione, M. M., Teixeira, Â. M., and Schmidt, F. L. (2009). Milk drink using whey butter cheese (queijo manteiga) and acerola juice as a potential source of vitamin C. *Food and Bioprocess Technology*. 2(4): 368-373.
- Delavari, B., Saboury, A. A., Atri, M. S., Ghasemi, A., Bigdeli, B., Khammari, A., ..., and Goliaei, B. (2015). Alpha-lactalbumin: A new carrier for vitamin D3 food enrichment. *Food Hydrocolloids*. 45: 124-131.
- Deloitte (2017). La Cerveza Artesanal, una experiencia multisensorial. [En línea]. Disponible en: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/mx/Documents/consumer-business/2017/Cerveza-Artesanal-Mexico-2017.pdf> Fecha de consulta: 9 de abril de 2019.
- Djurić, M., Carić, M., Milanović, S., Tekić, M., and Pantić, M. (2004). Development of wheybased beverages. *European Food Research and Technology*. 219(4): 321-328.
- Dragone, G., Mussatto, S. I., Oliveira, J. M., and Teixeira, J. A. (2009). Characterisation of volatile compounds in an alcoholic beverage produced by whey fermentation. *Food Chemistry*. 112(4): 929-935.
- Dullius, A., Goettert, M. I., and de-Souza C. F. V. (2018). Whey protein hydrolysates as a source of bioactive peptides for functional foods- Biotechnological facilitation of industrial scale-up. *Journal of Functional Foods*. 42: 58-74.
- Elías-Argote, X., Laubscher, A., and Jiménez-Flores, R. (2013). Dairy ingredients containing milk fat globule membrane: description, composition, and industrial potential. *In Advances in Dairy Ingredients*. 71-98.
- Fischer, C. and Kleinschmidt, T. (2015). Synthesis of galactooligosaccharides using sweet and acid whey as a substrate. *International Dairy Journal*. 48: 15-22.
- Forster, R., Bourtourault, M., Chung, Y. J., Silvano, J., Sire, G., Spezia, F., ..., and Mikogami, T. (2014). Safety evaluation of a whey protein fraction containing a concentrated amount of naturally occurring TGF- β 2. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 69(3): 398-407.
- Gajo, A., de-Resende, J., Costa, F., Pereira, C. G., de-Lima, R. R., Antonialli, F., and de Abreu, L. R. (2017). Effect of hydrocolloids blends on frozen dessert "popsicles" made with whey concentrated. *LWT - Food Science and Technology*. 75: 473-480.
- Gauthier, S. F., Pouliot, Y., and Saint-Sauveur, D. (2006). Immunomodulatory peptides obtained by the enzymatic hydrolysis of whey proteins. *International Dairy Journal*. 16(11): 1315-1323.
- Gawel, J. and Kosikowski, F. V. (1978). Application of acid lactase to wine making from Cottage cheese whey concentrates. *Journal of Food Science*. 43(3): 1031-1032.
- Giroux, H., Veillette, N., and Britten, M. (2018). Use of denatured whey protein in the production of artisanal cheeses from cow, goat and sheep milk. *Small Ruminant Research*. 161: 34-42.
- González-Córdova, A. F., Yescas, C., Ortiz-Estrada, Á. M., De-la-Rosa-Alcaraz, M. d. l. Á., Hernández-Mendoza, A., and Vallejo-Cordoba, B. (2016). Invited review: Artisanal Mexican cheeses. *Journal of Dairy Science*. 99(5): 3250-3262.

- Grazyna, J., Grega, T., Sady, M., Bernaś, E., and Pogoń, K. (2014). Quality of apple-whey and apple beverages over 12-month storage period. *Journal of Food & Nutrition Research*. 53(2): 117-126.
- Hartel, R. W., von-Elbe, J. H., and Hofberger, R. (2018). Caramel, fudge and toffee. *Confectionery science and Technology*. Springer International Publishing. 273 Pp.
- Hernández-Ledesma, B., Ramos, M., and Gómez-Ruiz, J. Á. (2011). Bioactive components of ovine and caprine cheese whey. *Small Ruminant Research*. 101(1-3): 196-204.
- Hernandez-Mendoza, A., Robles, V. J., Angulo, J. O., De-La-Cruz, J., and Garcia, H. S. (2007). Preparation of a whey-based probiotic product with *Lactobacillus reuteri* and *Bifidobacterium bifidum*. *Food Technology and Biotechnology*. 45(1): 27-31.
- Hickey, C. D., O'Sullivan, M. G., Davis, J., Scholz, D., Kilcawley, K. N., Wilkinson, M. G., and Sheehan, J. J. (2018). The effect of buttermilk or buttermilk powder addition on functionality, textural, sensory and volatile characteristics of Cheddar-style cheese. *Food Research International*. 103: 468-477.
- Hinrichs, J. (2001). Incorporation of whey proteins in cheese. *International Dairy Journal*. 11(4): 495-503.
- Hoffman, J. R. and Falvo, M. J. (2004). Protein-Which is best. *Journal of Sports Science and Medicine*. 3(3): 118-130.
- Jiménez-Flores, R. and Brisson, G. (2008). The milk fat globule membrane as an ingredient: why, how, when? *Dairy Science & Technology*. 88(1): 5-18.
- Jinjarak, S., Olabi, A., Jiménez-Flores, R., and Walker, J. (2006). Sensory, functional, and analytical comparisons of whey butter with other butters. *Journal of Dairy Science*. 89(7): 2428-2440.
- Kobayashi, M., Shimizu, H., and Shioya, S. (2008). Beer volatile compounds and their application to low-malt beer fermentation. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 106(4): 317-323.
- Kosikowski, F. V. and Wzorek, W. (1977). Whey wine from concentrates of reconstituted acid whey powder. *Journal of Dairy Science*. 60(12): 1982-1986.
- Królczyk, J. B., Dawidziuk, T., Janiszewska-Turak, E., and Sołowiej, B. (2016). Use of whey and whey preparations in the food industry: A review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 66(3): 157-165.
- Krzeminski, A., Tomaschunas, M., Köhn, E., Busch-Stockfisch, M., Weiss, J., and Hinrichs J. (2013). Relating creamy perception of whey protein enriched yogurt systems to instrumental data by means of multivariate data analysis. *Journal of Food Science*. 78(2): S314-S319.
- Londero, A., Iraporda, C., Garrote, G. L., and Abraham, A. G. (2015). Cheese whey fermented with kefir micro-organisms: Antagonism against salmonella and immunomodulatory capacity. *International Journal of Dairy Technology*. 68(1): 118-126.
- Manninen, A. (2009). Protein hydrolysates in sports nutrition. *Nutrition & Metabolism*. 6(38): 1-5.
- Mehra, R., Marnila, P., and Korhonen, H. (2006). Milk immunoglobulins for health promotion. *International Dairy Journal*. 16(11): 1262-1271.
- Mollea, C., Marmo L., and Bosco, F. (2013). Valorisation of cheese whey, a by-product from the dairy industry, in food industry. InTech. [En línea]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/food-industry/valorisation-of-cheese-whey-a-by-product-from-the-dairy-industry>. Fecha de consulta: 18 de marzo de 2018.
- Munaza, B., Prasad, S., and Gayas, B. (2012). Whey protein concentrate enriched biscuits. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2(8): 1-4.
- Naik, Y., Khare, A., Choudhary, P., Goel, B., and Shrivastava A. (2009). Studies on physico-chemical and sensory characteristics of whey based watermelon beverage. *Asian Journal of Research in Chemistry*. 2(1): 57-59.
- Nath, A., Verasztó, B., Basak, S., Koris, A., Kovacs, A., and Vatai, G. (2016). Synthesis of lactose-derived nutraceuticals from dairy waste whey—A review. *Food and Bioprocess Technology*. 9(1): 16-48.
- Nayeem, M., Singh, A., Broadway A. A., and Singh, M. (2015). Technology for manufacturing of whey beer by incorporating malt wort. *The Allahabad Farmer*. 71(1): 34-37.
- Pappa, E. C., Samelis, J., Kondyli, E., and Pappas, A. C. (2016). Characterisation of Urda whey cheese: Evolution of main biochemical and microbiological parameters during ripening and vacuum packaged cold storage. *International Dairy Journal*. 58: 54-57.
- Pintado, M., Macedo, A., and Malcata, F. (2001). Review: Technology, chemistry and microbiology of whey cheeses. *Food Science and Technology International*. 7(2): 105-116.
- Pizzillo, M., Claps, S., Cifuni, G. F., Fedele V., and Rubino, R. (2005). Effect of goat breed on the sensory, chemical and nutritional characteristics of ricotta cheese. *Livestock Production Science*. 94(1-2): 33-40.
- Ramírez-Rivas, I. K. y Chávez-Martínez, A. (2017). Efecto del ultrasonido aplicado al suero de leche previo al calentamiento en la elaboración de requesón. *Interciencia*. 42(12): 828-833.
- Rammer, P., Groth-Pedersen, L., Kirkegaard, T., Dagaard, M., Rytter, A., Szyniarowski, P., ..., and Jäätelä, M. (2010). BAMLET activates a lysosomal cell death program in cancer cells. *Molecular Cancer Therapeutics*. 9(1): 24-32.

- Roland, A. M., Phillips, L. G., and Boor, K. J. (1999). Effects of fat content on the sensory properties, melting, color, and hardness of ice cream. *Journal of Dairy Science*. 82(1): 32-38.
- Rubio-Teixeira, M. (2006). Endless versatility in the biotechnological applications of *Kluyveromyces* LAC genes. *Biotechnology Advances*. 24(2): 212-225.
- Sady, M., Jaworska, G., Grega, T., Bernas, E., and Domagala, J. (2013). Application of acid whey in orange drink production. *Food Technology and Biotechnology*. 51(2): 266-277.
- Salcedo, J., Lacomba, R., Alegría, A., Barbera, R., Matencio, E., and Lagarda, M. J. (2011). Comparison of spectrophotometric and HPLC methods for determining sialic acid in infant formulas. *Food Chemistry*. 127(4): 1905-1910.
- Santiago-López, L., Hernández-Mendoza, A., Garcia, H. S., Mata-Haro, V., Mata-Haro, V., Vallejo-Cordoba B., and Gonzalez-Cordova, A. F. (2015). The effects of consuming probiotic-fermented milk on the immune system: A review of scientific evidence. *International Journal of Dairy Technology*. 68(2): 153-165.
- SE, Secretaría de Economía (2014). *Industria refresquera en México*. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/se/articulos/industria-refresquera-en-mexico>. Fecha de consulta: 15 de marzo de 2018.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2016). *Estadística de producción pecuaria: leche de bovino*. [En línea]. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx/anpecuario_siapx_gobmx/ResumenNacional.do. Fecha de consulta: 10 de marzo de 2018.
- Smithers, G. W. (2008). Whey and whey proteins-From 'gutter-to-gold'. *International Dairy Journal*. 18(7): 695-704.
- Tarango-Hernández, S., Alarcón-Rojo, A. D., Robles-Sánchez, M., Gutiérrez-Méndez, N., and Rodríguez-Figueroa, J. C. (2015). Short communication: Potential of Fresco-style cheese whey as a source of protein fractions with antioxidant and angiotensin-I-converting enzyme inhibitory activities. *Journal of Dairy Science*. 98(11): 7635-7639.
- Teixeira, K., Pereira, M. A., Nicolau, A., Dragone, G., Domingues, L., Teixeira, J. A., ..., and Schwan, R. F. (2010). Production of fermented cheese whey-based beverage using kefir grains as starter culture: Evaluation of morphological and microbial variations. *Bioresource Technology*. 101(22): 8843-8850.
- Thormar, H. and Hilmarsson, H. (2007). The role of microbicidal lipids in host defense against pathogens and their potential as therapeutic agents. *Chemistry and Physics of Lipids*. 150(1): 1-11.
- Torres, I. C., Amigo, J. M., Knudsen, J. C., Tolkach, A., Mikkelsen, B. Ø., and Ipsen, R. (2018). Rheology and microstructure of low-fat yoghurt produced with whey protein microparticles as fat replacer. *International Dairy Journal*. 81: 62-71.
- Valadao, N., Andrade, M., Jory, J., Gallo, F., and Petrus, R. (2016). Development of a Ricotta Cheese Whey-based Sports Drink. *Journal of Advanced Dairy Research*. 4(3): 156-162.
- Villarruel-López, A., Castro-Rosas, J., Gómez-Aldapa, C. A., Nuño, K., Torres-Vitela, M. R., Martínez-González, N. E., and Garay-Martínez, L. E. (2016). Indicator microorganisms, *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcal enterotoxin*, and physicochemical parameters in requesón cheese. *African Journal of Food Science and Technology*. 10(9): 178-184.
- Villegas-de-Gante, A. y Cervantes-Escoto, F. (2011). La genuinidad y tipicidad en la revalorización de los quesos artesanales mexicanos. *Estudios Sociales*. 19(38): 145-164.
- Volpi, E., Kobayashi, H., Sheffield-Moore, M., Mitten-dorfer, B., and Wolfe, R. R. (2003). Essential amino acids are primarily responsible for the amino acid stimulation of muscle protein anabolism in healthy elderly adults. *The American journal of clinical nutrition*. 78(2): 250-258.
- Wang, Y. (2009). Prebiotics: Present and future in food science and technology. *Food Research International*. 42(1): 8-12.
- Wong, N. P., LaCroix, D. E., and McDonough, F. E. (1978). Minerals in whey and whey fractions. *Journal of Dairy Science*. 61(12): 1700-1703.
- Yadav, J. S. S., Yan, S., Pilli, S., Kumar, L., Tyagi, R. D., and Surampalli, R. Y. (2015). Cheese whey: Apotential resource to transform into bioprotein, functional/nutritional proteins and bioactive peptides. *Biotechnology Advances*. 33(6): 756-774.
- Yilsay, T. Ö., Yilma L., and Bayizit, A. A. (2006). The effect of using a whey protein fat replacer on textural and sensory characteristics of low-fat vanilla ice cream. *European Food Research and Technology*. 2 22(1-2): 171-175.



