

An overview of nejayote, a nixtamalization byproduct

Exploración del subproducto de la nixtamalización, nejayote: un panorama

Elsa Díaz-Montes¹; Roberto Castro-Muñoz²; Jorge Yáñez-Fernández^{1*}

¹Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. Av. Acueducto s/n, col. Barrio La Laguna, Ticomán, Ciudad de México, C. P. 07340, MÉXICO.

jyanezfe@ipn.mx, tel.: (+52) 55 57 29 6000, ext. 56477 (*Corresponding author).

²University of Chemistry and Technology Prague, Technická 5, 166 28 Prague 6, CZECH REPUBLIC.

Abstract

The demand for nixtamalized products has broadened the industrialization of maize. The nejayote is a product of the alkaline cooking of grain, and unfortunately contributes to environmental deterioration after being dumped into the public sewer system. There is evidence that adequate treatment of this byproduct not only reduces pollution, but it is also a source of compounds with high added value with potential for technological applications. The objective of this review was to provide an overview of the main methodologies and technological developments which have been implemented to explore the physicochemical properties of nejayote and to assign a treatment or an application to it. With the work performed it was possible to detect that the recovery of materials with high added value (polyphenols, carbohydrates, sugars, gums and calcium components) can be used in various areas such as the food, pharmaceutical and biotechnological sectors. In addition, it was identified that the obtaining of these components can be carried out through the coupling of various bioprocesses (fermentation, filtration, centrifugation and decantation).

Keywords: *Zea mays*, pollutant, treatments, valuation, industrial use.

Resumen

La demanda de productos nixtamalizados ha incrementado la industrialización del maíz. El nejayote surge de la cocción alcalina del grano, y desafortunadamente contribuye en el deterioro ambiental tras ser vertido al alcantarillado público. Existe evidencia de que el tratamiento adecuado de este subproducto no sólo disminuye la contaminación, también es fuente de compuestos de valor agregado alto con potencial para aplicaciones tecnológicas. El objetivo de esta revisión fue proveer un panorama sobre las principales metodologías y desarrollos tecnológicos que se han implementado para explorar las propiedades físico-químicas del nejayote y proveerle un tratamiento o aplicación. Con el trabajo realizado se pudo detectar que la recuperación de materiales con valor agregado alto (polifenoles, carbohidratos, azúcares, gomas y componentes de calcio) puede ser utilizada en diversas áreas como la alimenticia, farmacéutica y biotecnológica. Además, se identificó que la obtención de dichos componentes se puede llevar a cabo mediante el acoplamiento de diversos bioprocesos (fermentación, filtración, centrifugación y decantación).

Palabras clave: *Zea mays*, contaminante, tratamientos, valoración, uso industrial.



Introduction

Maize is the cereal with the greatest consumption demand in Mexico with approximately 23,200 Mt. These figures are expected to increase to 24,600 Mt, by 2020 (*Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación* [SAGARPA], 2011); this is due to the large number of products that are derived from it, such as tortillas, tortilla chips, tostadas, tacos, flours (Valderrama-Bravo et al., 2012) and other grain-derived products.

Nixtamalization is a thermal-alkaline process native to Mexico and carried out in Central America, the northern United States and parts of Europe and Asia (Valderrama-Bravo et al., 2012). This process improves the nutritional and sensory characteristics of maize, since it allows the partial removal of the pericarp (Valderrama-Bravo et al., 2013; Acosta-Estrada, Lazo-Vélez, Nava-Valdez, Gutiérrez-Urbe, & Serna-Saldívar, 2014), starch gelling and hydrolysis of the fibers (Domínguez-Espinosa & Pacho-Carrillo, 2003).

The conditions to which maize is subjected during nixtamalization are very important, as temperature and agitation have a significant effect on the removal of superficial layers, as well as on the adsorption of water and calcium (Ruiz-Gutiérrez et al., 2010). During this process, the action of calcium hydroxide generates two products: nixtamal, which is the soft grain used for making masa or derived products (Pflugfelder, Rooney, & Waniska, 1988), and nejayote, which is the wastewater whose physicochemical properties result from the components in the maize (Acosta-Estrada et al., 2014).

Certain biological properties (antioxidant activity) of nejayote are attributed to the presence of bioactive compounds, such as arabinoxylans (AX) and polyphenols. The former are polymers of xylose replaced by an arabinofuranosyl, which are commonly present in cereals and grasses without cellulose (Mendis & Simsek, 2014). The later serve as a structural link between the pericarp and endosperm of the grain (Castro-Muñoz & Yáñez-Fernández, 2015).

It has been estimated that a maize processing plant, producing nixtamal, with a 600 t·day⁻¹ capacity, can produce between 1,500 and 2,000 m³ of nejayote per day. This effluent is considered as a pollutant because of its high pH (12 to 14) (Salmerón-Alcocer et al., 2003) and its high organic matter load (2,540 mg·L⁻¹) (Valderrama-Bravo et al., 2012). Recently, industrial nejayote has been dumped into water bodies (rivers or lakes), in soils or in the public sewer system, and rarely is previously treated (Salmerón-Alcocer et al., 2003). Due to its physicochemical properties (Table 1), rarely has an attempt been made to find a use for the extract.

Introducción

El maíz es el cereal con mayor demanda de consumo en México, aproximadamente 23,200 Mt. Se estima que para el 2020 las cifras aumenten a 24,600 Mt (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2011); esto debido a la gran cantidad de productos que se derivan del mismo, tales como tortillas, totopos, tostadas, tacos, harinas (Valderrama-Bravo et al., 2012) y demás derivados del grano.

La nixtamalización es un proceso térmico-alcálico autóctono de México y efectuado en América central, el norte de Estados Unidos y parte de Europa y Asia (Valderrama-Bravo et al., 2012). Dicho proceso mejora las características nutricionales y sensoriales del maíz, ya que permite la remoción parcial del pericarpio (Valderrama-Bravo et al., 2013; Acosta-Estrada, Lazo-Vélez, Nava-Valdez, Gutiérrez-Urbe, & Serna-Saldívar, 2014), la gelificación del almidón y la hidrólisis de las fibras (Domínguez-Espinosa & Pacho-Carrillo, 2003).

Las condiciones a las que se somete el maíz durante la nixtamalización son de gran importancia, ya que la temperatura y la agitación tienen un efecto significativo en la remoción de las capas superficiales, así como en la adsorción del agua y el calcio (Ruiz-Gutiérrez et al., 2010). En dicho proceso, la acción del hidróxido de calcio genera dos productos: el nixtamal, que es el grano suave disponible para la elaboración de masa o productos derivados (Pflugfelder, Rooney, & Waniska, 1988), y el nejayote, que es el agua de cocimiento y cuyas propiedades físico-químicas resultan de los componentes presentes en el maíz (Acosta-Estrada et al., 2014).

Ciertas propiedades biológicas (actividad antioxidante) del nejayote se atribuyen a la presencia de compuestos bioactivos, tales como arabinoxilanos (AX) y polifenoles. Los primeros son polímeros de xilosa sustituida por un arabinofuranosil, los cuales están presentes en cereales y gramíneas sin celulosa (Mendis & Simsek, 2014). Los segundos funcionan como vínculo estructural entre el pericarpio y el endospermo del grano (Castro-Muñoz & Yáñez-Fernández, 2015).

Se ha estimado que una planta procesadora de maíz, productora de nixtamal, con capacidad de 600 t·día⁻¹, llega a generar entre 1,500 y 2,000 m³ de nejayote por día. Este efluente se considera contaminante debido a su pH alto (12 a 14) (Salmerón-Alcocer et al., 2003) y su elevada carga de materia orgánica (2,540 mg·L⁻¹) (Valderrama-Bravo et al., 2012). Recientemente, el nejayote industrial se vierte en cuerpos de agua (ríos o lagos), en suelos o en el alcantarillado público, y pocas veces se le aplica algún tratamiento previo (Salmerón-Alcocer et al., 2003). Debido a sus propiedades físico-

Table 1. Physicochemical properties evaluated in nejayote.**Cuadro 1. Propiedades físico-químicas evaluadas del nejayote.**

Properties / Propiedad	Parameter / Parámetro
Total solids content (g·L ⁻¹) / Contenido total de sólidos (g·L ⁻¹)	11.68
Total soluble solids (°Brix) / Sólidos solubles totales (°Brix)	1.53
Total organic carbon (mg·L ⁻¹) / Carbón orgánico total (mg·L ⁻¹)	2,984.10
Chemical oxygen demand (mg·L ⁻¹) / Demanda química de oxígeno (mg·L ⁻¹)	25,000 – 30,000
Total polyphenols (mg gallic acid·L ⁻¹) / Polifenoles totales (mg ácido gálico·L ⁻¹)	1,190
pH	12 – 14
Density (kg·m ⁻³) / Densidad (kg·m ⁻³)	1,003.54
Viscosity (Pa·s) / Viscosidad (Pa·s)	0.002301
Free nitrogen (ppm) / Nitrógeno libre (ppm)	200 – 300
Calcium (mg·L ⁻¹) / Calcio (mg·L ⁻¹)	1,526.21
Moisture (%) / Humedad (%)	97.72
Ash (%) / Cenizas (%)	0.767
Crude protein (%) / Proteína cruda (%)	7.42
Crude fat (%) / Grasa cruda (%)	1.48
Crude fiber (%) / Fibra cruda (%)	19.3
Carbohydrates (%) / Carbohidratos (%)	0.862

Adapted from: Acosta-Estrada et al. (2014), Castro-Muñoz and Yáñez-Fernández (2015), González, Reguera, Figueroa, and Martínez (2003), Salmerón-Alcocer et al. (2003), Valderrama-Bravo et al. (2012) and Velasco-Martínez, Angulo, Vázquez-Couturier, Arroyo-Lara, and Monroy-Rivera (1997).

Adaptado de: Acosta-Estrada et al. (2014), Castro-Muñoz y Yáñez-Fernández (2015), González, Reguera, Figueroa, y Martínez (2003), Salmerón-Alcocer et al. (2003), Valderrama-Bravo et al. (2012) y Velasco-Martínez, Angulo, Vázquez-Couturier, Arroyo-Lara, y Monroy-Rivera (1997).

The uses that have been given to nejayote are aimed at recovering components of high added value (González et al., 2003; Niño-Medina et al., 2009; Paz-Samaniego et al., 2015), as a source of enrichment for functional foods (Acosta-Estrada et al., 2014) or as a culture medium for bacterial growth (Blanco-Gámez, Sánchez-González, Valladares, & Olvera, 2008). It has also been investigated how to treat the effluent with flocculant materials (Suarez-Meraz et al., 2016), through membrane technology (Castro-Muñoz & Yáñez-Fernández, 2015) or biological systems (Pulido, Escárcega, & Durán-de Bazúa, 1987), to diminish the polluting action generated by the extract. Based on the above, the aim of this review was to provide an overview of the main methodologies and technological developments that have been implemented to explore the physicochemical properties of nejayote and to provide it with a treatment or application.