Imagen de: Julio César Ríos Saucedo

Supervivencia y características de rebrotes en tocones de dos años de cultivos dendroenergéticos

Survival rates and characteristics of spreads in two years stumps of crops with dendroenergy potential

Julio César Ríos-Saucedo¹, Eduardo Acuña-Carmona², Luis Manuel Valenzuela-Núñez^{3*}, Jorge Cancino-Cancino², José Javier Corral-Rivas⁴, Rigoberto Rosales-Serna¹

RESUMEN

Varias especies de los géneros *Eucalyptus* y *Acacia* son adecuadas para la producción de biomasa útil en la generación de energía. El objetivo del presente estudio fue evaluar la supervivencia y características del rebrote en tocones de cuatro especies dendroenergéticas en tres diferentes densidades poblacionales. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, en tres sitios (Parcelas Collipulli, La Aguada y Pilpilco Abajo) con características edafoclimáticas contrastantes. Se estudió *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus denticulata*, *Eucalyptus nitens* y *Acacia dealbata* en tres densidades de plantación (5 000 árboles/ha; 10 000 árboles/ha y 15 000 árboles/ha). Se evaluó el porcentaje de supervivencia y las características del rebrote por tocón. Las variables especie, densidad de plantación y sitio de siembra afectaron los parámetros analizados. La densidad de plantación afectó el diámetro y altura de los rebrotes dominantes de tipo proventicio en las cuatro especies estudiadas. La mayor tasa de supervivencia de tocones (97 %), la presentó *Eucalyptus nitens* en Pilpilco Abajo, con 79 % de supervivencia de rebrotes a una densidad de 5 000 árboles/ha. Sin embargo, en densidades de 15 000 árboles/ha, la supervivencia de rebrote fue de 29 %. *Acacia dealbata* es una especie reconocida por su capacidad de colonización, sin embargo, en La Aguada, con densidades de siembra de 5 000 árboles/ha y 10 000 árboles/ha, mostró baja tasa de supervivencia de tocones (19 % y 18 %, respectivamente) y de rebrotes (57 % y 63 %, respectivamente). La especie *Eucalyptus globulus* mostró altas tasas de supervivencia de tocones y rebrotes en todos los sitios evaluados, por lo que puede ser considerada como una buena opción para optimizar el sistema de monte bajo.

PALABRAS CLAVE: manejo de monte bajo, cultivos leñosos, bioenergía, sobrevivencia.

ABSTRACT

Several species of the genera *Eucalyptus* and *Acacia* are suitable for biomass production useful in energy generation. The objective of this research was to evaluate the survival and characteristics of regrowth of four dendroenergetic species in three population densities. A randomized block design with three replications was used in three sites (Collipulli, La Aguada and Pilpilco Abajo plots) with contrasting edaphoclimatic characteristics. *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus denticulata*, *Eucalyptus nitens* and *Acacia dealbata* were studied in three plantation densities (5 000 trees/ha, 10 000 trees/ha and 15 000 trees/ha). The survival percentage and characteristics of stump regrowth characteristics of each stump were evaluated. The variables species, plantation density and planting site affected the analyzed parameters. Plantation density affected the diameter and height of prevalent sprouts of proventitious shoots in all species. Highest stump survival rate (97 %) was presented by *Eucalyptus nitens* in Pilpilco Abajo, with 79 % shoots survival of sprouts at a density of 5 000 trees/ha. However, at densities of 15 000 trees/ha, regrowth survival was 29%. The *Acacia dealbata* is a species characterized by its colonization capacity. However, at La Aguada, which had population densities of 5 000 trees/ha and 10 000 trees/ha, it showed a low stump (19% and 18 % respectively) and shoots (57 % and 63 % respectively) survival rate. The species *Eucalyptus globulus* showed high stump and shoot survival rates in all sites evaluated, therefore it can be considered a good option to optimize the scrub system.

KEYWORDS: management of coppice, woody crops, bioenergy, survival.

*Correspondencia: luisvn70@hotmail.com/ Fecha de recepción: 18 de abril de 2018/ Fecha de aceptación: 16 de junio de 2019/ Fecha de publicación: 29 de julio de 2019

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) Campo Experimental Valle del Guadiana. ²Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales. ³Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Biológicas, av. Universidad s/n fracc. Filadelfia, Gómez Palacio, Durango, México, C. P. 35010. ⁴Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Ciudad Universitaria.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se buscan fuentes alternativas y renovables para la generación de energía eléctrica, con el fin de asegurar la sustentabilidad. Durante los últimos años, se incrementó el interés en la generación de energía a partir de la biomasa obtenida de diferentes especies vegetales (McKendry, 2002; Ramos-Llorente, 2013; Patiño-Martínez, 2014). Se ha considerado que las plantaciones de eucalipto pueden convertirse en un componente de importancia para la producción de biomasa útil en la generación de energía (Turnbull, 1999; Oliveira y col., 2014; Ferreira y col., 2017). El eucalipto es un árbol apreciado en el establecimiento de plantaciones forestales por su alta tasa de supervivencia, fácil regeneración y rápido crecimiento (García y Ruiz, 2003; Alonso y col., 2008; Catry y col., 2013; Moxham y col., 2018). También se incluye entre las plantas arbóreas de mayor importancia mundial para la producción de madera (Ruiz y Lopez, 2010; Farinaci y col., 2013; Quartucci y col., 2015).

Recientemente, se estimó una superficie mundial de 20.1 millones de hectáreas destinadas a plantaciones comerciales (Domingues y col., 2011). En zonas templadas de Australia y Chile, las especies del género *Eucalyptus*, principalmente *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* son preferidas en las plantaciones comerciales (Domingues y col., 2011; White y col., 2016). Otra especie de eucalipto con importancia económica es *Eucalyptus denticulata*, la cual, muestra similitud con *Eucalyptus nitens* para algunas características comerciales (Hamilton y col., 2011). Se ha demostrado que es posible obtener tasas altas de producción de biomasa en las plantaciones de estas especies con prácticas de silvicultura intensiva (Binkley y Stape, 2004).

En Chile, existe interés en el establecimiento de plantaciones de eucalipto para la producción de biomasa con fines energéticos (Geldres y col., 2004). La superficie establecida con plantaciones de eucalipto alcanza 0.7 millones de ha destinadas principalmente a la

producción de madera y pulpa (Barros, 2013). La producción de biomasa en dendroenergía es la manera de generar energía eléctrica a partir de material lignocelulósico pelletizado, y esto se logra mediante cultivos dendroenergéticos establecidos en altas densidades, y por ende, el costo inicial es elevado. El estudio de rebrotes en este tipo de prácticas es fundamental para evitar los costos de replantación, e incrementar la producción de biomasa y aprovechar hasta por 5 turnos de corta.

El sistema de manejo de las plantaciones cuenta con poca investigación en la respuesta y el manejo al rebrote. El manejo de rebrotes es una técnica para producir biomasa después del primer ciclo de corta, evitando los costos de replantación (Sixto y col., 2008). Se ha demostrado que, en un periodo menor de 15 años, un rodal en rebrote produce el doble del volumen maderable comparado con uno establecido mediante regeneración sexual (Silva y col., 2011).

Para el manejo del monte bajo (rebrotes), se han generado recomendaciones, como dejar entre uno y tres rebrotes por tocón preferentemente de tipo proventicios (Geldres y col., 2004; Rodríguez y col., 2013).

Algunas especies del género *Acacia* también han mostrado potencial para la producción de biomasa, pero se recomienda un manejo cuidadoso, porque debido a su gran capacidad de colonización, son consideradas como plantas invasivas. En Chile, la especie *Acacia dealbata* se introdujo como planta ornamental y se dispersó en hábitats ribereños, en sitios con escombros y perturbados (Fuentes y col., 2011). En la actualidad, en este país la especie tiene escasa utilidad para la producción de biomasa dendroenergética, aunque muestra alta eficiencia biológica y productiva (Ferreira y col., 2014). Por lo tanto, se requiere de estudios para la identificación de especies de rápido crecimiento y eficiencia productiva; así como valores altos de supervivencia en rebrotes, para optimizar la pro-

ducción de biomasa en cultivos de corta rotación, bajo un sistema de monte bajo.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la supervivencia y características del rebrote en tocones de dos años de cuatro especies establecidas como cultivos dendroenergéticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

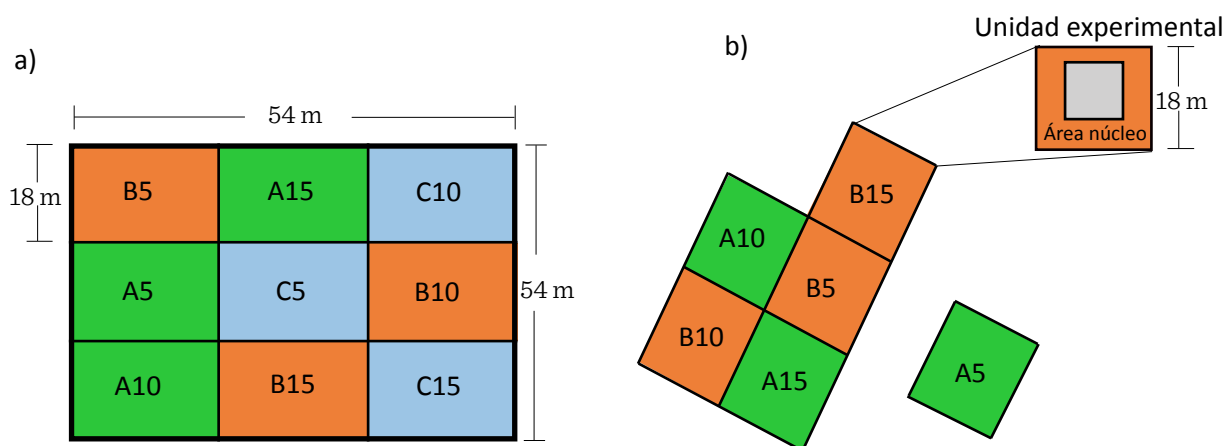
Localización del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en agosto de 2010, en tres sitios con características edafoclimáticas contrastantes, i.e. Parcelas Collipulli: 38° 07'18.47" S 72°06'39.35" W, La Aguada 37°11' 53.42" S, 72°25'53.42" W y Pilpilco Abajo 37° 34'04.43" S 73°23'47.65" W. El sitio Parcelas Collipulli está ubicado en la IX región de Chile, en la comuna de Collipulli, posee suelos del tipo cenizas volcánicas recientes (trumaos), de textura franco-limosa; la temperatura mínima en invierno es de 4.1 °C y máxima en verano de 25.7 °C, con una precipitación media anual de 1 354. El sitio La Aguada pertenece a la comuna de Yumbel, presenta suelos arenales, derivados de arenas volcánicas, de textura franco-arenosa, con temperaturas que varían entre 4.4 °C (min) y 28.6 °C (max), con una precipitación media

anual de 1 093 mm. Pilpilco Abajo se encuentra en la comuna de Curanilahue; posee suelos profundos que se formaron sobre sedimentos marinos, de textura franco-arcillosa, con una temperatura mínima de 6.0 °C y máxima de 23.2 °C, registrando una precipitación media anual de 1 437 mm, ambos sitios pertenecientes a la VIII región (Novoa y col., 1989).

Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Para los sitios Parcelas Collipulli y La Aguada, cada bloque fue un cuadrado de 54 m por lado con 9 unidades experimentales de 18 m por lado cada una (324 m²). Cada unidad, a su vez, consistió en una zona de amortiguamiento del efecto de borde y un núcleo cuadrado con 30 árboles útiles. En Pilpilco Abajo, dada la complejidad fisiográfica del terreno, se ubicaron 6 unidades experimentales por bloque. En los tres sitios, para evaluar el rebrote, todas las especies arbóreas establecidas se manejaron bajo una frecuencia de corte, en el segundo año de edad (Figura 1). Se plantó un número variable de especies por sitio, tres en Parcelas Collipulli (*Acacia dealbata*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*) y La Aguada (*Acacia deal-*



■ Figura 1. Distribución y diseño de las unidades experimentales en los ensayos: a) Parcelas Collipulli y La Aguada, b) Pilpilco Abajo. Cada letra (A, B y C) y color representan la especie y los números (5, 10 y 15) la densidad de plantación.

Figure 1. Distribution and design of the experimental units in the trials: a) Collipulli and La Aguada plots, b) Pilpilco Abajo. Each letter (A, B and C) and color represents the species, and the numbers (5, 10 and 15) represent planting density.

bata, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus denticulata*), y dos en Pilpilco Abajo (*Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*), con tres densidades de plantación (5 000 árboles/ha; 10 000 árboles/ha y 15 000 árboles/ha). La selección de especies fue por interés de las empresas forestales participantes (Forestal Mininco “Yumbel”, MASISA “Pilpilco abajo” y Forestal Arauco “Parcelas Collipulli”), propietarias de las parcelas mencionadas.

Variables evaluadas

Para evaluar la supervivencia de los tocones, se contó el número de tocones rebrotados dentro del área núcleo (30 tocones) y se registró el número de rebrotes proventicios y adventicios de cada tocón. El tipo de rebrote se definió según sus características fisiológicas y posición; aquellos que brotaron en la corona del tocón y en posición horizontal fueron identificados como adventicios, en tanto que aquellos mejor unidos al tocón y en posición vertical, como rebrotes proventicios. La caracterización dendrométrica del rebrote, se basó en los dos principales rebrotes proventicios dominantes de cada tocón; se les midió la altura total (H) y el diámetro del cuello (Dac) a nivel del suelo (D; 0.1 m sobre el suelo).

Análisis y modelo estadístico

Se utilizó la prueba de normalidad Shapiro-Wilks (Mendes y Pala, 2003), para comprobar la distribución normal de los residuos del modelo estadístico. Los datos de supervivencia y características dendrométricas del rebrote, se analizaron mediante ANOVA. La comparación de medias se obtuvo con base en la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). El modelo estadístico utilizado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + SP_i + B_j + D_k + SP(B)_{ij} + SP(D)_{ik} + B(D)_{jk} + SP(B)(D)_{ijk} + E_{ijk}$$

$$i = 1, \dots, 4; j = 1, \dots, 3; k = 1, \dots, 3$$

Donde:

Y_{ijk} = valor de la variable dependiente, observado en la especie i , en el bloque j , y densidad k ; μ = es la media general; SP_i = efecto del i -ésima especie; B_j = efecto del j -ésimo bloque; D_k =

efecto de la k -ésima densidad; $SP(B)_{ik}$ = efecto de la interacción entre la i -ésima especie y j -ésimo bloque; $SP(D)_{ik}$ = efecto de la interacción entre la i -ésima especie y la k -ésima densidad; $B(D)_{jk}$ = efecto de la interacción entre el j -ésimo bloque y de la k -ésima densidad; $SP(B)(D)_{ijk}$ = efecto de la interacción entre la i -ésima especie, el j -ésimo bloque y la k -ésima densidad. E_{ijk} = error del i -ésima especie, el j -ésimo bloque y la k -ésima densidad. El ANOVA se obtuvo con el apoyo del programa SAS Versión 9.2 (SAS Institute, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sitio Pilpilco Abajo, registró el mayor nivel de supervivencia en todas las densidades de plantación, por lo que se observó igualdad estadística para el porcentaje de supervivencia a los dos años de establecimiento (Tabla 1). Con base en los resultados de supervivencia de Pilpilco Abajo, puede decirse que este ambiente mostró mayor potencial para la producción de biomasa dendroenergética, especialmente con la utilización de las especies *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus globulus*, manejados como plantaciones unifustales de corta rotación.

Por otra parte, en el sitio Parcelas Collipulli, la especie *Eucalyptus globulus* presentó la mayor tasa de supervivencia del rebrote (89 %) en las tres densidades, a partir de los tocones obtenidos de los árboles cosechados a los dos años, que le permitió superar de forma significativa a *Eucalyptus nitens* y *Acacia dealbata*, con 25 % y 65 %, respectivamente (Tabla 2). En los otros dos sitios, todas las especies incluidas en el estudio presentaron valores estadísticamente iguales para la proporción de tocones que mostraron rebrotes, con valores entre 52 % y 78 %.

En Parcelas Collipulli y La Aguada, la especie *Acacia dealbata* mostró en promedio de las tres densidades de plantación valores de rebrotes entre el 65 % y 61 %, respectivamente (Tabla 2). Los resultados obtenidos fueron superiores a los que se registraron en otras especies de *Acacia*, en las que se observaron bajos porcentajes de rebrote después del cor-

te (37 % a 50 %), aunque después de seis meses se observó un incremento considerable hasta alcanzar el 85 % (Ríos-Saucedo y col., 2017). La especie *Eucalyptus globulus* presentó diferencia significativa ($P < 0.05$), registrando mayor capacidad de supervivencia del rebrote en dos de los tres sitios de estudio, aun-

que únicamente se detectó significancia estadística en Parcelas Collipulli (Tabla 2). Se obtuvieron resultados similares en estudios de supervivencia realizados en *Eucalyptus globulus*, en los que se corroboró la capacidad de rebrote de esta especie, debido a su alto potencial de iniciación en las yemas epicórmicas y

■ **Tabla 1. Valores promedio y significancia de las variables evaluadas en las tres densidades de plantación por sitio.**

Table 1. Mean values and significance of evaluated variables in three planting densities by site.

Sitio	Densidad (árboles/ha)	Supervivencia (%)		Número de rebrotes		Rebrotes dominantes	
		Cepas ¹	Rebrote ²	Adventicios	Proventicios	Dac (mm) ³	H (m) ⁴
Parcelas Collipulli	5 000	75 ^a	62 ^a	6 ^a	5 ^a	10.0 ^a	0.9 ^a
	10 000	68 ^{ab}	59 ^a	4 ^a	5 ^a	9.0 ^a	0.9 ^a
	15 000	58 ^b	59 ^a	4 ^a	5 ^a	8.0 ^a	0.7 ^b
La Aguada	5 000	60 ^a	54 ^a	5 ^a	5 ^a	22.4 ^a	1.8 ^a
	10 000	57 ^a	67 ^a	5 ^a	4 ^a	15.2 ^{ab}	1.2 ^a
	15 000	72 ^a	70 ^a	8 ^a	5 ^a	14.7 ^b	1.2 ^a
Pilpilco Abajo	5 000	94 ^a	65 ^a	9 ^a	5 ^a	11.0 ^a	0.8 ^a
	10 000	91 ^a	60 ^a	6 ^a	5 ^a	12.0 ^a	0.8 ^a
	15 000	94 ^a	31 ^a	6 ^a	4 ^a	8.0 ^a	0.5 ^b

¹Cepas: cepas de dos años, ²Rebrotes: cepas rebrotadas, ³Dac: diámetro a la altura del cuello, ⁴H: altura total, ^{a-c}Letras distintas en cada columna representan diferencias significativas entre densidades.

■ **Tabla 2. Valores promedio y significancia entre especies por sitio para las variables evaluadas.**

Table 2. Mean values and significance between species by site for the evaluated variables values.

Sitio	Especie	Supervivencia (%)		Número de rebrotes		Rebrotes dominantes	
		Cepas ¹	Rebrote ²	Adventicios	Proventicios	Dac (mm) ³	H (m) ⁴
Parcelas Collipulli	<i>Acacia dealbata</i>	74 ^{Aa}	65 ^b	5 ^b	5 ^b	8.4 ^b	0.8 ^b
	<i>Eucalyptus nitens</i>	66 ^{Ba}	25 ^c	3 ^b	2 ^c	7.0 ^c	0.5 ^c
	<i>Eucalyptus globulus</i>	61 ^{Ba}	89 ^a	8 ^a	7 ^a	11.5 ^a	1.1 ^a
La Aguada	<i>Acacia dealbata</i>	30 ^b	61 ^a	3 ^b	4 ^a	18.7 ^a	1.5 ^a
	<i>Eucalyptus denticulata</i>	74 ^a	52 ^a	6 ^{ab}	4 ^a	17.0 ^a	1.4 ^a
	<i>Eucalyptus globulus</i>	83 ^a	78 ^a	9 ^a	5 ^a	12.9 ^a	1.6 ^a
Pilpilco Abajo	<i>Eucalyptus nitens</i>	94 ^a	53 ^a	7 ^{ns}	4 ^b	9.0 ^a	0.6 ^b
	<i>Eucalyptus globulus</i>	91 ^a	52 ^a	7 ^{ns}	6 ^a	11.0 ^a	0.8 ^a

¹Cepas: cepas de dos años, ²Rebrotes: cepas rebrotadas, ³Dac: diámetro a la altura del cuello, ⁴H: altura total, ^{a-c}Letras diferentes en cada columna representan diferencias significativas entre especies; ^{A,B}Letras distintas en cada columna significan diferencias significativas entre porcentaje de supervivencia, número de rebrotes y rebrotes dominantes.

la presencia de lignotúber, con un porcentaje de supervivencia del 89 % (Catry y col., 2013).

El análisis descriptivo comparando las especies y densidad por cada sitio se presenta en la Tabla 3. Se obtuvo una tasa de supervivencia entre el 18 % y 97 % de tocones vivos y un 21 % y un 93 % en rebrotes; en la mayoría de las variables evaluadas se obtuvieron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre sitios, especies y densidades de plantación. Transcurridos dos años de establecimiento de la plantación, el sitio Pilpilco Abajo mostró el mayor porcentaje de supervivencia en tocones en las especies y densidades evaluadas, con valores entre 92 % y 97 % para *Eucalyptus nitens* y entre 90 % y 93 % para *Eucalyptus globulus*. En el sitio La Aguada, *Eucalyptus globulus* fue la especie con mayor porcentaje de supervivencia (91 %), en 5 000 árboles/ha, seguida por *Eucalyptus denticulata*, con 78 %, en 10 000 árboles/ha. En contraste, *Acacia dealbata* fue la especie que presentó el menor porcentaje de supervivencia, con valores inferiores a 30 % en las densidades de 5 000 árboles/ha y 10 000 árboles/ha.

En Parcelas Collipulli, la densidad de plantación más favorable para *Acacia dealbata* fue en la de 5 000 árboles/ha, con un 77 % de supervivencia de tocones, seguida por la densidad más alta de 15 000 árboles/ha, con un 74 %. Los eucaliptos, -especialmente *Eucalyptus nitens*- mostraron valores de supervivencia similares a los observados en *Acacia dealbata* en las densidades de 5000 árboles/ha y 10 000 árboles/ha. En la densidad de 15 000 árboles/ha se redujo significativamente la supervivencia en *Eucalyptus nitens* (51 %) y *Eucalyptus globulus* (48 %), en comparación con *Acacia dealbata* (74 %).

En Pilpilco Abajo, se registró bajo nivel de rebrote en *Eucalyptus nitens* (29 %) y *Eucalyptus globulus* (35 %), ambas especies en la densidad de 15 000 árboles/ha. A pesar que este sitio presentó la mayor tasa de supervivencia de tocones en la frecuencia de corte estu-

diada (2 años), esto pudo ser causado por deficiencias en el manejo silvícola después del aprovechamiento (extracción), dañando el tocón o dejándolo expuesto a la radiación solar. Para el número de rebrotes adventicios, la especie *Eucalyptus globulus* mostró valores significativos en Parcelas Collipulli (8) y La Aguada (9) (Tabla 2). En esta última localidad, *Eucalyptus denticulata* registró en promedio 6 rebrotes por tocón. De la misma forma, la especie *Eucalyptus globulus* registró un número significativamente mayor de rebrotes proventicios, con respecto al resto de las especies evaluadas en los tres sitios, en Parcelas Collipulli (7), Pilpilco Abajo (6) y en La Aguada (5) (Tabla 2). Se corroboró que todas las especies mostraron características de brotación aceptables para su uso en el sistema de monte bajo, en el cual se requiere de uno a tres retoños para estimular el crecimiento en altura de los rebrotes (Geldres y col., 2004). Se debe considerar que un número mayor de rebrotes proventicios y adventicios requiere un manejo silvícola apropiado, para evitar estrés de los rebrotes en crecimiento. Se recomienda dar prioridad a los rebrotes proventicios, eliminando los retoños adventicios y rebrotes proventicios con doble flecha, bifurcación y curvatura en el fuste (Geldres y col., 2004).

La densidad de plantación no presentó diferencias significativas sobre el número de rebrotes proventicios en ninguna de las especies (Tabla 3). La respuesta observada en este estudio está en función de la planta madre (tocón), ya que el crecimiento inicial del rebrote parte de las reservas de nutrientes. Trabajos similares reportan que es factible el uso de los rebrotes proventicios, los cuales muestran un crecimiento vigoroso y superan entre 10 % y 20 % el diámetro del cuello y la altura observada en los rebrotes adventicios (Brassiolo y col., 2007). Por tal motivo, las especies de este estudio, pueden ser manejadas a partir de rebrotes proventicios para la producción de biomasa, para la elaboración de pellets o chipeada para la generación de energía eléctrica.

El sitio Parcelas Collipulli, registró diferencias significativas en las variables dendrométricas evaluadas; para el diámetro a la altura del cuello (Dac), la especie *Eucalyptus globulus* mostró el valor promedio más alto con 11.5 mm, superando significativamente a las especies (Tabla 2) *Acacia dealbata* (8.4 mm) y *Eucalyptus nitens* (7.0 mm). En los otros dos sitios incluidos en el estudio, se observó igualdad estadística para el Dac, con valores entre 12.9 mm y 18.7 mm en La Aguada, y de 9.0 mm a 11.0 mm en Pilpilco Abajo.

En el sitio La Aguada se obtuvieron los valores más altos de Dac, y disminución paulatina de esta variable conforme se incrementó la densidad de plantación (Tabla 1). Los valores se redujeron de 22.4 mm en 5 000 ár-

boles/ha hasta alcanzar un nivel significativamente inferior, de 14.7 mm, en la densidad de 15 000 árboles/ha. En los otros dos sitios se observaron valores bajos (8.0 mm) en la densidad mayor (15 000 árboles/ha) y 10.0 mm y 11.00 en la menor (5 000 árboles/ha). En otros estudios se registró efecto significativo de la densidad de plantación sobre el diámetro normal (Dap: diámetro a la altura del pecho), y se estableció que la disminución de la cantidad de plantas/ha incrementó la tasa de crecimiento del diámetro en *Eucalyptus globulus* (Ferrere y col., 2005).

En este estudio, en altura, *Eucalyptus globulus* presentó los valores más altos en todos los sitios, que resultaron estadísticamente superiores al resto de las especies en Parce-

■ **Tabla 3. Supervivencia observada en tocones de dos años y rebrotes en diferentes especies, densidades de plantación y sitios.**

Table 3. Survival observed in two-year stumps and shoots in different species, planting densities and sites.