Treatments applied to nejayote

González-Martínez (1984) began the search for alternatives to reduce the pollution caused by alkaline liquor; for that purpose, he used two aerobic systems (a fixed-film cascade reactor and the other with activated sludge, 24 and 17 L, respectively) and two anaerobic systems (packed-bed and contact reactors, 11.5 and 9.1 L, respectively). The operating time of the reactors varied from 5 to 20 days. The results showed that the packed-bed and activated sludge reactors were the most

químicas (Cuadro 1), rara vez se ha intentado darle alguna aplicación al extracto.

Los usos que se le han dado al nejayote están encaminados a la recuperación de componentes de valor agregado alto (González et al., 2003; Niño-Medina et al., 2009; Paz-Samaniego et al., 2015), como fuente de enriquecimiento para alimentos funcionales (Acosta-Estrada et al., 2014) o como medio de cultivo para crecimiento de bacterias (Blanco-Gámez, Sánchez-González, Valladares, & Olvera, 2008). También se ha indagado cómo tratar el efluente con materiales floculantes (Suarez-Meraz et al., 2016), mediante tecnología de membranas (Castro-Muñoz & Yáñez-Fernández, 2015) o sistemas biológicos (Pulido, Escárcega, & Durán-de Bazúa, 1987), para disminuir la acción contaminante que el extracto genera. Por lo anterior, el objetivo de esta revisión fue proveer un panorama sobre las principales metodologías y desarrollos tecnológicos que se han implementado para explorar las propiedades físico-químicas del nejayote y proveerle un tratamiento o aplicación.

Tratamientos realizados al nejayote

González-Martínez (1984) inició la búsqueda de alternativas para disminuir la contaminación ocasionada por el licor alcalino; para ello utilizó dos sistemas aerobios (reactor de cascada con película fija y con lodos activados, 24 y 17 L, respectivamente) y dos

efficient in the removal of chemical oxygen demand (COD) (91 and 90 %, respectively) in the first five days of the process, whereas the lowest percentage was shown by the contact reactor (31 %). Based on the efficiency of each process, the author suggested that the pH of the nejayote should be neutralized prior to being subjected to treatment to improve COD removal.

Pulido et al. (1987) conducted assays in rotatory biological reactors of various capacities (15, 50 and 250 L), with the purpose of treating larger effluent volumes (2,500 L). The experimental results revealed that the treatment, in any of the reactors used, considerably reduces the organic matter load in nejayote (96.43, 54.62 and 70.97 %, respectively). Finally, with the use of mathematical models, the authors estimated that the organic load can be reduced by up to 92.02 % (in 2,500 L). The foregoing allows considering the biological systems as capable of reducing the pollution generated by the extract, at least at laboratory level. However, in order to consider them as viable, evaluations on an industrial scale are needed. It is also important to consider and standardize the composition of nejayote because its characteristics and properties depend, to a great extent, on the maize type (Acosta-Estrada et al., 2014), and the degradative capacity of bacteria directly depends on substrate availability.

Krishnan, Ríos, Salinas, and Durán-de Bazúa (1998) used two treatments (primary and secondary) to evaluate their effect on nejayote. Each treatment had three different percolators packed with five different possible materials (gravel, soil sawdust, bark and Sphangum peat moss) (Figure 1), where the treated effluent in each percolator of the primary treatment continued in the same secondary treatment column.

Krishnan et al. (1998) indicated that, in the primary treatment, column A was the one that most reduced pH (4.6 %), whereas column C removed COD more efficiently (45 %) and was also the most efficient for treating the extract. On the other hand, in the secondary treatment, column A decreased pH to 5.2 and column B reduced COD to 15,240 mg·L⁻¹ showing the best results during the process. From this research it can be concluded that the procedures used are a good alternative for nejayote treatment, since the percolating materials are inexpensive and treatment columns are easy to design.

Reyes-Vidal, Aceves-Diez, Martínez-Silva, and Asaff (2012) propose the use of nanofiltration membranes for recovering phenolic acids and fermentable carbohydrates, as well as the reuse of water within the same nixtamalization process. Their results indicate the removal of 83.4 % of total solids, 77.5 % of COD and 70 % of biochemical oxygen demand (BOD).

anaerobios (reactor de lecho empacado y de contacto, 11.5 y 9.1 L, respectivamente). El tiempo de operación de los reactores varió de 5 a 20 días. Los resultados demostraron que los reactores de lecho empacado y de lodo activado fueron los más eficientes en la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) (91 y 90 %, respectivamente) en los primeros cinco días de proceso; mientras que el menor porcentaje lo presentó el reactor de contacto (31 %). Con base en la eficiencia de cada proceso, el autor sugirió que el pH del nejayote debe neutralizarse antes de someterse al tratamiento para mejorar la remoción de la DQO.

Pulido et al. (1987) realizaron ensayos en reactores biológicos rotatorios de diversas capacidades (15, 50 y 250 L), cuya finalidad era tratar volúmenes mayores del efluente (2,500 L). Los resultados experimentales revelaron que el tratamiento, en cualquiera de los reactores utilizados, disminuye la carga de materia orgánica considerablemente en el nejayote (96.43, 54.62 y 70.97 %, respectivamente). Finalmente, con el uso de modelos matemáticos, estimaron que la reducción de carga orgánica puede alcanzar hasta 92.02 % (en 2,500 L). Lo anterior permite considerar a los sistemas biológicos capaces de disminuir la contaminación generada por el extracto, al menos a nivel laboratorio. Sin embargo, para que puedan ser viables faltaría realizar evaluaciones a escala industrial. Además, es importante considerar y estandarizar la composición del nejayote, ya que sus características y propiedades dependen, en gran medida, del tipo de maíz (Acosta-Estrada et al., 2014), y la capacidad degradativa de las bacterias depende directamente de la disponibilidad del sustrato.

Krishnan, Ríos, Salinas, y Durán-de Bazúa (1998) utilizaron dos tratamientos (primario y secundario) para evaluar su efecto en el nejayote. Cada tratamiento tenía tres diferentes percoladores empaquetados con cinco materiales posibles diferentes (grava, tierra, aserrín, corteza y musgo esfango) (Figura 1); donde el efluente tratado en cada percolador del tratamiento primario continuaba en la misma columna del secundario.

Krishnan et al. (1998) indicaron que en el tratamiento primario la columna A fue la que redujo mayormente el pH (4.6%); mientras que la C removió más eficientemente la DQO (45 %) y fue la más eficiente para tratar el extracto. Por otro lado, en el tratamiento secundario, la columna A disminuyó el pH hasta 5.2 y la B redujo la DQO a 15,240 mg·L⁻¹ mostrando los mejores resultados durante el proceso. De esta investigación se puede concluir que los procedimientos utilizados resultan ser una buena alternativa para el tratamiento del nejayote, ya que los materiales percoladores son de costo bajo y las columnas de tratamiento son de diseño fácil.

Reyes-Vidal, Aceves-Diez, Martínez-Silva, y Asaff (2012) proponen el uso de membranas de nanofiltración con

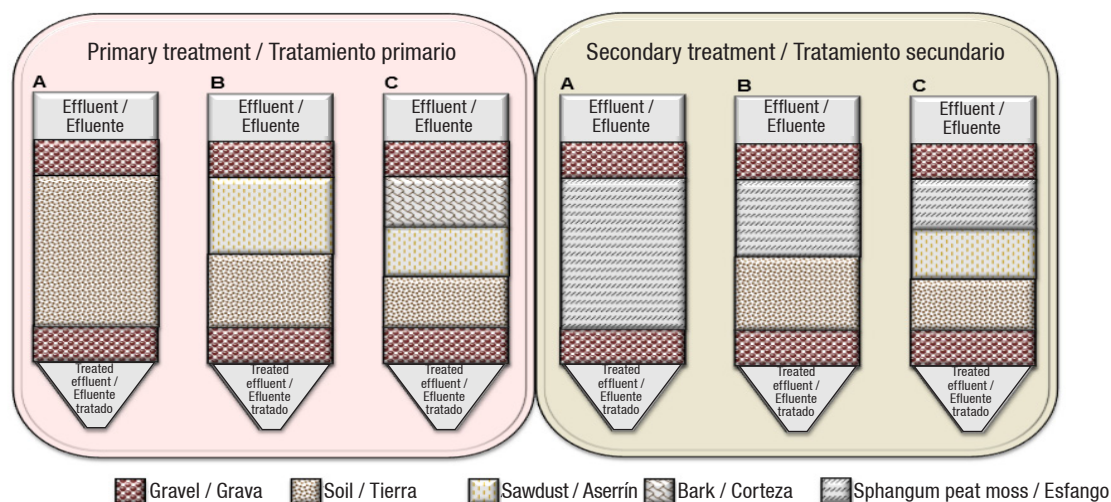


Figure 1. Percolating columns for nejayote treatment (adapted from Krishnan et al., 1998).

Figura 1. Columnas de percolación para tratamiento de nejayote (adaptado de Krishnan et al., 1998).

Castro-Muñoz, Cerón-Montes, Barragán-Huerta, and Yáñez-Fernández (2015a) used an ultrafiltration (UF) system at laboratory level to treat these wastewaters. To do this, they used a polysulphone membrane with 0.2 μm pore size, which reduced (in the permeate flux) total soluble solids by 15.03 %, turbidity by 72.77 %, calcium content by 11.36 %, and total organic carbon by 16.70 % (Table 2). The retentate kept 14.70 % of the carbohydrates (from 10^4 to 10^6 Da) and 18.97 % of total polyphenols (100 to 500 Da). The loss of organic acids could be due to the fouling phenomenon that the

el fin de recuperar ácidos fenólicos y carbohidratos fermentables, así como el reúso del agua dentro del mismo proceso de nixtamalización. Sus resultados indican la remoción de 83.4 % de los sólidos totales, 77.5 % de la DQO y 70 % de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

Castro-Muñoz, Cerón-Montes, Barragán-Huerta, y Yáñez-Fernández (2015a) utilizaron un sistema de microfiltración (MF) a nivel laboratorio para tratar estas aguas de cocción. Para ello, emplearon una membrana

Table 2. Physicochemical properties of nixtamalization wastewater permeates, before and after the membrane process.

Cuadro 2. Propiedades físico-químicas de los permeados de aguas residuales de la nixtamalización, antes y después del proceso con membranas.

Parameter / Parámetro	Nejayote	MF (0.2 μm)	UF (100 kDa)	Integrated system (MF-UF-UF)* / Sistema integrado (MF-UF-UF)*
Total soluble solids ($^{\circ}\text{Brix}$) / Sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Brix}$)	1.53	1.30	0.80	0.00
Total solids (%) / Sólidos totales (%)	1.34	1.02	0.80	0.17
Total organic carbon ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) / Carbón orgánico total ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	2,984.10	2,485.5	1,966.40	381.99
Turbidity / Turbidez	538.09	146.51	6.70	3.78
Calcium ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) / Calcio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	1,078.30	955.70	814.80	--
Total carbohydrates ($\text{mg glucose}\cdot\text{mL}^{-1}$) / Carbohidratos totales ($\text{mg glucosa}\cdot\text{mL}^{-1}$)	3.47	2.96	1.61	0.26
Total polyphenols ($\text{mg gallic acid}\cdot\text{L}^{-1}$) / Polifenoles totales ($\text{mg ácido gálico}\cdot\text{L}^{-1}$)	1,190.74	964.81	950.00	951.85

MF: microfiltration, UF: ultrafiltration

*Coupled system with three membranes: 0.2 μm (MF), 100 kDa (UF) and 1 kDa (UF).