Sitios		Parcelas Collipulli			La Aguada			Pilpilco abajo	
Variable	Densidad	Ad	En	Eg	Ad	Ed	Eg	Eg	En
Supervivencia tocón (%)	5000	77 ^{Aa}	78 ^{Aa}	71 ^{Aa}	19 ^{Aa}	70 ^{Ba}	91 ^{Ca}	91 ^{Aa}	97 ^{Aa}
	10000	70 ^{Aa}	69 ^{Aa}	64 ^{Bb}	18 ^{Aa}	78 ^{Ba}	74 ^{Bb}	90 ^{Aa}	92 ^{Aa}
	15000	74 ^{Aa}	51 ^{Bb}	48 ^{Bc}	56 ^{Ab}	77 ^{Ba}	85 ^{Ca}	93 ^{Aa}	94 ^{Aa}
Supervivencia rebrotes (%)	5000	73 ^{Aa}	21 ^{Ba}	93 ^{Ca}	57 ^{Aa}	34 ^{Ba}	72 ^{Ca}	51 ^{Aa}	79 ^{Ba}
	10000	58 ^{Ab}	27 ^{Ba}	91 ^{Ca}	63 ^{Aa}	61 ^{Ab}	77 ^{Ba}	69 ^{Aa}	53 ^{Bb}
	15000	65 ^{Aab}	29 ^{Ba}	84 ^{Ca}	64 ^{Aa}	63 ^{Ab}	84 ^{Bb}	35 ^{Ab}	29 ^{Bc}
No. rebrotes adventicios	5000	6 ^{Aa}	8 ^{Aa}	12 ^{Ba}	2 ^{Aa}	4 ^{Ba}	10 ^{Ca}	8 ^{Aa}	8 ^{Aa}
	10000	6 ^{Aa}	3 ^{Bb}	10 ^{Ca}	6 ^{Ab}	7 ^{Ab}	7 ^{Ab}	6 ^{Ab}	6 ^{Aa}
	15000	7 ^{Aa}	3 ^{Bb}	7 ^{Cb}	12 ^{Ac}	8 ^{Bb}	8 ^{Bb}	8 ^{Aa}	7 ^{Aa}
No. rebrotes proventicios	5000	5 ^{Aa}	2 ^{Ba}	8 ^{Ca}	5 ^{Aa}	5 ^{Aa}	6 ^{Aa}	7 ^{Aa}	4 ^{Ba}
	10000	5 ^{Aa}	3 ^{Aa}	7 ^{Bab}	5 ^{Aa}	5 ^{Aa}	5 ^{Aa}	6 ^{Aab}	4 ^{Aa}
	15000	5 ^{Aa}	3 ^{Ab}	6 ^{Ab}	6 ^{Aa}	5 ^{Aa}	5 ^{Aa}	5 ^{Ab}	4 ^{Aa}
Dac (mm)	5000	8.9 ^{Aa}	8.7 ^{Aa}	12.3 ^{Ba}	35.7 ^{Aa}	19.6 ^{Ba}	20.0 ^{Ba}	13.2 ^{Aa}	10.9 ^{Aa}
	10000	8.9 ^{Aa}	6.5 ^{Aa}	12.3 ^{Ba}	19.2 ^{Ab}	16.4 ^{Ba}	19.2 ^{Aa}	13.3 ^{Aa}	10.1 ^{Ba}
	15000	7.7 ^{Aa}	7.0 ^{Aa}	9.8 ^{Ab}	12.7 ^{Ac}	16.5 ^{Ba}	17.1 ^{Ba}	10.6 ^{Aa}	8.0 ^{Ba}
Altura (m)	5000	0.8 ^{Aa}	0.5 ^{Ba}	1.2 ^{Ca}	2.5 ^{Aa}	1.7 ^{Aa}	1.6 ^{Aa}	0.9 ^{Aa}	0.7 ^{Aa}
	10000	0.9 ^{Aa}	0.5 ^{Ba}	1.2 ^{Ca}	1.5 ^{Ab}	1.4 ^{Aa}	1.5 ^{Aa}	1.0 ^{Aa}	0.6 ^{Ba}
	15000	0.7 ^{Aa}	0.5 ^{Aa}	0.9 ^{Bb}	0.9 ^{Ac}	1.4 ^{Aa}	1.5 ^{Ba}	0.8 ^{Aa}	0.4 ^{Bb}

Ad: es *Acacia dealbata*, En es *Eucalyptus nitens*, Ed: es *Eucalyptus denticulata*, Eg: es *Eucalyptus globulus*; distintas letras mayúsculas muestran diferencias significativas entre especies; distintas letras minúsculas muestran diferencias significativas entre densidad de plantación, Dac es el diámetro a la altura del cuello de los rebrotes.

las Collipulli (1.1 m) y Pilpilco Abajo (0.8 m) (Tabla 2). Aunque en La Aguada fue mayor (1.6 m), resultó estadísticamente igual a lo observado en *Acacia dealbata* (1.5 m) y en *Eucalyptus denticulata* (1.4 m). En otros estudios, se observó reducción considerable del número de rebrotes conforme se incrementó la altura, aunque se omitió la diferenciación de los tipos de rebrotes (Solimani, 2011). En todos los sitios de evaluación de este estudio, se observó efecto negativo al incrementar la densidad de plantación sobre la altura del rebrote (Tabla 1). En Parcelas Collipulli y Pilpilco Abajo, con *Eucalyptus globulus*, la mayor altura de los rebrotes se obtuvo en las densidades de 5 000 árboles/ha (1.2 m y 0.9 m, respectivamente) y 10 000 árboles/ha (1.2 m y 1.0 m, respectivamente) (Tabla 3); mientras que, en la densidad de 15 000 árboles/ha se registró una reducción significativa para esta variable (0.9 m y 0.8 m, respectivamente). En otros estudios, con la misma especie, se estableció que la densidad de plantación tuvo efecto menos marcado sobre la altura de la planta, en comparación con el aumento del diámetro normal (Dap) (Ferrere y col., 2005). Es necesario ajustar el manejo fores-

tal para incluir acciones encaminadas al control del consumo ejercido por la fauna silvestre (lagomorfos).

De los dos sitios donde se estableció *Acacia dealbata*, Parcelas Collipulli registró la mayor tasa de supervivencia de tocones en las tres densidades de plantación, con valores entre 70 % y 77 % (Tabla 3). En el sitio Parcelas Collipulli, la densidad de 5 000 árboles/ha fue la que obtuvo el mayor promedio de supervivencia, 75 % para las tres especies, seguido por la densidad de 10 000 árboles/ha con 68 % (Tabla 1). Estos resultados son consistentes con los reportados por Esquivel y col. (2013), quienes evaluaron la supervivencia en plantaciones de corta rotación en densidades de 5 000 árboles/ha; 7 500 árboles/ha y 10 000 árboles/ha, encontrando que al incrementar la densidad de plantación, aumentó también la mortalidad en los cultivos, esto atribuido a la competencia por espacio y nutrientes del suelo. Sin embargo, *Acacia dealbata* fue la especie que presentó menos afectación en la tasa de supervivencia, por la densidad de siembra (Tabla 4), acompañada por una buena tasa de rebrotes proventicios,

■ Tabla 4. Producción de rebrotes en función de la densidad de plantación final y el número de rebrotes por tocón en Parcelas Collipulli.

Table 4. Shoot production based on the final plantation density and the number of shoots by stump at Parcelas Collipulli.

<i>Eucalyptus nitens</i>				
Densidad	Supervivencia %	Densidad final	Rebrotes proventicios por tocón	Núm. de rebrotes
5 000	78	3 900	2	7 800
10 000	69	6 900	3	20 700
15 000	51	7 650	3	22 950
<i>Acacia dealbata</i>				
Densidad	Supervivencia	Densidad final	Rebrotes proventicios	Núm. de rebrotes
5 000	77	3 850	5	19 250
10 000	70	7 000	5	35 000
15 000	74	11 100	5	55 500
<i>Eucalyptus globulus</i>				
Densidad	Supervivencia	Densidad final	Rebrotes proventicios	Núm. de rebrotes
5 000	71	3 550	8	28 400
10 000	64	6 400	7	44 800
15 000	48	7 200	6	43 200

lo que hace de esta especie una inversión rentable. En las tres especies de eucalipto (*Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus denticulata*) es importante considerarse densidades de siembra de 10 000 árboles/ha a 15 000 árboles/ha para obtener una mayor rentabilidad (Tabla 3).

CONCLUSIONES

El éxito del establecimiento de especies forestales, bajo un sistema de monte bajo, está relacionado con la elección de especies de fácil brotación, y el mantener la supervivencia en las primeras etapas de crecimiento de la plantación inicial. El sitio, reflejado en las condiciones edafoclimáticas difiere significativamente para obtener el mayor número de tocones vivos al momento de la cosecha y desarrollo de rebrotes. En ciclos posteriores, la densidad mayor puede ser la más rentable para la generación de energía a partir de la

producción de biomasa. La especie *Eucalyptus globulus* mostró altas tasas de supervivencia en todos los sitios, por lo que puede ser considerada como una buena opción para optimizar el sistema productivo de biomasa por unidad de superficie a partir de rebrotes. Dicha especie mostró altas tasas de supervivencia al final del ciclo de corta (2 años), un alto nivel de brotación en dos de los sitios y producción de numerosos rebrotes preventivos; así como, el mayor incremento del diámetro en dos de los sitios, y altura de los rebrotes dominantes en los tres sitios estudiados. *Acacia dealbata* puede ser utilizada en algunos sitios como especie de monte bajo, para la producción de biomasa dendroenergética, aunque es necesario asegurar la supervivencia en el primer ciclo de corta (tocones vivos) mediante la aplicación de métodos de silvicultura intensiva.

REFERENCIAS

- Alonso, S., Asensio, V., Casaleiro, A. B. y Montalvo, J. (2008). Control de eucalipto y reforestación con especies caducifolias: innovación y efectos ecológicos. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. (28):37-42.
- Barros, S. (2013). Introducción de especies de *Eucalyptus* a Chile. Reseña histórica. *Ciencia e Investigación Forestal*. 19(3): 69-94.
- Binkley, D. and Stape, J. L. (2004). Sustainable management of *Eucalyptus* plantations in a changing world. In N. Borralho, J. S. Pereira, C. Marques, J. Coutinho, M. Madeira, and M. Tomé (Eds.), *Eucalyptus in a Changing World. Proceedings of an IUFRO Conference, Aveiro, Portugal* (pp. 11-17). Portugal: RAIZ, Instituto Investigação de Floresta e Papel.
- Brassiolo, M. M., Gomez, C. y Abt, M. (2007). Regeneración de un rodal de Tipa blanca utilizando brotes de cepas [Método de Monte Bajo]. *Revista de Ciencia y Tecnología*. 3(3): 44-53.
- Catry, F. X., Moreira, F., Tujeira, R., and Silva, J. S. (2013). Post-fire survival and regeneration of *Eucalyptus globulus* in forest plantations in Portugal. *Forest Ecology and Management*. 310: 194-203.
- Domingues, R. M. A., Patinha, D. J. S., Sousa, G. D. A., Villaverde, J. J., Silva, C. M., Freire, C. S. R., and Pascoal-Neto, C. (2011). *Eucalyptus* biomass residues from agroforest and pulping industries as sources of high-value triterpenic compounds. *Cellulose Chemistry and Technology*. 45(7-8): 475-481.
- Esquivel, E., Rubilar, R., Sandoval, S., Acuña, E., Cancino, J., Espinosa, M. y Muñoz, F. (2013). Efecto de plantaciones dendroenergéticas en el carbono a nivel de suelo, en dos suelos contrastantes de la Región de Biobío, Chile. *Revista Árvore*. 37(6): 1135-1144.
- Farinaci, J. S., da-Ferreira L. C., and Batistella, M. (2013). Forest transition and ecological modernization: *eucalyptus* forestry beyond good and bad. *Ambiente & Sociedade*. 16(2): 25-46.
- Ferreira, M., Costa, S., Cavalcante, R., Castro, R., Oliveira, V., Carneiro, A. O., ..., and Pimenta, A. (2017). Biomass and energy production at short rotation *eucalyptus* clonal plantations deployed in rio grande do norte. *Revista Árvore*. 41(5).
- Ferreira, T., Paiva, J. M., and Pinho, C. (2014). Performance assessment of invasive *Acacia dealbata* as a fuel for a domestic pellet boiler. *Chemical Engineering Transactions*. 42(1): 73-78.
- Ferrere, P., Lopez, G. A., Boca, R. T., Galetti, M. A., Esparrach, C. A., and Pathauer, P. S. (2005). Initial

- density effect on *Eucalyptus globulus* growth in a Nelder modified trial. *Forest Systems*. 14(2): 174-184.
- Fuentes, R., Pauchard, A., Cavieres, L., and García, R. (2011). Survival and growth of *Acacia dealbata* vs. native trees across an invasion front in south-central Chile. *Forest Ecology and Management*. 261(6): 1003-1009.
- García, O. and Ruiz, F. (2003). A growth model for eucalypt in Galicia, Spain. *Forest Ecology and Management*. 173(1): 49-62.
- Geldres, E., Shlatter, J. E. y Marcoleta, A. (2004). Monte Bajo, opción para tres especies de Eucaliptos en segunda rotación, un caso en la provincia de Osorno, Décima Región, Chile. *Bosque*. 25(3): 57-62.
- Hamilton, M. G., Dutkowski, G. W., Joyce, K. R., and Potts, B. M. (2011). Meta-analysis of racial variation in *Eucalyptus nitens* and *E. denticulata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 41: 217-230.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*. 83(1): 47-54.
- Mendes, M. and Pala, A. (2003). Type I error rate and power of three normality tests. *Pakistan Journal of Information and Technology*. 2(2): 135-139.
- Moxham, C., Duncan, M., and Moloney, P. (2018). Tree health and regeneration response of Black Box (*Eucalyptus largiflorens*) to recent flooding. *Ecological Management & Restoration*. 19(1): 58-65.
- Novoa, Y., Villaseca, S., Del-Canto, P., Rouanet, J., Sierra, C. y Del-Pozo, A. (1989). *Mapa Agroclimático de Chile*. Santiago de Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. 221 Pp.
- Oliveira, A., Neves, A., Vinícius, R., Cavalcante, R., Papaspyrou, L., Pereira, R. y Rocha, B. (2014). Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. *Revista Árvore*. 38(2): 375-381.
- Patiño-Martínez, P. E. (2014). Biomasa Residual Vegetal: Tecnologías de transformación y estado actual. *Innovaciencia*. 2(1): 45-52.
- Quartucci, F., Schweier, J., and Jaeger, D. (2015). Environmental analysis of *Eucalyptus* timber production from short rotation forestry in Brazil. *Journal International of Forest Engineering*. 26(3): 225-239.
- Ramos-Llorente, J. J. (2013). La biomasa se abre camino entre las renovables. *Energética*. 21: 70-71.
- Ríos-Saucedo, J., Acuña-Carmona, E., Cancino-Cancino, J., Rubilar-Pons, R., Corral-Rivas, J. y Rosales-Serna, R. (2017). Dinámica de brotación y densidad básica de la madera en rebrotes de tres especies dendroenergéticas. *Agrociencia*. 51(2): 215-227.
- Rodríguez, A., Cancino, J., Acuña, E., Rubilar, R. y Muñoz, F. (2013). Evaluación del crecimiento de plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus* spp., según densidad de plantación y turno de rotación, en suelos contrastantes de la región del Bío Bío, Chile. *Ciencia e Investigación Forestal INFOR*. 19(1): 7-18.
- Ruiz, F. and Lopez, G. (2010). *Review of cultivation history and uses of eucalypts in Spain*. Conference of *Eucalyptus* species management, history, status and trends in Ethiopia. Addis Ababa, Ethiopia. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/258112099_Review_of_cultivation_History_and_Uses_of_Eucalypts_in_Spain. Fecha de consulta: 4 de abril de 2018.
- SAS Institute (2008). SAS/STAT 9.2 User's guide. SAS Institute Cary, NC. [En línea]. Disponible en: <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statugstatmodel/61751/PDF/default/statugstatmodel.pdf>. Fecha de consulta: 10 de junio de 2014.
- Silva, C. E., Salgado, O. D. y González, B. (2011). Evaluación de la capacidad de rebrotes de dos especies arbóreas en el bosque tropical seco en Nandrola, Pacífico Sur. *La Calera*. 8(11): 57-61.
- Sixto, H., Hernández, M. J., Barrio, M., Carrasco, J., and Cañellas, I. (2008). Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. *Forest Systems*. 16(3): 277-294.
- Solimani, N. (2011). Evaluation physiographic factors on oak sprout structure in mountain forest of west of Iran. *Advances in Environmental Biology*. 5(9): 2906-2912.
- Turnbull, J. W. (1999). Eucalypt plantations. *New Forests*. 17(1-3): 37-52.
- White, D. A., Beadle, C. L., Worledge, D., and Honeysett, J. L. (2016). Wood production per evapotranspiration was increased by irrigation in plantations of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens*. *New Forests*. 47(2): 303-317.



Imagen de: Salomón Barrezuela Unda

Propiedades de algunos suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro, Ecuador

Properties of several soils cultivated with cocoa in the province of El Oro, Ecuador

Salomón Barrezuela-Unda

RESUMEN

Las propiedades físicas y químicas del suelo, en conjunto, condicionan la capacidad productiva de las plantas. La investigación tuvo como objetivo caracterizar las propiedades de los principales suelos cacaoteros de la provincia de El Oro (Ecuador), en los municipios de El Guabo, Machala, Santa Rosa y Pasaje. Se seleccionaron 30 parcelas, conformadas por los tipos de cacao CCN51 ($n = 18$) y Nacional ($n = 12$), de las cuales, se extrajeron muestras de suelo de 0 cm a 30 cm, para analizar varias propiedades físicas y químicas en laboratorio. Los resultados no mostraron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre las propiedades físicas. Los niveles de carbono variaron de 1.58 % (El Guabo) a 2.06 % (Santa Rosa). En general, el nitrógeno fue bajo (0.16 % a 0.18 %). Los valores de CE (rango; 0.13 dS/m a 0.21 dS/m), pH (rango, 6.46 a 7.72), CIC (23.40 cmol/kg a 43.86 cmol/kg), potasio (0.31 cmol/kg a 1.86 cmol/kg) y calcio (19.99 cmol/kg a 37.73 cmol/kg), tendieron a ser más altos en suelos de Machala ($P < 0.05$) y más bajos en los de Pasaje. En Santa Rosa, los suelos presentaron concentraciones más altas de cobre (16.6 mg/k) ($P < 0.05$), que en el resto de los municipios. El rendimiento del cacao CCN51 (2 570.24 kg/ha/a a 4 158.34 kg/ha/a) fue superior a Nacional (324.00 kg/ha/a a 814.17 kg/ha/a). Los suelos de Machala presentaron valores nutrimentales más altos, asociados con el mayor rendimiento promedio para cacao variedad Nacional, y un alto rendimiento para variedad CCN51.

PALABRAS CLAVE: cultivos asociados, monocultivo, fertilización, rendimiento.

ABSTRACT

The physical and chemical properties of the soil, as a whole, condition the productive capacity of the plants. The research aimed to characterize the properties of the main cocoa soils in the province of El Oro (Ecuador), in the municipalities of El Guabo, Machala, Santa Rosa and Pasaje. We selected 30 plots of cocoa types CCN51 ($n = 18$) and National ($n = 12$), from which soil samples from 0 cm to 30 cm were extracted to analyze various physical and chemical properties in the laboratory. The results showed no significant differences ($P > 0.05$) between the physical properties. The carbon levels, ranged from 1.58 % (El Guabo) to 2.06 % (Santa Rosa). In general, the nitrogen was low (0.16 % a 0.18 %). The values of: CE (0.13 13 dS/m to -0.21 dS/m), pH (6.46 to 7.72), CIC (23.4040 cmol/kg to -43.86 cmol/kg), potassium (0.310.31 cmol/kg to -1.86 cmol/kg) and calcium (19.99 cmol/kg to -37.73 cmol/kg) tended to be higher in Machala soils (< 0.05) and lower in Pasaje soils. The soils of Santa Rosa had higher concentrations of copper (16.6 mg/k) ($P < 0.05$) than in the rest of the municipalities. Cocoa yield CCN51 (2 570.24 kg/ha/y to 4 158.34 kg/ha/y) was higher than National (324.00 kg/ha/y to 814.17 kg/ha/y). The soils of Machala presented higher nutritional values, associated with higher average yield for National variety cocoa, and a high yield for CCN51 variety.

KEYWORDS: associated crops, monoculture, fertilization, yield.

*Correspondencia: sabarrezuela@utmachala.edu.ec / Fecha de recepción: 26 de junio de 2018 / Fecha de aceptación: 18 de junio de 2019 / Fecha de publicación: 29 de julio de 2019

Universidad Técnica de Machala, Facultad de Ciencias Agropecuarias, av. Panamericana km 5.5, Machala, Ecuador, C. P. 170517.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de *Theobroma cacao* L (cacao), es el tercer cultivar en importancia dentro del grupo de los commodities agrícolas, después del café y la caña de azúcar, a nivel mundial, y representa una fuente importante de ingresos económicos para los países en los que se cultiva (van-Vliet y col., 2015; Wanger y col., 2018). La mayor parte de los productores de cacao son agricultores, con granjas menores a 3.5 ha, bajo un manejo asociado con sombra de árboles frutales o forestales, sistema que incrementa la biomasa en el suelo y lo protege de la erosión (Hartemink, 2005; Fontes y col., 2014; Snoeck y col., 2016).

En la mayoría de los casos, el rendimiento del sistema asociado del cacao es inferior al manejo en monocultivo sin sombra, que necesita de fertilización química para mantener esta diferencia (Somarriba y Lachenaud 2013; Argüello-Navarro y col., 2016; Snoeck y col., 2016). Para Carr y Lockwood (2011) y Wanger y col. (2018), la fertilidad del suelo y el rendimiento del cacao está relacionada con el material parental del suelo, el clima (lluvia, temperatura, humedad), los usos anteriores del suelo, y por el grupo genético del cacao que se cultive.

En Ecuador, el cacao se cultiva bajo diferentes manejos, principalmente en las regiones costera y amazónica (Perez-Neira, 2016); en suelos de origen aluvial, con rangos de pH entre ácidos y alcalinos; así como, valores medios y altos de materia orgánica, que proporcionan alta variabilidad de macro y micro nutrientes (Moreno y col., 2016).

El principal grupo genético que se cultiva en el país es el cacao Nacional, reconocido a nivel internacional por su aroma y sabor (Ramlachan y col., 2009). Pero, desde la última década del siglo XX, en la provincia de El Oro, se ha incrementado la superficie plantada con el clon de cacao Colección Castro Naranjal 51 (CCN51). Sustitución que se origina por altos niveles de producción (> 2 000 kg/ha/a) con relación al tipo de cacao Nacional (< 800 kg/ha/a) y principalmente, se manejó en asocia-

ción (Ramlachan y col., 2009). Pero CCN51 tiene un alto requerimiento nutricional, porque se cultiva sin sombra y en altas densidades, factores que incrementan el uso de fertilizantes químicos y del recurso agua (Herrmann y col., 2015). Además, este cacao muestra un perfil de sabor más débil con respecto a Nacional, y por lo tanto, se comercializa como cacao a granel a menor precio (Herrmann y col., 2015; Ramírez-Huila y col., 2016).

Por otra parte, el cacao, tiene un peso importante en la economía de Ecuador y de la provincia de El Oro (Barrezueta-Unda y Chabla-Carrillo, 2017; Viteri-Salazar y col., 2018), por lo que, los resultados de las investigaciones sobre las propiedades de suelos, y la relación con el rendimiento, deben ser la base para la implementación de programas que incrementen la producción cacaotera y mantengan la fertilidad natural de los suelos.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar las propiedades físicas y químicas de los suelos cacaoteros de cuatro municipios de la provincia de El Oro (Ecuador).

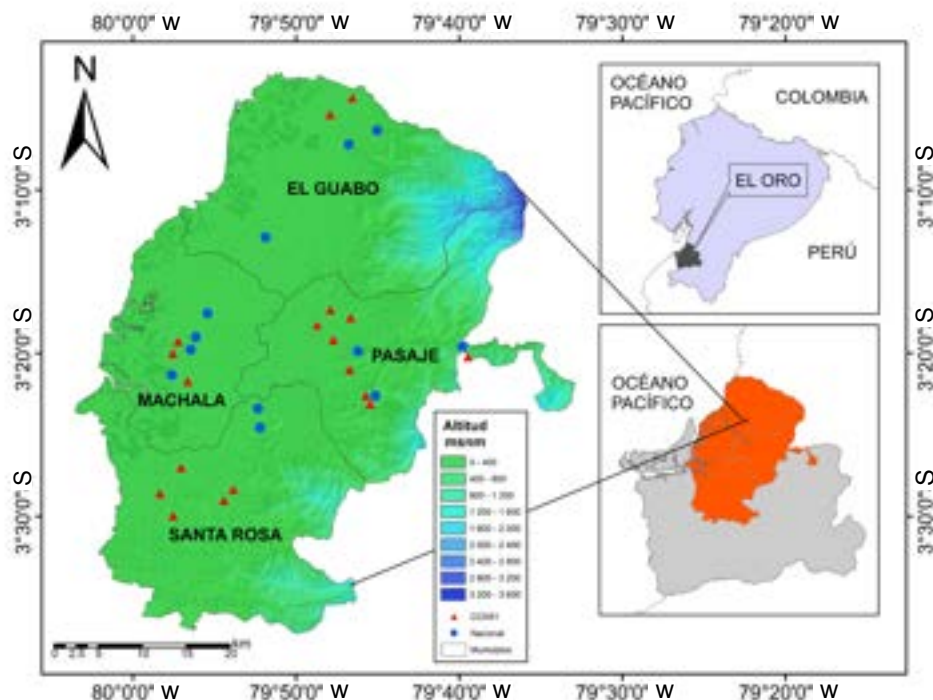
MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área en estudio

Las granjas cacaoteras, donde se realizó el estudio, se localizan al noreste de la provincia El Oro, en la costa sur de Ecuador, principalmente en los municipios de: El Guabo, Machala, Pasaje y Santa Rosa (Figura 1). La precipitación promedio anual, entre los años 1975 al 2010, fue de 505 mm en El Guabo y Machala, y de 912 mm en Pasaje y Santa Rosa; y la temperatura media de 26 °C (Luna-Romero y col., 2018). El suelo es de origen aluvial, formado de material fluvial y marino, con predominio de las fracciones mineralógicas, limo y arena sobre la arcilla (Moreno y col., 2016).

Descripción de las parcelas

Se seleccionaron para el estudio 30 parcelas al azar (1 ha a 3 ha de superficie cada una), ubicadas: cinco en El Guabo, siete en Machala, siete en Santa Rosa y 11 en Pasaje (Figura 1;



■ **Figura 1. Localización del área en estudio.**

Figure 1. Location of the area under study.

Tabla 1). La muestra estuvo conformada por 18 parcelas bajo el sistema monocultivo y cultivadas con CCN51, y por 12 parcelas cultivadas con Nacional, en asociación con árboles de plátano y cítricos. La edad de las plantas fluctuó para CCN51 de 2 a 25 años y para Nacional de 4 a 80 años.

El arreglo de la densidad de plantas fue de 1 280 plantas/ha a 1 700 plantas/ha para CCN51, y de 800 plantas/ha a 1 100 plantas/ha para Nacional. En las parcelas de CCN51 se aplicaron riegos por inundación cada 15 d, solo en la época de verano; en el caso del cacao Nacional, los agricultores no mantenían una frecuencia de riego establecida.