Adapted from: Castro-Muñoz et al. (2015a, b) and Castro-Muñoz and Yáñez-Fernández (2015).

MF: microfiltración, UF: ultrafiltración

*Sistema acoplado con tres membranas: 0.2 μm (MF), 100 kDa (UF) y 1 kDa (UF).

Adaptado de: Castro-Muñoz et al. (2015a, b) y Castro-Muñoz y Yáñez-Fernández (2015).

membrane underwent, mainly due to the reversible obstruction caused by the polysaccharides when saturating the pores and the fouling by polarization, which was generated by the dynamic flux used (Choi, Zhang, Dionysiou, Oerther, & Sorial, 2005; Tejeda, Montesinos, & Guzmán, 1995).

Castro-Muñoz, Orozco-Alvarez, Cerón-Montes, and Yáñez-Fernández (2015b) used an ultrafiltration (UF) system with a 100 kDa membrane, called a nominal molecular weight cut-off (NMWCO). This system allowed reducing the components present in the effluent, so that in the permeate the total soluble solids were reduced by 20 %, turbidity by 95.40 %, calcium content by 14.74 % and the organic load, in terms of total organic carbon, by 29.38 % (Table 2), whereas the retentate after UF concentrated the carbohydrates by 46.69 %.

Castro-Muñoz and Yáñez-Fernández (2015) used a coupled membrane system, better known as an "Integrated Membrane System," defined as a sequential membrane operations design. The objective of the study was to analyze the fractionation of nejayote using three separation stages. The equipment was composed of three polysulphone hollow fiber membranes (MF = 0.2 μm , UF = 100 kDa and 1 kDa). The integrated membrane design was able to reduce in the permeate the total soluble solids (100 %), turbidity (99.5 %) and total organic carbon (87.2 %), as well as concentrated the polyphenols (79.94 %) (Table 2); in addition, the retentate stream maintained 92.5 % of the carbohydrates. The results showed that each membrane is efficient in the removal of solids. Similarly, by the yields obtained in the recovery of the components present, the methodology evaluated showed a high potential to be applied in the treatment of nejayote in the nixtamalization industry.

As mentioned, nixtamalization produces a highly polluting effluent due to the addition of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to perform surface hydrolysis of the grain. Carrera-Campechano et al. (2012) and Rodríguez-Méndez, Figueroa-Cárdenas, Ramos-Gómez, and Méndez-Lagunas (2013) propose replacing lime (CaO) with weaker calcium salts [CaCO_3 , CaCl_2 , CaSO_4 or $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2$] to evaluate their effect on final pH. Although their assessments focus on the chemical composition of the products obtained (flour and tortillas), in relation to polyphenols, anthocyanins and antioxidants, the final pH of hydrolyzed extracts (of white maize) reported by Carrera-Campechano et al. (2012) were 5.5, 6.4, 5.8 and 6.5, respectively, and those determined by Rodríguez-Méndez et al. (2013) were 7.29, 4.92 and 4.28, respectively [they did not evaluate $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2$], whereas the pH reported with lime is 11.95.

Rodríguez-Méndez et al. (2013) indicated that products made with different salts mostly maintain the

de polisulfona con tamaño de poro de 0.2 μm , la cual redujo (en la corriente de permeado) 15.03 % los sólidos solubles totales, 72.77 % la turbidez, 11.36 % el contenido de calcio y 16.70 % el carbón orgánico total (Cuadro 2). El retenido mantuvo 14.70 % de los carbohidratos (de 10^4 a 10^6 Da) y 18.97 % de polifenoles totales (de 100 a 500 Da). La pérdida de los ácidos orgánicos pudo deberse al fenómeno de ensuciamiento que sufrió la membrana, principalmente por la obstrucción reversible ocasionada por los polisacáridos al saturarse los poros y al ensuciamiento por polarización, el cual se generó por el flujo dinámico utilizado (Choi, Zhang, Dionysiou, Oerther, & Sorial, 2005; Tejeda, Montesinos, & Guzmán, 1995).

Castro-Muñoz, Orozco-Álvarez, Cerón-Montes, y Yáñez-Fernández (2015b) utilizaron un sistema de ultrafiltración (UF) con membrana de 100 kDa, denominado corte molecular nominal (NMWCO, por sus siglas en inglés). Dicho sistema permitió reducir los componentes presentes en el efluente, de manera que en el permeado los sólidos solubles totales se redujeron 20 %, la turbidez 95.40 %, el contenido de calcio 14.74 % y la carga orgánica, en términos de carbón orgánico total, 29.38 % (Cuadro 2); mientras que el retenido posterior a la UF concentró los carbohidratos 46.69 %.

Castro-Muñoz y Yáñez-Fernández (2015) emplearon un sistema acoplado de membranas, mejor conocido como "Sistema Integrado de Membranas", definido como un diseño secuencial de operaciones de membrana. El objetivo del estudio era analizar el fraccionamiento del nejayote utilizando tres etapas de separación. El equipo estaba formado por tres membranas de polisulfona en combinación con fibra hueca (MF = 0.2 μm , UF = 100 kDa y 1 kDa). El diseño integrado de membranas logró reducir en el permeado los sólidos solubles totales (100 %), la turbidez (99.5 %), el carbón orgánico total (87.2 %) y concentró los polifenoles (79.94 %) (Cuadro 2); además, la corriente de retenido mantuvo 92.5 % de los carbohidratos. Los resultados mostraron que cada membrana es eficiente en la remoción de sólidos. De igual manera, por los rendimientos obtenidos en la recuperación de los componentes presentes, la metodología evaluada demostró un potencial alto para ser aplicada en el tratamiento del nejayote en la industria nixtamalera.

Como se mencionó, la nixtamalización produce un efluente altamente contaminante debido a la adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para realizar la hidrólisis superficial del grano. Carrera-Campechano et al. (2012) y Rodríguez-Méndez, Figueroa-Cárdenas, Ramos-Gómez, y Méndez-Lagunas (2013) proponen sustituir la sal de uso común por sales de calcio más débiles [CaCO_3 , CaCl_2 , CaSO_4 o $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2$] para evaluar el efecto de éstas sobre el pH final. Aunque sus evaluaciones se enfocan en la composición química de los productos obtenidos

nutritional properties of maize, because the hydrolysis of the grain components (endosperm and pericarp) is less aggressive in comparison to the traditional process. Although this process benefits the characteristics of the products made, it restricts the properties of nejayote (Table 3); this is due to the hardness of the salts, which is reflected in the structural breakdown of the grain (Ruiz-Gutierrez et al., 2010) and in this case, most of the components are maintained in the nixtamal. In spite of this, the obtained effluent has a more neutral pH, turning it into a less polluting residue.

García-Zamora et al. (2015) conducted an enzymatic treatment with laccase and chitosan (as adsorbent) to reduce the COD and ferulic acid content of the alkaline extract. The enzymatic oxidation of ferulic acid was conducted with 10 mL of the extract, 0.3025 nmoles laccase and 40 mL of phosphate buffer (pH 4.5 to 6), allowing the mixture to stand for 10 min; then 1 g of chitosan was added and incubated for 24 h at 35 °C. Subsequently, NaOH was added until a pH of 6 was reached. The precipitates were eliminated through centrifugation (6,000 rpm for 5 min) and washed with 50 % isopropanol. At the end of the experiment, the authors observed a reduction in total polyphenols (70 %) and COD (78 %). Because the process involved the use of an enzyme, it can be considered viable for the reduction of polluting compounds of the effluent, in addition to potential application in the food and pharmaceutical areas.

Suarez-Meraz et al. (2016) used high and low molecular weight chitosan, exposed to different proportions (23, 35, 47, 58, 70 and 117 mg) with nejayote centrifuged at different pH (4.5 to 6.5) to remove the solids from the nixtamalization extract (46.523 g·L⁻¹). They evaluated the turbidity and zeta potential (ζ , capacity

(harina y tortillas), en relación con los polifenoles, antocianinas y antioxidantes, el pH final de los extractos hidrolizados (de maíz blanco) reportados por Carrera-Campechano et al. (2012) fueron 5.5, 6.4, 5.8 y 6.5, respectivamente, y los determinados por Rodríguez-Méndez et al. (2013) fueron 7.29, 4.92 y 4.28, respectivamente [no evaluaron Ca(CH₃CO₂)₂]; mientras que el pH reportado con la sal habitual es de 11.95.

Rodríguez-Méndez et al. (2013) indicaron que los productos elaborados con las distintas sales mantienen mayormente las propiedades nutrimentales del maíz, debido a que la hidrólisis de los componentes del grano (endospermo y pericarpio) es menos agresiva en comparación con la tradicional. Aunque este proceso beneficia las características de los productos elaborados, limita las propiedades del nejayote (Cuadro 3); esto debido a que la dureza de las sales se refleja en el rompimiento estructural del grano (Ruiz-Gutiérrez et al., 2010) y en este caso, la mayoría de los componentes se mantienen en el nixtamal. A pesar de esto, el efluente obtenido presenta pH más neutro, convirtiéndolo en un residuo menos contaminante.

García-Zamora et al. (2015) realizaron un tratamiento enzimático con lacasa y quitosano (como adsorbente) para reducir la DQO y el contenido de ácido ferúlico del extracto alcalino. La oxidación enzimática del ácido ferúlico se llevó a cabo con 10 mL del extracto, 0.3025 nmoles de lacasa y 40 mL de tampón de fosfatos (pH 4.5 a 6), dejando reposar la mezcla durante 10 min; luego, se añadió 1 g de quitosano y se incubó por 24 h a 35 °C. Posteriormente, se adiciono NaOH hasta obtener un pH 6. Los precipitados se eliminaron mediante centrifugación (6,000 rpm por 5 min) y se lavaron con isopropanol al 50 %. Al término del experimento, observaron disminución de polifenoles totales (70 %) y

Table 3. Chemical composition of the nejayote solids from nixtamalization with different calcium salts.

Cuadro 3. Composición química de los sólidos del nejayote proveniente de la nixtamalización con diferentes sales de calcio.