Todas las parcelas tuvieron en común las labores de control mecánico de malezas cada dos meses, y podas de formación y sanitarias, con una frecuencia semestral. Las cosechas fueron mensuales para CCN51 y por temporadas (de agosto a octubre) para Nacional.

En el caso de la fertilización química, se realizó con frecuencia semestral (diciembre y abril). El fertilizante más utilizado fue la urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), súper fosfato triple ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) y muriato de potasio (KCl), como fuentes principales de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), respectivamente.

Toma de muestras

El trabajo de campo se llevó a cabo entre julio y octubre de 2015. En cada parcela se tomó con una pala 5 submuestras de suelo disturbadas, de aproximadamente un 1 kg siguiendo un patrón en forma de W, a una distancia de 50 m entre submuestras, y a una profundidad de 0 cm a 30 cm. Al final del recorrido, se mezcló el suelo en un recipiente limpio, hasta obtener una muestra homogénea, de donde se extrajeron 0.5 kg por parcela. Las muestras fueron secadas al aire, bajo sol, por 96 h, homogenizadas y tamizadas con un tamiz con malla de 2 mm, para su posterior envío al laboratorio.

■ Tabla 1. Características de las parcelas seleccionadas.
Table 1. Characteristics of the plots selected.

N°	Municipio	Coordenadas geográficas	Altitud	Orden de suelo	Tipo de cultivo ¹	Edad (años)	Color del suelo en seco
Tipo de suelo: franco							
1	El Guabo	3°4'47.43" S 79°47'19.74" W	6	Alfisol	CCN51	12	10YR7/3
2	El Guabo	3°4'47.43" S 79°47'5.34" W	1	Alfisol	Nacional	38	10YR7/3
3	El Guabo	3°4'45.59" S 79°47'1.59" W	6	Alfisol	CCN51	25	10YR7/4
4	El Guabo	3°4'45.59" S 79°46'52.01" W	6	Alfisol	Nacional	20	10YR7/4
5	El Guabo	3°23'18.37" S 79°52'19.92 W	9	Alfisol	Nacional	20	7,5YR4/6
6	Machala	3°19'13.04" S 79°57'13.82" W	11	Entisol	CCN51	10	10YR4/6
7	Machala	3°19'16.19" S 79°57'13.17" W	1	Entisol	Nacional	20	10YR3/6
8	Machala	3°19'30.98" S 79°57'18.82" W	1	Entisol	CCN51	4	10YR3/4
9	Machala	3°21'15.22" S 79°57'36.34" W	4	Entisol	Nacional	25	10YR4/6
10	Machala	3°21'19.81" S 79°57'31.11" W	4	Entisol	CCN51	6	10YR5/2
11	Machala	3°17'28.43" S 79°55'25.55" W	5	Entisol	Nacional	25	10YR4.5/4
12	Machala	3°18'55.94" S 79°56'8.22" W	5	Entisol	Nacional	40	10YR5/8
13	Santa Rosa	3°26'55.70" S 79°57'2.56" W	51	Entisol	CCN51	15	10YR7/6
14	Santa Rosa	3°28'56.64" S 79°54'24.87" W	21	Entisol	CCN51	4	10YR6/6
15	Santa Rosa	3°28'16.37" S 79°53'56.21" W	21	Entisol	CCN51	3	10YR6/8
16	Santa Rosa	3°28'36.37" S 79°58'20.48" W	24	Entisol	CCN51	5	10YR5/4
17	Santa Rosa	3°28'31.42" S 79°58'19.55" W	26	Entisol	CCN51	5	10YR5/6
18	Santa Rosa	3°23'19.11" S 79°52'19.01" W	9	Entisol	Nacional	30	10YR6/4
19	Santa Rosa	3°12'49.41" S 79°51'52.35" W	9	Entisol	Nacional	30	10YR6/3
Tipo de suelo: franco arcilloso							
20	Pasaje	3°4'56.59" S 79°47'38.55" W	7	Alfisol	CCN51	8	10YR6/2
21	Pasaje	3°17'54.16" S 79°47'35.73" W	15	Alfisol	CCN51	8	10YR5/6
22	Pasaje	3°17'48.76" S 79°47'35.73" W	26	Alfisol	CCN51	8	10YR5/3
23	Pasaje	3°18'1.25" S 79°47'34.46" W	24	Alfisol	CCN51	8	10YR5/2
24	Pasaje	3°22'34.42" S 79°45'11.47" W	134	Inceptisol	CCN51	10	10YR6/6
25	Pasaje	3°22'37.61" S 79°47'34.46" W	168	Inceptisol	CCN51	10	10YR5/8
26	Pasaje	3°22'31.42" S 79°45'8.46" W	187	Inceptisol	Nacional	60	10YR5/8
27	Pasaje	3°20'16.24" S 79°45'8.46" W	650	Inceptisol	Nacional	80	10YR5/6
28	Pasaje	3°20'17.08" S 79°39'40.92" W	703	Inceptisol	CCN51	2	10YR5/8
29	Pasaje	3°20'56.17" S 79°46'42.02 W	54	Inceptisol	CCN51	5	10YR5/6
30	Pasaje	3°20'36.19" S 79°46'41.01" W	90	Inceptisol	Nacional	4	10YR4/6

¹CCN51: en monocultivo; Nacional: asociado con: *Musa acuminata*, *Citrus sinensis*, *Citrus limón*, *Citrus reticulata*.

Determinación del tamaño de las partículas del suelo, superficie específica, carbono y nitrógeno elemental del suelo

La determinación del tamaño de las partículas del suelo (arcilla, limo, arena), se realizó con

el método del picnómetro de Bouyoucus (Gilson SA-2, Middleton, USA), en el laboratorio de suelos de la Universidad Técnica de Machala, en la provincia de El Oro (Ecuador). Con los valores de arcilla, limo y arena, se cla-

sificaron los suelos por clases de textura, con el triángulo de textura (USDA-NRCS, 2014).

La superficie específica (SE) y las propiedades químicas de carbono (C) elemental y N elemental se realizaron en la Universidad de La Coruña (España). Para la SE, se usó un analizador de absorción de gas Micromeritics ASAP 2020 (serie Tristar II; Georgia, U.S.A) con N como gas adsorbente, y los resultados se expresaron en masa (m^3/g). Los porcentajes de C y N fueron obtenidos en un analizador modelo Flash EA1112 (Thermo Finnigan, Colorado, U.S.A) a una temperatura de oxidación de 1 020 °C, con flujo de helio como gas de arrastre.

Análisis de nutrientes del suelo

Las determinaciones analíticas del resto de propiedades químicas del suelo se realizaron en los laboratorios del Instituto Ecuatoriano de Investigación Agropecuaria del Ecuador y fueron:

La conductividad eléctrica (CE) se determinó mediante extracto de saturación y se leyó en conductivímetro Hi5222-1 (Hanna, Rumania).

El pH se evaluó en pasta de saturación en agua, con relación 1:2.5.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se obtuvo utilizando acetato de amonio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) 1N pH 7.

Los niveles de P, K, cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn), se determinaron usando el método propuesto por Olsen modificado a pH 8.5 (Olsen y Sommers, 1982). Los niveles de calcio (Ca) y Mg se obtuvieron a través de la extracción de KCl 1 N (USDA-NRCS, 2014).

Para la interpretación y comparación de los resultados de las propiedades físicas y químicas, se tuvo como criterio los niveles óptimos descritos por Amores y col. (2010) y Pico y col. (2012), para el cultivo del cacao en Ecuador (Tabla 2). En las parcelas incluidas en el

estudio, también se preguntó sobre el rendimiento anual del cacao ($\text{kg}/\text{ha}/\text{a}$), con relación a la cosecha del último año. Consulta realizada a los productores o administrados de las fincas.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de las propiedades físicas, químicas, y de los rendimientos, consistió de una parte descriptiva (media y desviación estándar), de un análisis de varianza (ANOVA) al 5 % de significancia, y una prueba de Tukey ($P < 0.05$), para determinar diferencias en los suelos. También se realizó una matriz de Pearson ($P \leq 0.01^{**}$ y $P < 0.05^*$), para establecer correlaciones en las propiedades de los suelos, y los rendimientos de las granjas cacaoteras por municipio. Todo el proceso se realizó con el *software* Paquete Estadístico para Ciencias Sociales, versión 24 (SPSS, por sus siglas en inglés: Statistical Package for the Social Sciences) (SPSS, 2013).

RESULTADOS

Los valores de granulometría para los suelos fueron: arcilla, limo y arena, los cuales, permitieron clasificar a los suelos en las clases texturales franco (El Guabo, Machala y Santa Rosa) y franco arcilloso (Pasaje) (Tabla 1).

La SE, propiedad física del suelo relacionada con la absorción del agua y de nutrientes (Sarli y col., 1992), osciló entre $8.61 \text{ m}^2/\text{g} \pm 4.14 \text{ m}^2/\text{g}$ (Machala) a $13.5 \text{ m}^2/\text{g} \pm 4.20 \text{ m}^2/\text{g}$ (Santa Rosa) (Tabla 2). Valores que los clasifican como suelos altamente meteorizados ($0 \text{ m}^2/\text{g}$ a $14.00 \text{ m}^2/\text{g}$) y moderadamente meteorizados ($15.00 \text{ m}^2/\text{g}$ a $20.00 \text{ m}^2/\text{g}$); típicos de suelos tropicales (Fassbender y Bornemisza, 1987) y que pueden ocasionar problemas en la absorción del P por las plantas (López-Hernández y Bates Rondón, 2018).

Los niveles de C y N no mostraron diferencia entre municipios ($P < 0.05$), como se observa en la Tabla 2. El valor de C en promedio, fue menor al óptimo para la producción de cacao ($> 1.7 \%$) en el El Guabo, pero superior en el resto de los municipios. El N en

los suelos de El Guabo y Machala obtuvieron una media de $0.16 \% \pm 0.03$, valor que está por debajo del nivel óptimo para la producción de cacao ($> 0.2 \%$), mientras en los suelos de Santa Rosa y Pasaje, el nivel de N, mostró alta variabilidad con medias de $0.18 \% \pm 0.13$ y $0.18 \% \pm 0.10$, respectivamente.

En general, todos los valores de CE estuvieron dentro del nivel óptimo (< 1 dS/m), pero los valores encontrados en Machala (0.21 dS/m ± 0.07 dS/m) fueron significativamente mayores ($P < 0.05$) que los de Santa Rosa (0.13 dS/m ± 0.06 dS/m) y Pasaje (0.13 dS/m ± 0.04 dS/m). Los valores de pH se ubicaron en promedio dentro del rango óptimo (5.1 a 7.0) para el desarrollo del cacao (Tabla 2), pero con una tendencia a la alcalinidad, particularmente en Machala, al analizar su desviación estándar.

Los valores promedio de CIC estuvieron por encima del rango bajo en el nivel óptimo (19.35 cmol/kg), pero los valores promedio de los suelos de Santa Rosa y Pasaje fueron

significativamente menores ($P < 0.05$). Sin embargo, se aprecia, por su desviación estándar, que algunos presentaron valores por debajo del óptimo (Tabla 2).

El contenido de P varió ampliamente en los suelos analizados. Aunque se observa que no existió diferencia ($P < 0.05$) entre municipios, pese a que El Guabo tuvo los suelos con menor contenido (11.98 mg/kg ± 13.14 mg/kg), y Pasaje los más altos (56.11 mg/kg ± 86.71 mg/kg), mostrando que existió una gran variabilidad de este nutriente (Tabla 2). El contenido de K fue mayor ($P \leq 0.05$) en el municipio de Machala (1.86 mg/kg ± 0.93 mg/kg), por encima del nivel óptimo (0.2 cmol/kg a 1.2 cmol/kg). En tanto que, en los suelos de Santa Rosa (0.31 cmol/kg ± 0.47 cmol/kg) y Pasaje (0.42 cmol/kg ± 0.43 cmol/kg), este nutriente se encontraba muy cercano al rango inferior dentro del nivel óptimo.

En general, el Ca, Mg, Cu y Zn estuvieron por encima del nivel óptimo (Tabla 2). El Ca, os-

■ **Tabla 2. Análisis estadístico de las propiedades físicas y químicas de los suelos cacaoteros en la provincia de El Oro (Ecuador).**

Table 2. Statistical analysis of the physical and chemical properties of cocoa soils in the province of El Oro (Ecuador).