Parameter / Parámetro	Ca(OH) ₂	CaCl ₂	CaCO ₃	CaSO ₄	Ca(CH ₃ CO ₂) ₂
Ash (%) / Cenizas (%)	31.2	45.6	40.5	34.1	40.5
FAt (%) / Grasa (%)	0.3	0.2	0.4	0.9	0.9
Protein (%) / Proteína (%)	2.9	5	3.1	3.9	4.4
Total dietary fiber (%) / Fibra dietética total (%)	41.2	19.6	23.6	15.6	10.8
Total soluble fiber (%) / Fibra soluble total (%)	30.4	7.9	6.2	7.9	7.6
Insoluble dietary fiber (%) / Fibra dietética insoluble (%)	10.8	11.6	17.4	7.8	3.2

Ca(OH)₂: calcium hydroxide, CaCl₂: calcium chloride, CaCO₃: calcium carbonate, CaSO₄: calcium sulfate, Ca(CH₃CO₂)₂: calcium acetate.

Adapted from Carrera-Campechano et al. (2012).

Ca(OH)₂: hidróxido de calcio, CaCl₂: cloruro de calcio, CaCO₃: carbonato de calcio, CaSO₄: sulfato de calcio, Ca(CH₃CO₂)₂: acetato de calcio.

Adaptado de Carrera-Campechano et al. (2012).

of the colloids to adsorb ions and dipolar molecules [Aguilar, Sáez, Lloréns, Soler, & Ortuño, 2002]) that each suspension presented. They showed that the maximum ζ for low molecular weight chitosan was -2.5 and for the other -0.7. In total, 46 % of total solids was removed (using 2.35 or 2.9 g of low and high molecular weight chitosan, respectively, per liter of nejayote at pH 5.5) and with both polymers turbidity was reduced by 80 %. The values of ζ indicated that chitosan is highly encapsulating, since the agglomeration was the maximum possible. The effluent failed to be within the permissible limits for solids in wastewaters (200 mg·L⁻¹ maximum), as indicated by the Official Mexican Standard (NOM-001-SEMARNAT-1996, *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* (SEMARNAT), 1996); they only obtained an extract that was less aggressive with the environment.

Main nejayote applications

The intention of using nejayote has been reported for more than two decades. Velasco-Martínez et al. (1997) used nejayote solids, obtained by sedimentation-centrifugation, in combination with soy and sorghum as the diet for broilers. The purpose of the study was to evaluate the growth of the animals for seven weeks, for which they were provided 3,200 kcal·kg⁻¹ based on formulations of different proportions of solids (2, 4 and 6 %, plus a commercial feed as a control).

Velasco-Martínez et al. (1997) reported that the livestock fed with commercial feed weighed 2.686 kg on average, whereas the animals fed with the formulations weighed 2.696, 2.689 and 2.835 kg, respectively. This demonstrated that the protein and calcium provided by the solids play an important role in the nutrition, growth and development of livestock. Similarly, it was reported that the animals had no physical changes, and that mortality was not affected in the treatment period. The study provides evidence that the solids can be used as fodder in the feeding of this type of livestock, including benefits not only to the environment but also to performance due to the weight gain of the animals during the rearing period.

Domínguez-Espinosa and Pacho-Carrillo (2003) produced enzymes with amylolytic activity by incubating *Aspergillus awamori* in nixtamalization extract; these enzymes helped to degrade the effluent. The fermentation started with pH 4.5 and lasted 100 h, resulting in amylolytic activity of 16 IU, which caused a reduction of 42 % in soluble solids and up to 21 % in COD. While the study contributes to the treatment of industrial residue, it also proposes establishing a nejayote bio-processing plant with a 10 m³ capacity, which would produce 13.5 g of enzymatic extract with a potential for 82 UI·g⁻¹ and 695 g of biomass (with 18 %

de la DQO (78 %). Debido a que el proceso involucró el uso de una enzima, permite ser considerado viable para la reducción de compuestos contaminantes del efluente; además de aplicación potencial en el área alimenticia y farmacéutica.

Suarez-Meraz et al. (2016) utilizaron quitosano de alto y bajo peso molecular, expuestos a diferentes proporciones (23, 35, 47, 58, 70 y 117 mg) con el nejayote centrifugado a distintos pH (4.5 a 6.5) para eliminar los sólidos del extracto de la nixtamalización (46.523 g·L⁻¹). Evaluaron la turbidez y el potencial zeta (ζ , capacidad de los coloides para adsorber iones y moléculas dipolares [Aguilar, Sáez, Lloréns, Soler, & Ortuño, 2002]) que presentaba cada suspensión. Demostraron que el máximo ζ para el quitosano de bajo peso molecular fue de -2.5 y para el otro de -0.7. Se removió 46 % de sólidos totales (utilizando 2.35 o 2.9 g de quitosano de bajo y alto peso molecular, respectivamente, por litro de nejayote a pH de 5.5) y con ambos polímeros se redujo la turbidez 80 %. Los valores del ζ indicaron que el quitosano es altamente encapsulante, ya que la aglomeración fue la máxima posible. El efluente no logró estar dentro de los límites permisibles de sólidos en aguas residuales (máximo 200 mg·L⁻¹), tal como lo indica la norma oficial mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996, *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* [SEMARNAT], 1996), únicamente obtuvieron un extracto menos agresivo con el ambiente.

Principales aplicaciones del nejayote

La intención de usar el nejayote se reporta desde hace más de dos décadas. Velasco-Martínez et al. (1997) utilizaron los sólidos del extracto, obtenidos por sedimentación-centrifugación, en combinación con soya y sorgo como base de la alimentación de ganado avícola. Esto con la finalidad de evaluar el crecimiento de los animales durante siete semanas, para lo cual se les suministraron 3,200 kcal·kg⁻¹ con base en formulaciones de diferentes proporciones de sólidos (2, 4 y 6 %, más un alimento comercial como control).

Velasco-Martínez et al. (1997) reportaron que el ganado que consumió el alimento comercial pesó en promedio 2.686 kg; mientras que el que se alimentó con las formulaciones pesó 2.696, 2.595 y 2.835 kg, respectivamente. Lo anterior demostró que la proteína y el calcio proporcionados por los sólidos juegan un papel importante en la nutrición, crecimiento y desarrollo del ganado. De igual manera, se reportó que los animales no tuvieron cambios físicos, ni la mortalidad se vio afectada en el periodo de tratamiento. El estudio deja evidencia de que los sólidos pueden ser utilizados como forraje en la alimentación de este tipo de ganado con beneficios no sólo ambientales sino

protein). The biomass would be used as animal fodder, enabling the recovery of the initial plant investment in two years.

González et al. (2003) used nejayote as an agglutinant to form carbon black (CB) agglomerates. They analyzed the properties presented by CB using the effluent and other additives (water, furfuryl alcohol [FA] and potassium lingsulfonate [PLS]). Their results showed that nejayote pellets have cohesive strength similar to that of pellets generated with commercial additives, and electrical conductivity exceeding that of pellets manufactured with FA and very similar to PLS ones (Table 4). This shows that despite being a waste material, nejayote can be used as an agglutinant not only of CB, but also of other materials with applications in the wiring or insulator industries. In this regard, its use as an input represents an interesting application in the polymer industry.

de rendimiento debido a la ganancia de peso de los animales durante la crianza.

Domínguez-Espinosa y Pacho-Carrillo (2003) produjeron enzimas con actividad amilolítica al incubar *Aspergillus awamori* en el extracto de la nixtamalización; tales enzimas ayudaron a degradar el efluente. La fermentación inició con pH de 4.5 y se prolongó durante 100 h, propiciando la actividad amilolítica de 16 UI, lo que se traduce en la reducción de 42 % de los sólidos solubles y hasta 21 % de la DQO. Si bien el estudio contribuye al tratamiento del residuo industrial, también propone una planta bio-transformadora de nejayote con capacidad de 10 m³; la cual produciría 13.5 g de extracto enzimático con potencia de 82 UI·g⁻¹ y 695 g de biomasa (con 18 % de proteína). Esto último como propuesta de forraje animal, cuya inversión inicial se recuperaría en dos años.

Table 4. Electrical and physical properties of carbon black agglomerates.

Cuadro 4. Propiedades eléctricas y físicas de los aglomerados de carbón negro.

Additive / Aditivo	Density (g·cm ⁻³) / Densidad (g·cm ⁻³)	Cohesive strength (g·mm ⁻¹) / Fuerza de agrietamiento (g·mm ⁻¹)	Electrical conductivity (Ω ⁻¹ ·cm ⁻¹) / Conductividad eléctrica (Ω ⁻¹ ·cm ⁻¹)
Without additive / Sin aditivo	0.0613	40	0.25
Commercial (NH-234) / Comercial (NH-234)	0.1055	50	0.44
Potassium lingsulfonate / Lignosulfato de potasio	0.1366	716	0.99
Furfuril alcohol	0.1594	660	0.39
Water / Agua	0.0993	50	0.28
Nejayote	0.2818	649	0.73

Adapted from González et al. (2003).

Adaptado de González et al. (2003).

Salmerón-Alcocer et al. (2003) treated nejayote biologically with microorganisms isolated from soil contaminated by the same effluent. They used a triple-cascade bioreactor system (Figure 2) and used the residue as a culture medium for *Paenibacillus amylolyticus*, *Pseudomonas putida* and *Acinetobacter spp.* The results showed a decrease in COD from 28,000 to 3,612 ppm after treatment; moreover, the COD generated by supplying (NH₄)₂SO₄ and KH₂PO₄ (with 1 and 0.3 g·L⁻¹, respectively), as an enrichment of the medium, fell by 87.3 and 87.6 %, respectively. Additionally, due to the nature of the isolated bacteria, they may be of interest to the oil industry, since these microorganisms are used to degrade aromatic hydrocarbons and their derivatives (phenol, benzene, toluene and xylene) (Riser-Roberts, 1998).

Carvajal-Millán, Rascón-Chu, and Márquez-Escalante (2005) patented the process of obtaining maize gum from nixtamalization residue. The process consists of eight general stages: 1) obtaining nejayote, 2) filtrating

González et al. (2003) utilizaron el nejayote como medio aglutinante para formar aglomerados de carbón negro (CB). Analizaron las propiedades que presentaba el CB usando el efluente y otros aditivos (agua, alcohol furfuril [FA] y lingsulfonato de potasio [LSP]). Sus resultados mostraron que los pellets de nejayote tienen resistencia al agrietamiento similar a los generados con aditivos comerciales, además de conductividad eléctrica superior a los pellets fabricados con FA y muy similar a los de LSP (Cuadro 4). Lo anterior demuestra que a pesar de ser un material de desecho, el nejayote puede utilizarse como aglutinante no solo del CB, sino también de otros materiales con aplicaciones en industrias de cableado o aislantes. En este sentido, su uso como insumo representa una aplicación interesante en la industria de polímeros.