Propiedades	El Guabo	Machala	Santa Rosa	Pasaje	Óptimo
SE (m ² /g)	9.69 $\pm$ 3.67 a	8.61 $\pm$ 4.14 a	13.5 $\pm$ 4.20 a	11.43 $\pm$ 4.36 a	No definido
C (%)	1.58 $\pm$ 0.26 a	1.81 $\pm$ 0.29 a	2.06 $\pm$ 1.66 a	1.87 $\pm$ 1.09 a	> 1.7
N (%)	0.16 $\pm$ 0.03 a	0.16 $\pm$ 0.03 a	0.18 $\pm$ 0.13 a	0.18 $\pm$ 0.10 a	0.2 a 0.4
CE (dS/m)	0.14 $\pm$ 0.03 ab	0.21 $\pm$ 0.07 b	0.13 $\pm$ 0.06 a	0.13 $\pm$ 0.04 a	< 1.00
pH	6.81 $\pm$ 1.02 ab	7.72 $\pm$ 0.42 b	6.83 $\pm$ 0.72 ab	6.46 $\pm$ 1.00 a	5.1 a 7.0
C.I.C (cmol/kg)	33.4 $\pm$ 2.95 ab	43.86 $\pm$ 8.00 b	26.26 $\pm$ 13.37 a	23.40 $\pm$ 9.60 a	19.35 a 30
P (mg/kg)	11.98 $\pm$ 13.14 a	21.17 $\pm$ 15.23 a	29.9 $\pm$ 27.57 a	56.11 $\pm$ 86.71 a	12.0 a 25.0
K (cmol/kg)	0.34 $\pm$ 0.59 a	1.86 $\pm$ 0.93 b	0.31 $\pm$ 0.47 a	0.42 $\pm$ 0.43 a	0.2 a 1.2
Ca (cmol/kg)	27.62 $\pm$ 8.21 ab	37.73 $\pm$ 10.99 b	26.67 $\pm$ 12.35 ab	19.99 $\pm$ 13.10 a	4.0 a 18.0
Mg (cmol/kg)	4.44 $\pm$ 1.80 a	4.59 $\pm$ 1.50 a	3.42 $\pm$ 1.14 a	4.07 $\pm$ 3.48 a	0.9 a 4.0
Cu (mg/kg)	12.32 $\pm$ 6.12 ab	7.37 $\pm$ 0.53 a	16.6 $\pm$ 5.67 b	9.23 $\pm$ 5.06 a	1.8 a 5.9
Zn (cmol/kg)	4.72 $\pm$ 0.39 a	5.83 $\pm$ 0.82 a	10.36 $\pm$ 4.94 a	9.22 $\pm$ 6.14 a	0.5 a 2.2

^{ab}Letras distintas indican significancia ($P < 0.05$); *Valores óptimos del cultivo de cacao.

ciló entre 19.99 cmol/kg $\pm$ 13.10 (Pasaje) y 37.73 cmol/kg $\pm$ 1.099 (Machala). Los valores de Mg fueron muy ajustados, mostrando un rango de 3.42 cmol/kg $\pm$ 1.14 cmol/kg (Santa Rosa) a 4.59 cmol/kg $\pm$ 1.50 cmol/kg (Machala). El Cu osciló entre 7.37 mg/kg $\pm$ 0.53 mg/kg (Machala) y 16.6 mg/kg $\pm$ 5.67 mg/kg (Santa Rosa). En el caso del Zn, se observa una diferencia numérica pero no estadística, entre los suelos de El Guabo (4.72 cmol/kg $\pm$ 0.39 cmol/kg) y Machala (5.83 cmol/kg $\pm$ 0.82 cmol/kg), con respecto a los suelos de Santa Rosa (10.36 cmol/kg $\pm$ 4.94 cmol/kg) y Pasaje (9.22 cmol/kg $\pm$ 6.14 cmol/kg).

Los valores de rendimiento anual mostraron diferencia para el tipo de cacao ($P < 0.05$) pero no entre municipios para el cacao Nacional (Tabla 3). El rendimiento de cacao fue superior en CCN51, con el registro más alto en los suelos de El Guabo (4 158.34 kg/ha/a $\pm$ 200.34 kg/ha/a), y el más bajo significativamente para Santa Rosa (2 570.24 kg/ha/a $\pm$ 1 051.05 kg/ha/a). Los promedios de Nacional tuvieron el valor más alto en Machala (814.17 kg/ha/a $\pm$ 598.72 kg/ha/a), y el más bajo en Pasaje (324.00 kg/ha/a $\pm$ 297.06 kg/ha/a).

En la Tabla 4 se muestra la matriz de correlación de Pearson para los diferentes parámetros físicos y químicos de los suelos, y su asociación con el rendimiento de los cultivos de cacao. No se muestran valores de correlación para los cultivos obtenidos en El Guabo (CCN51) y Santa Rosa (Nacional), por tener solo dos poblaciones muestreadas en esos mu-

nicipios. El rendimiento de CCN51 presentó una correlación positiva con la cantidad de magnesio disponible en el suelo, pero esta solo fue significativa al analizar en forma global todos los suelos ($r = 0.60$; $P < 0.01$). En el cultivo Nacional, en el municipio de Pasaje, se encontró una relación negativa significativa entre el rendimiento y el valor de CE ($r = -0.99$; $P < 0.01$), Cu ($r = -0.99$; $P < 0.05$) y Zn ($r = -0.99$; $P < 0.05$), lo que sugiere que, en dicha región, un excedente de esta propiedad físico-química y nutrientes puede ser una limitante en la producción de cacao.

DISCUSIÓN

Características de las propiedades físicas de los suelos analizados

La granulometría mostró que los suelos estudiados pertenecen al orden de alfisol, entisol e inceptisol con un contenido de arena superior en todos los suelos (Moreno y col., 2016). El contenido de arena fue superior en todos los suelos, pero en conjunto el limo+arcilla representó entre 57 % y 63.77 % (datos no observados), lo que indica una textura fina, adecuada para la producción de cacao, porque facilita la capacidad de retener mayor humedad (van-Vliet y col., 2015). Esto es importante, ya que el promedio de precipitación anual, en especial para El Guabo y Machala es bajo (≤ 505 mm).

El rango de SE (Tabla 2), está dentro del intervalo descrito por algunos investigadores (< 20 m²/g), para suelos con arcilla tipo caolinita, muy cristalizada y poco expansiva (Ruiz

■ Tabla 3. Análisis estadístico de rendimientos de las fincas cacaoteras por municipios productores de cacao de la provincia El Oro (Ecuador).

Table 3. Statistical Analysis of cocoa farms' yields by cocoa-producing municipalities of the province of El Oro (Ecuador).

Municipios	Nacional (kg/ha/a)	CCN51 (kg/ha/a)
El Guabo	469.31 $\pm$ 419.35 ^{aA}	4 158.34 $\pm$ 200.34 ^{aB}
Machala	814.17 $\pm$ 598.72 ^{aA}	3 650.00 $\pm$ 1 068.88 ^{abB}
Santa Rosa	496.16 $\pm$ 52.56 ^{aA}	2 570.24 $\pm$ 1 051.05 ^{bB}
Pasaje	324.00 $\pm$ 297.06 ^{aA}	3 865.83 $\pm$ 1 631.54 ^{abB}

^{a,b}Letras distintas indican diferencia significativa ($P < 0.05$) entre municipios (columnas) para un mismo tipo de cacao.

^{A,B}Letras distintas indican diferencia significativa ($P < 0.05$) entre tipos de cacao (filas), para un mismo municipio.

■ Tabla 4. Matriz de correlación de Pearson entre el rendimiento de las fincas cacaoteras y las propiedades físicas y químicas de los suelos cultivados con cacao en la provincia de El Oro (Ecuador).
Table 4. Correlation Matrix of Pearson between the yield of the cocoa farms and the physical and chemical properties of the soils cultivated with cocoa in the province of El Oro (Ecuador).

CCN51					
Propiedades	El Guabo	Machala	Santa Rosa	Pasaje	Total
Arcilla	---	- 0.28	- 0.01	0.26	0.26
Limo	---	- 0.28	0.67	0.19	0.12
Arena	---	0.28	- 0.44	- 0.55	- 0.33
SE	---	0.03	0.23	- 0.03	- 0.08
C	---	0.83	0.69	- 0.42	- 0.05
N	---	- 0.36	0.69	- 0.54	- 0.11
CE	---	- 0.78	- 0.67	- 0.32	- 0.14
pH	---	- 0.82	0.71	0.43	0.33
CIC	---	- 0.23	0.70	0.06	0.23
P	---	0.22	0.38	- 0.09	0.03
K	---	- 0.89	0.50	- 0.13	- 0.01
Ca	---	- 0.29	0.79	0.24	0.26
Mg	---	0.36	0.70	0.60	0.60**
Cu	---	- 0.43	0.74	0.01	- 0.14
Zn	---	- 0.93	- 0.41	0.01	- 0.17
Nacional					
Propiedades	El Guabo	Machala	Santa Rosa	Pasaje	Total
Arcilla	- 0.01	0.86	---	0.73	0.36
Limo	- 0.90	- 0.70	---	0.12	- 0.34
Arena	0.58	0.19	---	- 0.62	- 0.05
SE	1.00	- 0.83	---	0.99	- 0.04
C	0.99	0.84	---	- 0.57	0.09
N	0.90	0.51	---	- 0.54	0.04
CE	- 0.31	- 0.42	---	- 0.99**	- 0.09
pH	- 0.34	- 0.82	---	- 0.86	- 0.05
CIC	0.96	- 0.77	---	- 0.46	0.17
P	- 0.56	0.49	---	- 0.54	- 0.30
K	- 0.42	- 0.57	---	- 0.51	0.02
Ca	0.38	0.12	---	- 0.74	0.24
Mg	- 0.52	- 0.26	---	- 0.21	- 0.05
Cu	- 0.34	- 0.70	---	- 0.99*	- 0.47
Zn	- 0.14	0.60	---	- 0.99*	- 0.31

*P < 0.05.

y col., 2016; López-Hernández y Bates-Rondón, 2018). Los suelos constituidos de caolinita como arcilla principal, contribuyen a una buena estructura física, que facilita la absorción de nutrientes (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Por otro lado, Fournier y col. (2002) señalan que los valores de SE entre 1 m²/g a 20 m²/g, son tipos de suelos con altos contenidos de ma-

teria orgánica, debido a que esta se adhiere a las partículas de arcilla, disminuyendo la SE externa del suelo al rango de la materia orgánica. Entonces, la entrada constante de carbono orgánico a los suelos provista por la hojarasca de las plantas de cacao (Ramírez-Huila y col., 2016), tanto en CCN51, como en Nacional, pudo incidir en los valores de SE determinados en el estudio.

Características de las propiedades químicas de los suelos analizados

Los suelos, en general, mostraron niveles altos de C. En parte, por la capa de hojarasca y de otros residuos (mazorca, ramas, raíces) en el suelo, que incrementa los valores de C, así como la biomasa que aporta la vegetación asociada (Puentes-Páramo y col., 2014; van-Vliet y col., 2015), principalmente en Nacional. También la lenta mineralización del C, en plantaciones de cacao > 30 años, incide en niveles más altos del C (Fassbender y Bornemisza, 1987). Esto pudo apreciarse en Pasaje, donde sus suelos de textura franco arcillosa (Tabla 1), presentaron altas concentraciones de C (Tabla 2), asociadas probablemente con el hecho de ser cultivos de cacao con mayor edad, de acuerdo con los datos proporcionados por los agricultores (Tabla 1).

El N es el principal nutriente del ecosistema del cacao y está muy interrelacionado con el K en la acción fisiológica del llenado de las mazorcas (Hartemink, 2005). En esta investigación, todos los niveles de N fueron bajos, al igual que el nivel K en Santa Rosa, hecho que pudo afectar el rendimiento del cacao CCN51 en estos suelos (Tabla 3). Un estudio previo reportó que las pérdidas de N, en el llenado de la mazorca (28 kg a 87 kg de N en 1 000 kg de almendra seca) (Zaia y col., 2012; Furcal-Beriguete, 2016), no se compensó con el aporte de la hojarasca (56.45 kg de N/a) (Ramírez-Huila y col., 2016), siendo necesario el reingreso de las mazorcas o complementar con abonos nitrogenados. Otro factor que incide en los valores de N, es la rápida mineralización de este elemento en suelos tropicales, por efectos de la humedad y temperatura, que dificultan tener niveles altos de NH_4 y NO_2 ; que son las formas asimilables de N en el suelo (Fassbender y Bornemisza, 1987).

La significancia ($P < 0.05$) obtenidas para CE, pH, CIC y Ca, entre los suelos de Machala con el resto de suelos (Tabla 2), sugieren una relación directa entre estas propiedades, también reportada por Brito y col. (2019), en suelos ca-

caoteros en Tabasco (México). La desviación estándar del pH, en Santa Rosa (6.83 ± 0.72), El Guabo (6.81 ± 1.02) y Pasaje (6.46 ± 1.00) indican que algunas muestras son ligeramente ácidas, lo que disminuye los valores de CE. Mientras que los valores alrededor del pH 7 a pH 7.5, están relacionados a niveles de CIC altos, como se observó en los suelos de Machala. Similar tendencia registró González-Gordon y col. (2018); y Argüello y col. (2019), en suelos cacaoteros bajo monocultivo y agroforestal, en Ecuador y Colombia, respectivamente.

La alta variabilidad observada entre la media y la desviación estándar del P, K, Ca y Mg en especial de los suelos de Pasaje, indica que dichos elementos pueden estar en un desbalance nutricional en algunas fincas (González-Gordon y col., 2018). Esto se debe al nivel alto del K, que tiene predominio sobre los cationes Ca y Mg, lo que resulta desfavorable para el crecimiento del cacao; así como, el P, que en altas cantidades puede tener efectos sobre la absorción del K por las plantas (Snoeck y col., 2016). Por otra parte, los niveles de P en los suelos cacaoteros es escaso, pero cuando se aplica en forma de fertilizantes fosfatados los niveles pueden incrementarse (Hartemink, 2005), aunque el alto nivel de P en Pasaje ($56.11 \text{ mg/kg} \pm 86.71 \text{ mg/kg}$) podría deberse al material parental (roca fosfórica). En el caso del Mg, este nutriente toma una relación inversa con el contenido de arena (Aikpokpodion, 2010), como se observó en Santa Rosa, en donde se reporta el menor valor de Mg ($3.42 \text{ cmol/kg} \pm 1.14 \text{ cmol/kg}$) que presentó un alto contenido de arena (42.60 %).

Los suelos de El Guabo y Santa Rosa mostraron promedios altos de Cu, valores que se relacionan con un pH próximo a 7. Investigaciones realizadas por Villaseñor y col. (2015), también reportan niveles altos de Cu en la zona, producto del material parental altamente meteorizado.

Snoeck y col. (2016) encontraron una relación entre el pH ligeramente ácido (pH 6 a 7) y la

disponibilidad de Zn, lo cual se pudo apreciar en los suelos de Santa Rosa y Pasaje (Tabla 2), sin embargo, esto no sucedió en El Guabo, con suelos ligeramente ácidos, pero baja disponibilidad de Zn, por lo que deben existir factores adicionales a considerar en esa relación.