Salmerón-Alcocer et al. (2003) trataron biológicamente el nejayote con microorganismos aislados de suelo contaminado por el mismo efluente. Utilizaron un sistema de biorreactores en cascada triple (Figura 2)

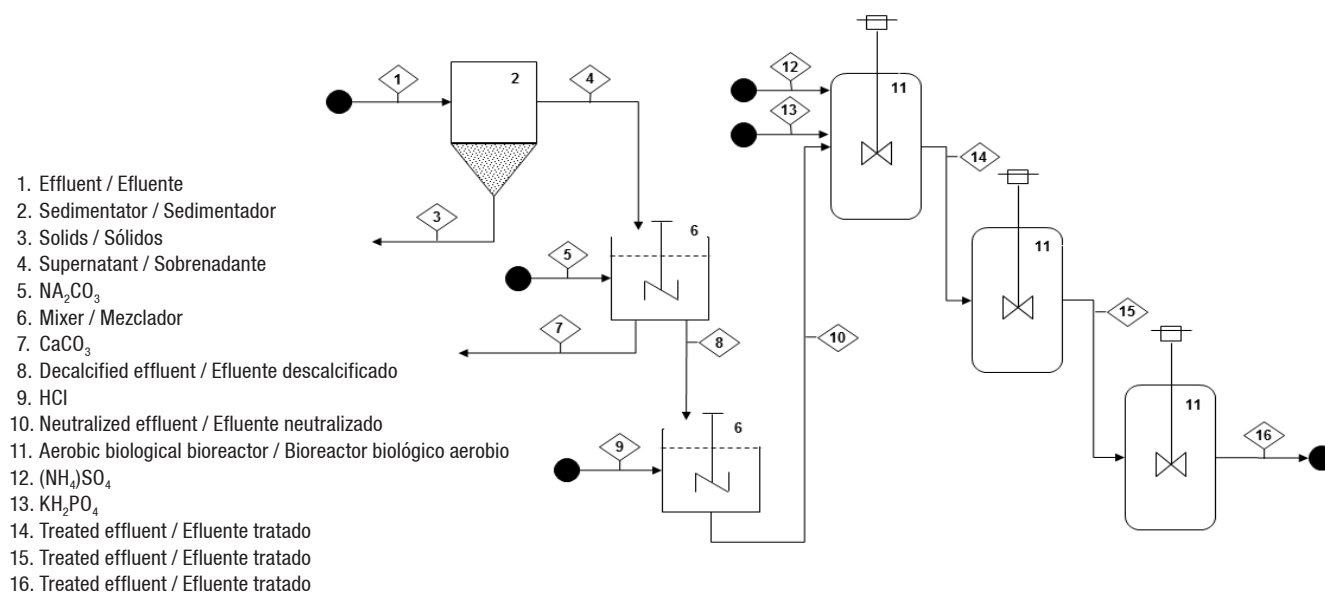


Figure 2. Triple-cascade aerobic system for nejayote treatment (adapted from Salmerón-Alcocer et al., 2003).

Figura 2. Sistema aeróbico de triple cascada para tratamiento de nejayote (adaptado de Salmerón-Alcocer et al., 2003).

the extract, 3) centrifuging the filtrate, 4) acidifying the supernatant, 5) precipitating by standing, 6) filtering the gum, 7) washing the gum and 8) drying the gum. The research suggests using the residue within 4 h after the nixtamalization process. Based on this methodology, Niño-Medina, Carvajal-Millán, Gardea-Bejar, Rascón-Chu, and Márquez-Escalante (2007) characterized gum obtained from the alkaline effluent. According to the study, they obtained AX with 75 % purity (w/w), of which 47 % was identified as xylose and 28 % as arabinose. Due to the gelling capacity of the AX, gel formation was conducted with the enzyme laccase at 4 % (w/v). In the results, they rated the gum obtained as a potential food industry material.

Durán-de Bazúa, Sánchez-Tovar, Hernández-Morales, and Bernal-González (2007) used an aerobic system to treat the byproduct of low-capacity (0.5 to $50 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$) nixtamal industries and an anaerobic-aerobic system for mills with greater capacity ($2,500 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$) (Figure 3), in order to obtain reusable water in the same process and, at the same time, generate energy from the methane produced. The authors reported that in small mills the treatment was barely profitable, since the energy expenditure was higher. In the higher-capacity mill, production was 9.6 to 16.8 m^3 of methane per ton of maize, which was used to generate energy, 23 kg of solid residue and 10.6 kg of biomass, with which pellets for fish feed were made. In addition, the treated water was reused.

Ferreira-Rolón, Ramírez-Romero, and Ramírez-Vives (2014) used a 1.9-L UASB reactor to treat the wastewater from various maize mills in order to produce methane through

y emplearon el residuo como medio de cultivo para *Paenibacillus amylolyticus*, *Pseudomonas putida* y *Acinetobacter spp.* Los resultados demostraron disminución en la DQO de $28,000$ a $3,612 \text{ ppm}$ después del tratamiento; además, la DQO generada por el suministro de las $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y KH_2PO_4 (con 1 y $0.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente), como enriquecimiento del medio, se redujo 87.3 y 87.6% , respectivamente. Adicionalmente, por la naturaleza de las bacterias aisladas, pueden ser de interés para la industria del petróleo, ya que estos microorganismos se emplean para degradar hidrocarburos aromáticos y sus derivados (fenol, benceno, tolueno y xileno) (Riser-Roberts, 1998).

Carvajal-Millán, Rascón-Chu, y Márquez-Escalante (2005) patentaron la obtención de goma de maíz a partir del residuo de la nixtamalización. El proceso consta de ocho etapas generales: 1) obtención del nejayote, 2) filtración del extracto, 3) centrifugación del filtrado, 4) acidificación del sobrenadante, 5) precipitación por reposo, 6) filtración de la goma, 7) lavado de la goma y 8) secado de la goma. La investigación sugiere el uso del residuo dentro de las 4 h después de realizado el proceso de nixtamalización. Con base en esta metodología, Niño-Medina, Carvajal-Millán, Gardea-Bejar, Rascón-Chu, y Márquez-Escalante (2007) caracterizaron goma obtenida a partir del efluente alcalino. De acuerdo con el estudio, obtuvieron AX con 75 % de pureza (p/p); de los cuales, 47 % se identificó como xilosa y 28 % como arabinosa. Debido a la capacidad gelificante de los AX, la formación de gel se realizó con la enzima lacasa al 4 % (p/v). En los resultados calificaron a la goma obtenida como material potencial en la industria alimentaria.

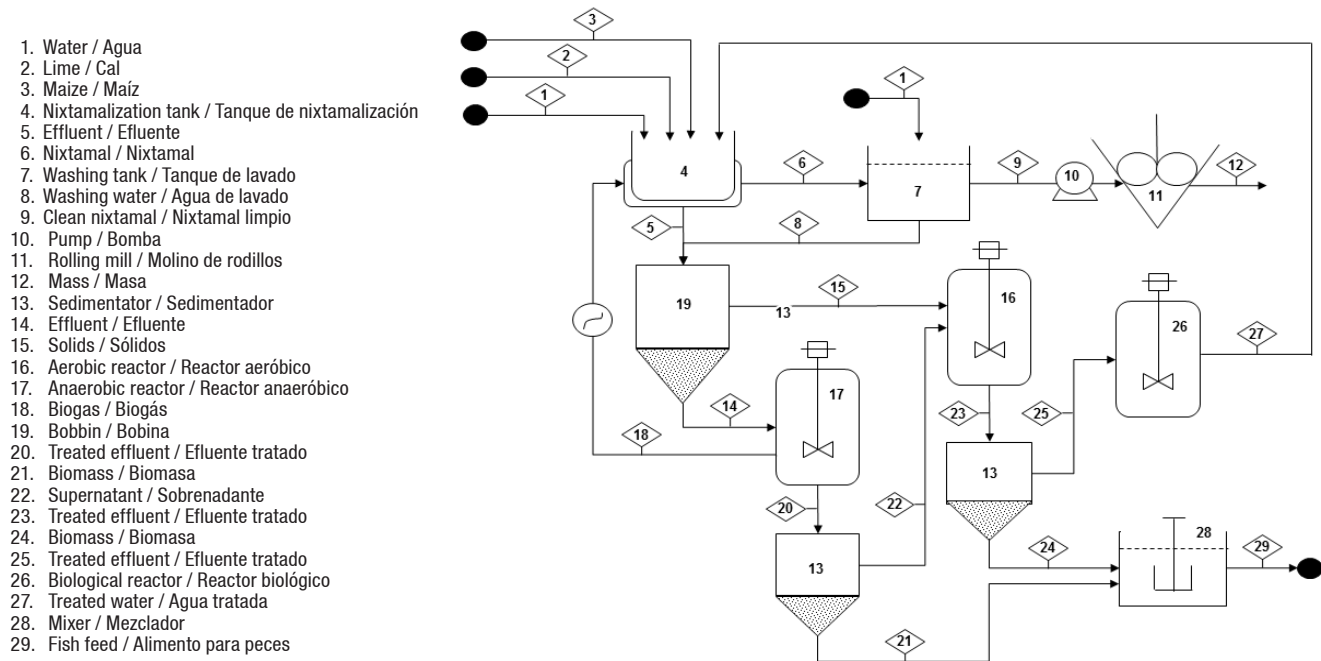


Figure 3. Anaerobic-aerobic system for wastewater treatment in large mills (adapted from Durán-de Bazúa et al., 2007).

Figura 3. Sistema anaeróbico-aeróbico para tratamiento de aguas residuales en plantas grandes (adaptado de Durán-de Bazúa et al., 2007).

seven stages. The mixture was subjected to mechanical sedimentation to remove more than 50 % of the initial solids; subsequently, two systems were generated to evaluate the bubbling effect (CO_2) in the precipitation of calcium carbonate (from the nixtamalization process itself). The first was through direct bubbling in the supernatant obtained from the sedimentation, and the second was with bubbling in a mixture of supernatant with residual sludge (from a food industry), which contained 28.8 g of volatile solids per liter.

In both systems the greatest efficiency occurred at 35 min of bubbling, with the sludge being 15 % higher (52.3 % efficiency). Subsequently, the extracts were placed in the reactor for anaerobic degradation with sludge (ratio of 1:0.4 v/v); in the first four stages of the process, the feed was adjusted to different volumetric organic loads (VOL) (1.8, 2.7, 1.5 and 0.9 g $\text{COD}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively). In the last three stages the reactor was fed with the nejayote supernatant. The generation of methane in each stage was different (1.54, 3.42, <1.05, 1.25, 1.96, >1.52 and >1.52 $\text{L}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively), directly depending on the initial VOL.

Finally, the process achieved the removal of more than 90 % of total organic matter, showing that when nejayote is subjected to a previous CO_2 bubbling up to 90 % of the biogas produced is methanol. Based on the foregoing, Ferreira-Rolón et al. (2014) suggest a scale system to treat 3 m^3 of nejayote per day, which promises 50 % recovery of solids and calcium sedimentation, as well as improving the methane generation (90 %) in the biogas.

Durán-de Bazúa, Sánchez-Tovar, Hernández-Morales, y Bernal-González (2007) emplearon un sistema aeróbico para tratar el subproducto de plantas nixtamaleras de capacidad baja (0.5 a $50 \text{ m}^3\cdot\text{día}^{-1}$) y un sistema acoplado anaeróbico-aeróbico para plantas con capacidad mayor ($2,500 \text{ m}^3\cdot\text{día}^{-1}$) (Figura 3); esto con la finalidad de obtener agua reutilizable en el mismo proceso y, al mismo tiempo, generar energía a partir del metano producido. Los autores reportaron que en plantas pequeñas el tratamiento era poco redituable, ya que el gasto de energía fue mayor. En la planta con capacidad mayor, la producción fue de 9.6 a 16.8 m^3 de metano por tonelada de maíz, el cual se destinó a la generación de energía, 23 kg de residuos sólidos y 10.6 kg de biomasa, con los que se elaboraron pellets para alimento de peces. Además, el agua tratada se reusó.

Ferreira-Rolón, Ramírez-Romero, y Ramírez-Vives (2014) emplearon un reactor UASB de 1.9 L para tratar el agua residual proveniente de distintos molinos de maíz con el fin de producir metano a través de siete etapas. La mezcla se sometió a una sedimentación mecánica para retirar más de 50 % de sólidos iniciales; posteriormente se generaron dos sistemas para evaluar el efecto de burbujeo (CO_2) en la precipitación del carbonato de calcio (propio del proceso de nixtamalización). El primero fue mediante el burbujeo directo en el sobrenadante obtenido de la sedimentación, y el segundo fue con el burbujeo en una mezcla de sobrenadante con lodos residuales (provenientes de una industria de alimentos), los cuales contenían 28.8 g de sólidos volátiles por litro.

Given the results, the last two studies are useful for companies that might make use of the byproducts generated by the treatment, whose benefits are: 1) wastewater treatment through disposal of the effluent, and 2) remuneration for the generation of products of potential use.

Blanco-Gómez et al. (2008) isolated and characterized bacteria from a culture medium composed of nejayote. They demonstrated that the microorganisms present in the medium were gram-positive bacteria and had catalytic activity. In addition, the results showed that the isolated bacteria had 96 to 99 % similarity with *Bacillus megaterium*, which is of pharmaceutical importance because it produces the enzyme Penicillin G acylase with bio-catalyzing ability in the production of semisynthetic β -lactams (Nucci, Silva, Gomes, Giordano, & Cruz, 2005). These are used as antibiotics to eliminate gram-positive bacteria, interfering with the peptidoglycans that form the cell wall and inhibiting biosynthesis in it (Tortora-Gerard, Funke-Berdell, & Case-Christine, 2007; Voet & Voet, 2006), thereby combating various infections. In addition, costs generated by the input, in the implementation of synthetic media, could be minimized by using nejayote.

Niño-Medina et al. (2009) and Paz-Samaniego et al. (2015) extracted the solids from nejayote to evaluate AX compounds and polyphenols present in the residue. Paz-Samaniego et al. (2015) varied the nixtamalization time to evaluate its effect on the production of the components of interest. Although they used similar methodologies, Niño-Medina et al. (2009) obtained higher yield values (81 % AX) and 20 to 30 times more ferulic acid (Table 5).

The variation in results in the two reports is related to the quality of the raw materials (maize and alkaline agent)

En ambos sistemas, la mayor eficiencia se mostró a los 35 min de burbujeo, siendo 15 % mayor el de lodos residuales (52.3 % de eficiencia). Posteriormente, los extractos se pasaron al reactor para la degradación anaerobia con lodos residuales (relación 1:0.4 v/v); en donde las primeras cuatro etapas del proceso, la alimentación se ajustó a diferentes cargas orgánicas volumétricas (COV) (1.8, 2.7, 1.5 y 0.9 g DQO·L⁻¹·d⁻¹, respectivamente). En las últimas tres etapas el reactor se alimentó con el sobrenadante de nejayote. La generación de metano en cada etapa fue diferente (1.54, 3.42, <1.05, 1.25, 1.96, >1.52 y >1.52 L·L⁻¹·d⁻¹, respectivamente), dependiendo directamente de la COV inicial.

Finalmente, el proceso logró la remoción de más de 90 % de la materia orgánica total, mostrando que cuando el nejayote se somete a un burbujeo previo con CO₂ hasta 90 % del biogás producido es metanol. Con base en lo anterior, Ferreira-Rolón et al. (2014) proponen un sistema a escala que trate 3 m³ de nejayote por día, el cual promete 50 % de recuperación de sólidos y sedimentación del calcio, así como la generación de metano del 90 % del biogás total.

Ante los resultados, los últimos dos estudios exhiben utilidad para las empresas que pueden aprovechar los subproductos generados por el tratamiento, cuyos beneficios pueden ser: 1) tratamiento al residuo mediante la disposición del efluente y 2) remuneración por la generación de productos de uso potencial.

Blanco-Gómez et al. (2008) aislaron y caracterizaron bacterias de un medio de cultivo compuesto de nejayote. Demostraron que los microorganismos presentes eran bacilos gram positivos y tenían actividad catalítica. Aunado a ello, los resultados mostraron que las bacterias aisladas eran de 96 a 99 % similares a *Bacillus*

Table 5. Arabinoxylans in nejayote gum.

Cuadro 5. Arabinoxilanos presentes en la goma de nejayote.

Compound type/ Tipo de compuesto	Component /Componente	Content /Contenido	
		Niño-Medina et al. (2009)	Paz-Samaniego et al. (2015)
Arabinoxylans/ Arabinoxilanos	Arabinose (g·100 g ⁻¹ AX)/Arabinosa (g·100 g ⁻¹ AX)	32.00	0.9*
	Xilose (g·100 g ⁻¹ AX)/Xilosa (g·100 g ⁻¹ AX)	49.00	0.5**
Polyphenols/ Polifenoles	Ferulic acid (μg·mg ⁻¹ AX)/Ácido ferúlico (μg·mg ⁻¹ AX)	0.23	0.012*
	Diferulic acid (μg·mg ⁻¹ AX)/Ácido di-ferúlico (μg·mg ⁻¹ AX)	0.58	--
	Triferulic acid (μg·mg ⁻¹ AX)/Ácido tri-ferúlico (μg·mg ⁻¹ AX)	0.30	--

AX: arabinoxylans

*Result for 24-hour alkaline hydrolysis

**Result for 4-hour alkaline hydrolysis

AX: arabinoxilanos

*Resultado para hidrólisis alcalina de 24 horas.

**Resultado para hidrólisis alcalina de 4 horas.

used in nixtamalization and to the conditions under which the process was carried out. However, because of the functional characteristics possessed by the AX, they are considered important for the food industry as stabilizing agents since they provide viscosity, texture and structure to bakery products (Matos-Chamorro & Chambilla-Mamani, 2010). In addition, the feruloylated AX are an important source of antioxidants and dietary fiber, not only relevant in the making of bread and beer, but also in the pharmaceutical industry that has demonstrated the link between antioxidants and chronic diseases (Niño-Medina et al., 2010).

Gutiérrez-Urbe, Rojas-García, García-Lara, and Serna-Saldívar (2010) and Rojas-García, García-Lara, Serna-Saldívar, and Gutiérrez-Urbe (2012) extracted phenolic compounds of nejayote from six varieties of maize (blue maize [BLU], high-carotenoid maize [HCA], normal white maize [NWH], normal yellow maize [NYE], quality protein maize [QPM] and red maize [RED]). Both studies used the same nixtamalization parameters; however, Gutiérrez-Urbe et al. (2010) suggest that the QPM alkaline broth presents a higher total polyphenols content (650 mg GAE·100 g⁻¹), whereas Rojas-García et al. (2012) place the RED extract (87.98 mg GAE·g⁻¹) in this category. On the other hand, ferulic acid is more present in the QPM extract (3,539.2 mg·100 g⁻¹ and 388.38 mg·g⁻¹, respectively, in each study). The results suggest variation in the characteristics of the grain itself relative to the place of cultivation and the purity of the alkali used in nixtamalization. The latter is directly related to hydrolysis efficiency of the maize components (Pappa, Palacios, & Bressani, 2010).

Sanchez-Gonzalez et al. (2011) isolated two microorganisms from nejayote (NJY2 and NJY4), which by their morphology and physiological characteristics proved to be a species of *Bacillus*. When comparing their genome with various species, they had almost 100 % similarity with *Bacillus flexus*, facultative alkaliphilic salt tolerant microorganisms. Subsequently, they studied strain NJY2 and found that it had xylanolytic capacity, since by sequencing 10 families of glycohydrolases they identified endo-1,4-β-xylanase and esterase enzymes; the latter only acted at pH above neutrality, specifically in ferulic acid or some other esters. In addition, they determined that the calcium from the nixtamalization process increased the production of esterases by strain NJY2.

Both endo-1,4-β-xylanase and esterase are important in the paper industry since together they remove up to 95 % of the lignin in wood, which provides the final physical characteristics to paper (Ponce-Noyola & Pérez-Avalos, 2002). Also, in the food industry they are involved in clarifying juices and wines (Ponce-Noyola & Pérez-Avalos, 2002), obtaining flavorings (vanillin)

megaterium; la cual es de importancia farmacéutica debido a que es productora de la enzima penicilina G acilasa con capacidad biocatalizadora en la producción de β-lactámicos semisintéticos (Nucci, Silva, Gomes, Giordano, & Cruz, 2005). Éstos son utilizados como antibióticos para eliminar bacterias gram positivas, interfiriendo con los peptidoglucanos que forman la pared celular y provocando la inhibición de la biosíntesis de la misma (Tortora-Gerard, Funke-Berdell, & Case-Christine, 2007; Voet & Voet, 2006); combatiendo así diversas infecciones. Además, los costos generados por el insumo, en la implementación de medios sintéticos, podrían minimizarse al utilizar nejayote.

Niño-Medina et al. (2009) y Paz-Samaniego et al. (2015) extrajeron los sólidos del nejayote para evaluar los compuestos AX y polifenoles presentes en el residuo. Paz-Samaniego et al. (2015) variaron el tiempo de nixtamalización para apreciar el efecto que tenía en la producción de los componentes de interés. Aunque utilizaron metodologías similares, Niño-Medina et al. (2009) obtuvieron valores superiores de rendimiento (81 % de AX) y de 20 a 30 veces más de ácido ferúlico (Cuadro 5).

La variación de resultados en ambos reportes se relaciona con la calidad de las materias primas (maíz y agente alcalino) usadas en la nixtamalización y las condiciones a las que se llevó a cabo el proceso. No obstante, por las características funcionales que poseen los AX se consideran importantes para la industria alimentaria como agentes estabilizantes, ya que proveen viscosidad, textura y estructura a los productos de panificación (Matos-Chamorro & Chambilla-Mamani, 2010). Además, los AX ferulados son una fuente importante de antioxidantes y fibra dietética, no sólo relevante en la fabricación pan y cerveza, sino también en la industria farmacéutica que ha demostrado el vínculo entre los antioxidantes y las enfermedades crónicas (Niño-Medina et al., 2010).