Rendimiento

El rendimiento del cacao CCN51 (rango, 2 570.24 kg/ha/a $\pm$ 1 051.05 kg/ha/a a 4 158.34 kg/ha/a $\pm$ 200.34 kg/ha/a), fueron altos con respecto a los datos presentados por Ramlachan y col. (2009) y Sánchez-Mora y col. (2015), en la costa ecuatoriana (1 047.7 kg/ha/a y 1 301 kg/ha/a, respectivamente), y a los obtenidos en Colombia (2 020 kg/ha/a) y Camerún (967 kg/ha/a) reportados por Magne y col. (2014) y Puentes-Páramo y col. (2014), respectivamente; rendimientos que fueron obtenidos en parcelas experimentales. En el caso de esta investigación, los valores de rendimientos fueron obtenidos mediante consulta a los agricultores, pudiendo en algunos casos sobrestimar el valor de la cosecha.

El rendimiento de cacao Nacional, en el rango de 324 kg/ha/a a 814.17 kg/ha/a, se encuentra dentro del promedio mundial (480 kg/ha/a) para cacao en general (Sánchez-Mora y col., 2013) y concuerda con lo reportado por Ramlachan y col. (2009) de 589.50 kg/ha/a, aunque podría ser bajo, respecto a lo reportado por Sánchez-Mora y col. (2015) de 751 kg/ha/a a 878.90 kg/ha/a en Ecuador. La alta variabilidad presentada en los rendimientos también se obtuvo en otras investigaciones (Ramlachan y col., 2009; Deheuvels y col., 2012; Magne y col., 2014; Sánchez-Mora y col., 2015), y se relaciona con el nivel de exposición solar, la interacción de los tipos de cacao con las condiciones climáticas y la alta heterogeneidad entre la edad de las plantas.

La amplia gama de suelos en los que se cultivan los árboles de cacao, implica, obviamente, variaciones en la disponibilidad de nutrientes, en especial de los macro elementos, lo que influye en el rendimiento del cacao (Snoeck y

col., 2016 y Takoutsing y col., 2016). Un excedente en la concentración de los nutrientes y la presencia de pH ligeramente ácido que aumente su biodisponibilidad, pueden incrementar el rendimiento del cultivo (Puentes-Páramo y col., 2014; Rosas-Patiño y col., 2017; Yulianti y col., 2018), o como en este estudio, afectarlo negativamente.

CONCLUSIONES

En general, las características de los suelos cacaoteros de la provincia de El Oro fueron suelos de textura fina, niveles altos de C y CIC, valores dentro del nivel óptimo de CE y bajo nivel de N. Los promedios del resto de los nutrientes sobrepasaron el nivel óptimo establecido para cacao, pero mostraron alta variabilidad, relacionada con el pH del suelo. Los suelos de El Guabo y Machala, en general, mostraron características químicas diferentes a los de Santa Rosa y Pasaje. Sin que implique que los niveles de fertilidad sean deficientes. Los rendimientos entre los tipos de cacao fueron muy superiores en CCN51. En Nacional, el rendimiento se ajustó a los promedios del Ecuador. Los suelos de Machala presentaron mayor contenido de nutrientes asociados con mayor rendimiento. La diferencia en los rendimientos, no se pueden atribuir a las propiedades físicas que fueron las adecuadas para el cultivo. Se mostró un desbalance entre el N, P, K, Ca y Mg, que incidió para que en algunas granjas los rendimientos sean muy bajos.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a las autoridades de la Universidad Técnica de Machala por financiar la investigación, la cual, es parte del proyecto “Estimación del secuestro de carbono en suelos cultivados de la Parroquia El Progreso. Pasaje-Ecuador”, con número 294/2017 UTMach.

REFERENCIAS

- Aikpokpodion, P. E. (2010). Nutrients dynamics in cocoa coils, leaf and beans in Ondo State, Nigeria. *Journal of Agricultural Sciences*. 1(1): 1–9.
- Amores, F., Suárez, C. y Garzón, I. (2010). Producción intensiva de cacao nacional con sabor “arriba”: tecnología, presupuesto y rentabilidad. Guayaquil, Ecuador: INIAP. 13-14. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/1630>. Fecha de consulta: 11 de junio de 2019.
- Argüello, D., Chavez, E., Lauryssen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., and Montalvo, D. (2019). Soil properties and agromonic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide survey in Ecuador. *Science of the Total Environment*. 649. 120–127.
- Argüello-Navarro, A., Soler, N. y Moreno-Rozo, L. (2016). Cuantificación de bacterias diazotófas aisladas de suelos cacaoteros (*Theobroma cacao* L.), por la técnica de Número Más Probable (NMP). *Revista Colombiana de Biotecnología*. 18(2): 40–47.
- Barrezueta-Unda, S. y Chabla-Carrillo, J. (2017). Características sociales y económicas de la producción de cacao en la provincia El Oro. *Revista La Técnica*. 25–34.
- Brito, H., Salaya-Domínguez, J. M., Gómez-Méndez, E., Gómez-Vázquez, A., and Antele-Gómez, J. B. (2019). Physico-chemical Properties of Soil and Pods (*Theobroma cacao* L.) in Cocoa Agroforestry Systems. *Journal of Agronomy*. 17: 48–55.
- Carr, M. K. V. and Lockwood, G. (2011). The water relations and irrigation requirements of cocoa (*Theobroma cacao* L.): A review. *Experimental Agriculture*. 47(4): 653–676.
- Deheuvels, O., Avelino, J., Somarriba, E., and Malezieux, E. (2012). Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 149: 181–188.
- Fassbender, H. y Bornemisza, E. (1987). *Química de suelos: con énfasis en suelos de América Latina (II)*. Turrialba, Costa Rica: IICA. 134-148 Pp.
- Fontes, A. G., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Sales, M. V. S., Costa, M. G., and Machado, R. C. R. (2014). Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. *Plant and Soil*. 383(1–2): 313–335.
- Fournier, L., Filgueira, R., Sikora, L., Rawls, W. y Pachepsky, Y. (2002). Superficie específica de un Hapludult típico. Efectos de la aplicación de materia orgánica. *Ciencias del Suelo*. 20(2): 118–121.
- Furcal-Beriguete, P. (2016). Extracción de nutrientes por los frutos de cacao en dos localidades en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*. 28(1): 113.
- González-Gordon, R., Alvares-Albanes, E. y Castañeda-Sánchez, D. (2018). Evaluación de la calidad química del suelo en agroecosistemas cacaoteros de la subregión del Nordeste y Urabá Antioqueño Resumen Introducción. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*. 5(1): 41–52.
- Hartemink, A. E. (2005). Nutrient stocks, nutrient cycling, and soil changes in cocoa ecosystems: a review. *Advances in agronomy*. 86: 227-253.
- Herrmann, L., Felbinger, C., Haase, I., Rudolph, B., Biermann, B., and Fischer, M. (2015). Food Fingerprinting: Characterization of the Ecuadorean Type CCN-51 of *Theobroma cacao* L. Using Microsatellite Markers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 63(18): 4539–4544.
- López-Hernández, D. y Bates-Rondón, J. (2018). Áreas superficiales específicas y parámetros asociados en suelos venezolanos con diferentes grados de pedogénesis. *Revista de La Facultad de Agronomía*. 35: 270–292.
- Luna-Romero, A., Ramírez, I., Sánchez, C., Conde, J., Agurto, L., and Villaseñor, D. (2018). Spatio-temporal distribution of precipitation in the Jubones river basin, Ecuador: 1975-2013. *Scientia Agropecuaria*. 9(1): 63–70.
- Magne, A., Nonga, N., Yemefack, M., and Robiglio, V. (2014). Profitability and implications of cocoa intensification on carbon emissions in Southern Cameroun. *Agroforestry Systems*. 88(6): 1133–1142.
- Moreno, J., Sevillano, G., Valverde, O., Loayza, V., Haro, R., and Zambrano, J. (2016). Soil from the Coastal Plane. In J. Espinosa, J. Moreno, and G. Bernal (Eds.), *The Soils of Ecuador* (pp. 1–195). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Olsen, S. y Sommers, L. (1982). Phosphorous. In Methods of Soil Analysis. In S. R. Olson and L. E. Sommers (Eds.). *Dynamics of Vegetation and Soils of Oak/saw Palmetto Scrub After Fire: Observations from Permanent Transects* (pp. 403–430). Madison: American Society of Agronomy.
- Perez-Neira, D. (2016). Energy sustainability of ecuadorian cacao export and its contribution to climate change. A case study through product life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. 112: 2560–2568.
- Pico, J., Calderón, D., Fernández, F. y Díaz, A. (2012). *Guía del manejo integrado de enfermedades del cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) en la amazonia*. INIAP. Guayaquil, Ecuador. 12-15 Pp.
- Puentes-Páramo, Y., Menjivar-Flores, J., Gómez-Carabalí, A. y Aranzazu-Hernández, F. (2014). Absorción y distribución de nutrientes en clones de cacao y sus efectos en el rendimiento. *Acta Agronómica*. 63(2): 145–152.
- Ramírez-Huila, G., Torres-Navarrete, E., Cruz-Rosero, N., Barrera-Álvarez, A., Alava-Ormaza, S. y Jiménez-Águilar, M. (2016). Biomasa de hojas caídas y otros indicadores en asociaciones de especies forestales con cacao “CCN51” en la zona central del litoral ecuatoriano. *Ciencia y Tecnología*. 9(2): 4–6.
- Ramlachan, N., Agama, J., Amores, F., Quiroz, J., Vaca, D., Zamora, C., ..., and Motamayor, J. C. (2009). Regional Selec-

tion of Hybrid Nacional Cocoa Genotypes in Coastal Ecuador. Costa Rica. [En línea]. Disponible en: <http://ingenic.cas.psu.edu/documents/publications/News/Ramlachan12.pdf>. Fecha de consulta: 11 de junio de 2019.

Rice, R. A. and Greenberg, R. (2000). Cacao Cultivation and the Conservation of Biological Diversity. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 29(3): 167–173.

Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y. y Menjivar-Flores, J. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corpoica Ciencia Tecnología Agropecuaria*. 18(3): 529–541.

Ruiz, H., Sarli, O., Goncalves, C., Fliquero, R. y Silva de Souza, F. (2016). La superficie específica de oxisoles y su relación con la retención hídrica. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias de La Universidad del Cuyo*. 48(2): 95–105.

Sánchez-Mora, F., Medina-Jara, M., Díaz-Coronel, G., Ramos-Remache, R., Vera-Chang, J., Vásquez-Morán, V., ... y Onofre-Nodari, R. (2015). Potencial sanitario y productivo de 12 clones de cacao en Ecuador. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 38(3): 265–274.

Sánchez-Mora, F., Zambrano, J., Vera, J., Ramos, R., Gárces, F. y Vascón, G. (2013). Productividad de clones de cacao tipo nacional en una zona del bosque húmedo tropical de la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Ciencia y Tecnología*. 7(1): 33–41.

Sarli, G., Piro, A. y Filgueira, R. (1992). Puesta a punto de un método para medir superficie específica de suelos. *Ciencia del Suelo*. 10: 86–66.

Snoeck, D., Koko, L., Joffre, J., Bastide, P., and Jagoret, P. (2016). Cacao nutrition and fertilization. In E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 1–34). Montpellier, France: Springer International Publishing.

Somarrriba, E. and Lachenaud, P. (2013). Successional cocoa agroforests of the Amazon–Orinoco–Guiana shield. *Forests, Trees and Livelihoods*. 22(1): 51–59.

SPSS, Statistical Package for the Social Sciences (2013). SPSS Statistics for Windows. Chicago, IL, USA: IBM Corp. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/us-en/marketplace/spss-predictive-analytics-enterprise>. Fecha de consulta: 11 de mayo de 2018.

Takoutsing, B., Weber, J. C., Tchoundjeu, Z., and Shepherd, K. (2016). Soil chemical properties dynamics as affected by land use change in the humid forest zone of Cameroon. *Agroforestry Systems*. 90(6): 1089–1102.

USDA-NRCS (2014). Soil Survey Investigations Report. In R. Burt (Ed.), *Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual* (pp. 58–498). Lincoln, Nebraska: USDA-NRCS.

van-Vliet, J., Slingerland, M., and Giller, K. (2015). Mineral Nutrition of Cocoa. Wageningen, Netherlands: Wageningen University and Research Centre. 7–30 Pp.

Villaseñor, D., Chabla, J. y Luna, E. (2015). Caracterización física y clasificación taxonómica de algunos suelos dedicados a

la actividad agrícola de la provincia del El Oro. *Cumbres*. 1(2): 28–34.

Viteri-Salazar, O., Ramos-Martín, J., and Lomas, P. L. (2018). Livelihood sustainability assessment of coffee and cocoa producers in the Amazon region of Ecuador using household types. *Journal of Rural Studies*. 62: 1–9.

Wanger, T. C., Hölscher, D., Veldkamp, E., and Tschardt, T. (2018). Cocoa production: Monocultures are not the solution to climate adaptation—Response to Abdulai et al. 2017. *Global Change Biology*. 24(2): 561–562.

Yulianti, T., Abdoellah, S., Suprayogo, D., and Sari, N. P. (2018). Cocoa Production as Affected by Shade Tree Species and Soil Quality. *Pelita Perkebunan*. 34(2): 80–89.

Zaia, F. C., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Moço, M. K. S., Fontes, A. G., Machado, R. C. R., and Baligar, V. C. (2012). Carbon, nitrogen, organic phosphorus, microbial biomass and N mineralization in soils under cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*. 86(2): 197–212.