Gutiérrez-Urbe, Rojas-García, García-Lara, y Serna-Saldívar (2010) y Rojas-García, García-Lara, Serna-Saldívar, y Gutiérrez-Urbe (2012) extrajeron compuestos fenólicos de nejayote de seis variedades de maíz (maíz azul [BLU], maíz con alto contenido de carotenoides [HCA], maíz blanco [NWH], maíz amarillo [NYE], maíz con calidad proteica [QPM] y maíz rojo [RED]). Ambos estudios utilizaron los mismos parámetros de nixtamalización; sin embargo, Gutiérrez-Urbe et al. (2010) sugieren que el caldo alcalino de QPM presenta un contenido mayor de polifenoles totales (650 mg GAE·100 g⁻¹), mientras que Rojas-García et al. (2012) posicionan en esta categoría al extracto de RED (87.98 mg GAE·g⁻¹). Por otro lado, el ácido ferúlico está más presente en el extracto de QPM (3,539.2 mg·100 g⁻¹ y 388.38 mg·g⁻¹, respectivamente en cada estudio). Los

from ferulic acid (Sánchez-González et al., 2011), and improving the texture and flavor of bakery products (Ponce-Noyola & Pérez-Avalos, 2002)

Ramírez-Romero, Reyes-Velazquez, and Cruz-Guerrero (2013) used nejayote from three different maize mills as a culture medium for lactic acid bacteria (*Lactobacillus rhamnosus*, *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus helveticus*) to generate probiotics with production of bacteriocins. They fermented 50 mL of the supernatant of each extract for 48 h at 37 °C. They evaluated bactericidal activity with *Echerichia coli* and *Listeria innocua*, which were cultured individually in the supernatant of the fermentation for 3 h, and at 37 °C and 150 rpm. They observed that the strains grew mainly in nejayote with reducing sugars, protein and carbohydrates (1.12, 17.6 and 86.39 %, respectively). The bacterium with the strongest inhibitory action against *E. coli* (10 %) and *L. innocua* (13 %) was *L. helveticus*, which they attributed to the bacteriocins developed in the strains. Thus, the study generated an alternative use of nejayote as a growth and development medium for microorganisms with biological capacity as an antimicrobial barrier at digestive tract level.

Ayala-Soto, Serna-Saldívar, García-Lara, and Pérez-Carrillo (2014) assessed the hydroxycinnamic acids, sugar composition and antioxidant capacity of arabinoxylans (AX) extracted from different maize sources: maize fiber, insect-resistant maize pericarp, insect-susceptible maize pericarp and nejayote. The highest AX yield was with maize fiber (20.9 %), with 2 % more than nejayote. With regard to sugar content, the nejayote showed the highest concentration of glucose and galactose (3.79 and 4.97 g·100 g⁻¹ AX, respectively). The insect-resistant maize pericarp presented the highest total polyphenol content (350 mg GAE·100 g⁻¹), 42 % more than nejayote, concentration of identified hydroxycinnamic acids (1.89 µg·mg⁻¹ AX) and antioxidant capacity (6 mM TE·100 g⁻¹); this last element is 50 % higher than the nejayote. The foregoing indicates a direct relationship between these compounds.

The previous research shows the potential of the waste, since various AX sources are used for the making of maize-based food products; however, nejayote is an unappreciated byproduct, without treatment and without apparent commercial value. However, phenolic compounds are considered to be high value-added substances and part of dietary fiber, and are also valued for their prebiotic property and their participation as immunomodulators against degenerative diseases such as cancer (Mendis & Simsek, 2014).

Acosta-Estrada et al. (2014) used the solids contained in the effluent (11.68 g·L⁻¹) and wheat gluten (4:1 ratio) to make bakery products. They noted that the

resultados sugieren variación en las características propias del grano respecto del lugar de cultivo y la pureza del álcali usado en la nixtamalización. Éste último se relaciona directamente con la eficiencia de la hidrólisis de los componentes del maíz (Pappa, de Palacios, & Bressani, 2010).

Sánchez-González et al. (2011) aislaron dos microorganismos del nejayote (NJY2 y NJY4), mismos que por su morfología y características fisiológicas resultaron ser una especie de *Bacillus*. Al comparar su genoma con varias especies tuvieron similitud de casi 100 % con *Bacillus flexus*, microorganismos alcalófilos facultativos y halotolerantes. Posteriormente, estudiaron la cepa NJY2 y encontraron que poseía capacidad xilanólítica, ya que al secuenciar 10 familias de glicohidrolasas se identificaron enzimas endo-1,4-β-xilanasas, y esterases; estas últimas sólo actuaban a pH por arriba de la neutralidad, específicamente en el ácido ferúlico o algunos otros ésteres. Además, determinaron que el calcio proveniente del proceso de nixtamalización aumentaba la producción de esterases por la cepa NJY2.

Tanto la endo-1,4-β-xilanasas como la esterasa son importantes en la industria del papel ya que en conjunto remueven hasta 95 % de la lignina de la madera, lo que provee las características físicas finales al papel (Ponce-Noyola & Pérez-Avalos, 2002). Asimismo, en la industria alimentaria participan en la clarificación de jugos y vinos (Ponce-Noyola & Pérez-Avalos, 2002), en la obtención de saborizantes (vainillina) a partir del ácido ferúlico (Sánchez-González et al., 2011), y mejoran la textura y sabor de los productos de panificación (Ponce-Noyola & Pérez-Avalos, 2002).

Ramírez-Romero, Reyes-Velazquez, y Cruz-Guerrero (2013) emplearon nejayote de tres diferentes molinos de maíz como medio de cultivo de bacterias ácido lácticas (*Lactobacillus rhamnosus*, *Lactobacillus casei* y *Lactobacillus helveticus*) para generar probióticos con producción de bacteriocinas. Fermentaron 50 mL del sobrenadante de cada extracto durante 48 h a 37 °C. Evaluaron la actividad bactericida con *Echerichia coli* y *Listeria innocua*; las cuales se cultivaron individualmente en el sobrenadante de la fermentación por 3 h, 37 °C y 150 rpm. Observaron que las cepas crecieron principalmente en nejayote con azúcares reductores, proteína y carbohidratos (1.12, 17.6 y 81.25 %, respectivamente). La bacteria con mayor inhibición ante *E. coli* (10 %) y *L. innocua* (13 %) fue *L. helveticus*, lo que atribuyeron a las bacteriocinas desarrolladas en las cepas. Con ello, el estudio generó una alternativa de uso del nejayote como medio de crecimiento y desarrollo de microorganismos con capacidad biológica como barrera antimicrobiana a nivel tracto digestivo.

sensory and nutritional characteristics improved in comparison with bread without the nejayote additive. This suggests that nejayote solids can be incorporated into bread without affecting its acceptability and adding an important source of dietary fiber, calcium and antioxidants. In this regard, the use of nejayote solids as an additive in the food industry is worthy of consideration, not only in baking but also in products that would benefit from raising their fiber content. In medicine they can help reduce cardiovascular diseases and prevent several types of cancer thanks to the antioxidant capacity of ferulic acid (Abbas, Sabir, Ahmad, Boligon, & Athayde, 2014).

Castro-Muñoz, Barragán-Huerta, and Yáñez-Fernández (2016) evaluated the antioxidant activity with 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl from the extract obtained from the "Integrated Membrane System" (Figure 4) by fractionating the nejayote (Castro-Muñoz & Yáñez-Fernández, 2015). The result is expressed as micromoles Trolox equivalents per liter of extract (TEAC). The antioxidant activity increased 105.26 % at the end of the separation from that determined at the start (0.76 TEAC); they attributed this to the molecular weight cut-off of the membranes. Each stage allowed the removal of organic matter of various sizes and the permeate of compounds weighing less than 1 kDa, such as the polyphenols. Antioxidants are considered secondary metabolites of plant species, they are related to the elimination of free radicals by acting as reducing agents or by inducing the generation of reducing enzymes and they participate in anti-mutagenic activities in mammals (López-Martínez et al., 2008). The recovery of these molecules can benefit the food industry (as a nutraceutical agent) or the pharmaceutical sector.

Ayala-Soto, Serna-Saldívar, García-Lara, y Pérez-Carrillo (2014) evaluaron el contenido de ácidos hidroxinámicos, composición de azúcares y capacidad antioxidante de los AX al ser extraídos del maíz: grano completo, pericarpio de dos tipos de maíz (resistente y susceptible a plagas) y nejayote. El mayor rendimiento de AX fue con el grano completo (20.9 %), con 2 % más que el nejayote. Con respecto al contenido de azúcares, el nejayote mostró concentración mayor de glucosa y galactosa (3.79 y 4.97 g·100 g⁻¹ AX, respectivamente). El pericarpio de maíz resistente presentó mayor contenido total de polifenoles (350 mg GAE·100 g⁻¹), 42 % más que el nejayote, concentración de ácidos hidroxicinámicos identificados (1.89 µg·mg⁻¹ AX) y capacidad antioxidante (6 mM TE·100 g⁻¹); este último 50 % superior al nejayote. Lo anterior indica una relación directa entre estos compuestos.

La investigación anterior muestra el potencial que tiene el desecho, ya que diversas fuentes de AX son utilizadas para la elaboración de productos alimenticios a base de maíz; sin embargo, el nejayote resulta ser un subproducto no valorado, sin tratamiento y sin valor comercial aparente. No obstante, los componentes fenólicos se consideran sustancias de valor agregado alto y parte de la fibra dietética, además son valorados por su propiedad prebiótica y su participación como inmunomoduladores ante enfermedades degenerativas como el cáncer (Mendis & Simsek, 2014).

Acosta-Estrada et al. (2014) emplearon los sólidos contenidos en el efluente (11.68 g·L⁻¹) y gluten de trigo (relación 4:1) para elaborar productos de panificación. Observaron que las características sensoriales y nutritivas mejoraron en comparación con el pan

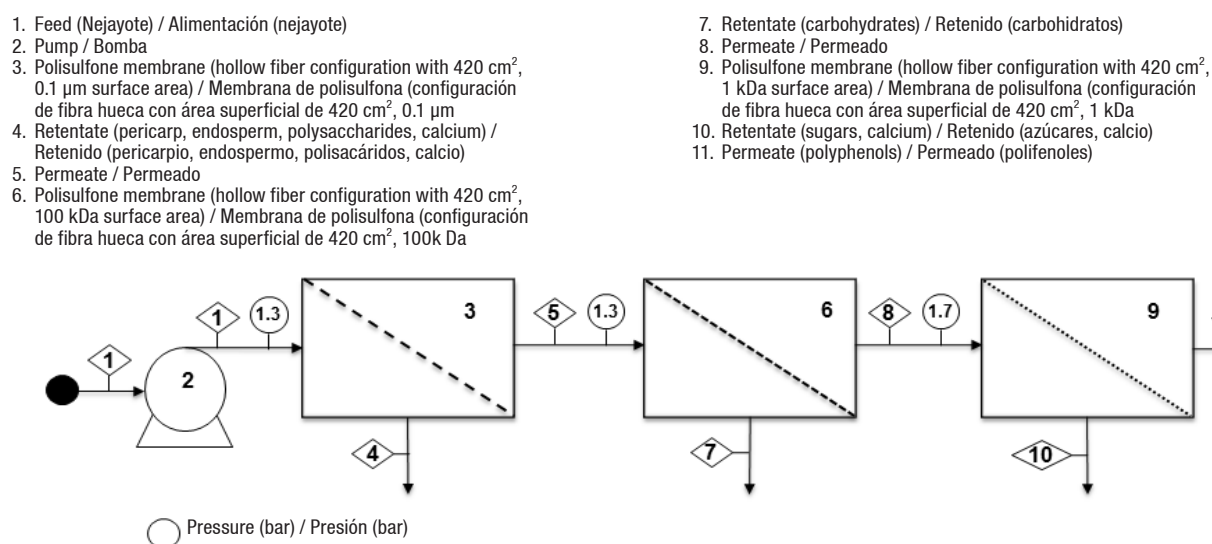


Figure 4. Integrated membrane system used for the fractionation of nejayote (adapted from Castro-Muñoz & Yáñez-Fernández, 2015).

Figura 4. Sistema integrado de membranas empleado para el fraccionamiento del nejayote (adaptado de Castro-Muñoz & Yáñez-Fernández, 2015).

The current problem

Treatments applied to the effluent, generated as a byproduct of a traditional process in Mexico, largely diminish its polluting effect by considerably reducing the pH, total organic carbon, total solids and COD.

The use of different methodologies to treat nejayote helps protect the environment by recovering components that can be reused in the same treatment system (reuse of the calcium components) or in different processes, as well as in the obtaining of value-added products (Castro-Muñoz, Orozco-Álvarez, & Yáñez-Fernández, 2015c; Galanakis, Castro-Muñoz, Cassano, & Conidi, 2016).

The quality of the extract is directly related to the initial properties of the raw materials (maize, water and calcium hydroxide) and the conditions of the nixtamalization processes (Trejo-González, Feria-Morales, & Wild-Altamirano, 1982). The alkali, temperature and mixing time are some of the parameters that interact with the inputs, resulting in extracts with a higher content of components (Escalante-Aburto et al., 2013; Fernández-Muñoz et al., 2006; Ruiz-Gutiérrez et al., 2010).

On the other hand, the purity percentage of the components obtained from nejayote depends directly on the methods used to extract them, whether they are physical (centrifugation, evaporation, sedimentation or filtration), chemical (solvents) or biological (enzymes, microorganisms or reactors). Operating conditions during each process provide specific characteristics to the final extracts, which can be used by various areas in the food (human and animal), pharmaceutical and medical industries, as well as for construction or production of electric energy (Acosta-Estrada et al., 2014; Durán-of Bazúa et al., 2007; González et al., 2003).

Finally, the methodologies described provide alternatives to treat an industrial residue without any commercial value and generate products or obtain compounds with economic utility.

Conclusions

This review showed the state of the art of studies focused on the treatment of the byproduct of nixtamalization. Although it should be explored in greater depth, nejayote has been proposed as a raw material in the obtaining and development of products; it has also been used as a substrate in the culturing of different bacterial strains of biotechnological interest.

Based on the analysis, the methodologies shown prove to be viable to generate technological applications that help recover high added-value components, such as polyphenols, carbohydrates, sugars, gums and calcium

sin aditivo. Lo anterior sugiere que los sólidos del nejayote pueden incorporarse al pan sin afectar su aceptabilidad y añadiendo una fuente importante de fibra dietética, calcio y antioxidantes. En este sentido, es relevante el uso de los sólidos como aditivo en la industria alimentaria; no sólo en la panificación, sino en productos que deseen elevar su contenido en fibra. En medicina pueden ayudar a reducir enfermedades cardiovasculares y prevenir varios tipos de cáncer gracias a la capacidad antioxidante del ácido ferúlico (Abbas, Sabir, Ahmad, Boligon, & Athayde, 2014).

Castro-Muñoz, Barragán-Huerta, y Yáñez-Fernández (2016) evaluaron la actividad antioxidante con 2,2-difenil-1-picrilhidrazil del extracto obtenido del "Sistema integrado de membranas" (Figura 4) al fraccionar el nejayote (Castro-Muñoz & Yáñez-Fernández, 2015). El resultado se expresó en μ moles equivalentes de Trolox por litro de extracto (TEAC). La actividad antioxidante aumentó 105.26 % al final de la separación respecto de la determinada al inicio (0.76 TEAC); esto lo atribuyeron al corte molecular de las membranas. Cada etapa permitió la remoción de materia orgánica de diversos tamaños y el permeado de compuestos de pesos inferiores a 1 kDa, como los polifenoles. Los antioxidantes son considerados metabolitos secundarios de especies vegetales, se relacionan con la eliminación de radicales libres al actuar como agentes reductores o al inducir la generación de enzimas reductoras y participan en actividades anti-mutagénicas en mamíferos (López-Martínez et al., 2008). La recuperación de estas moléculas pueden enfocarse a la industria de alimentos (como agente nutracéutico) o farmacéutica.

La problemática actual

Los tratamientos realizados al efluente, generado como subproducto de un proceso tradicional en México, disminuyen en gran medida el efecto contaminante que éste posee, al reducir considerablemente el pH, carbono orgánico total, sólidos totales y DQO.

El uso de diferentes metodologías para tratar el nejayote contribuye con el ambiente a través de la recuperación de componentes que pueden ser reutilizados en el mismo (reúso de los componentes cálcicos) o en diferentes procesos, así como en la obtención de productos con valor agregado (Castro-Muñoz, Orozco-Álvarez, & Yáñez-Fernández, 2015c; Galanakis, Castro-Muñoz, Cassano, & Conidi, 2016).

La calidad del extracto está directamente relacionada con las propiedades iniciales de las materias primas (maíz, agua e hidróxido de calcio) y las condiciones del proceso de nixtamalización (Trejo-González, Feria-Morales, & Wild-Altamirano, 1982). El álcali, la temperatura y el tiempo de mezclado son algunos

components, of interest in the food, pharmaceutical and biotechnology areas. In addition, their incorporation as a raw material in the polymer industry could increase the degradation rate of plastic products.

Although the studies presented here allowed knowing the technologies used (fermentation, filtration, centrifugation and decantation) to treat nejayote in order to reduce its environmental impact, the biotechnological importance lies in bringing attention to the compounds that could be obtained. Therefore, the prospects for using nejayote depend on the employment of the extracted components (mainly polyphenolic), such as the production of food with high nutraceutical content (by providing antioxidant compounds) and the generation of new pharmaceutical formulations.

Acknowledgments

We thank the National Science and Technology Council (CONACyT) and the National Polytechnic Institute for the funding granted, and the Education, Audiovisual and Culture Executive Agency (EACEA) for the doctoral scholarship awarded to Roberto Castro-Muñoz within the framework of the Erasmus Mundus Doctorate in Membrane Engineering (EUDIME) program.

End of English version

References / Referencias

- Abbas, S. R., Sabir, S. M., Ahmad, S. D., Boligon, A. A., & Athayde, M. L. (2014). Phenolic profile, antioxidant potential and DNA damage protecting activity of sugarcane (*Saccharum officinarum*). *Food Chemistry*, 147, 10-16. doi: 10.1016/j.foodchem.2013.09.113
- Acosta-Estrada, B. A., Lazo-Vélez, M. A., Nava-Valdez, Y., Gutiérrez-Urbe, J. A., & Serna-Saldívar, S. O. (2014). Improvement of dietary fiber, ferulic acid and calcium contents in pan bread enriched with nejayote food additive from with maize (*Zea mays*). *Journal of Cereal Science*, 60(1), 264-269. doi: 10.1016/j.jcs.2014.04.006
- Aguilar, M. I., Sáez, J., Lloréns, M., Soler, A., & Ortuño, J. F. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales. Coagulación-floculación*. Murcia, España: Servicio de Publicaciones.
- Ayala-Soto, F., Serna-Saldívar, S. O., García-Lara, S., & Pérez-Carrillo, E. (2014). Hydroxycinnamic acids, sugar composition and antioxidant capacity of arabinoxylans extracted from different maize fiber sources. *Food Hydrocolloids*, 35, 471-475. doi: 10.1016/j.foodhyd.2013.07.004
- Blanco-Gómez, E. A., Sánchez-González, E. A., Valladares, M. N., & Olvera, C. (2008). Identificación de

de los parámetros que presentan interacción con los insumos participantes, lo que resulta en extractos con mayor contenido de componentes (Escalante-Aburto et al., 2013; Fernández-Muñoz et al., 2006; Ruiz-Gutiérrez et al., 2010).

Por otro lado, el porcentaje de pureza de los componentes obtenidos del nejayote depende directamente de los métodos utilizados para extraerlos, ya sean físicos (centrifugación, evaporación, sedimentación o filtración), químicos (solventes) o biológicos (enzimas, microorganismos o reactores). Las condiciones de operación durante cada proceso proveen características específicas en los extractos finales, mismas que pueden ser aprovechables por diversas industrias del área alimentaria (humana y animal), farmacéutica, médica, dedicadas a la construcción o a la producción de energía eléctrica (Acosta-Estrada et al., 2014; Durán-de Bazúa et al., 2007; González et al., 2003).

Por último, las metodologías descritas proveen alternativas para tratar un residuo industrial sin algún valor comercial y generar productos u obtener compuestos con utilidad económica.

Conclusiones

La presente revisión mostró el estado del arte de estudios enfocados al tratamiento del subproducto de la nixtamalización. Aunque se debe estudiar con mayor detenimiento, el nejayote ha sido propuesto como materia prima en la obtención y elaboración de productos; además, ha sido utilizado como sustrato en el cultivo de diferentes cepas bacterianas de interés biotecnológico.

Con base en el análisis, las metodologías mostradas resultan ser viables para generar aplicaciones tecnológicas, que ayuden a recuperar componentes de valor agregado alto como polifenoles, carbohidratos, azúcares, gomas y componentes de calcio, de interés en el área alimenticia, farmacéutica y biotecnológica. Además, su incorporación como materia prima en la industria de los polímeros podría incrementar la tasa de degradación de los productos plásticos.

Si bien, los trabajos aquí presentados permitieron conocer las tecnologías usadas (fermentación, filtración, centrifugación y decantación) para tratar el nejayote con el fin de disminuir su impacto ambiental, la importancia biotecnológica radica en la exposición de compuestos posibles a obtener. Por ello, las perspectivas de uso del nejayote recaen en el empleo de los componentes extraídos (polifenólicos principalmente), tales como producción de alimentos con contenido alto de nutraceuticos (al proveer compuestos antioxidantes), así como la generación de nuevas formulaciones farmacéuticas.

- microorganismos aislados del nejayote. *Revista salud pública y nutrición*, 13, 1-5.
- Carrera-Campechano, E. M., Figueroa-Cárdenas, J. D., Arámbula-Villa, G., Martínez-Flores, H., Jiménez-Sandoval, S. J., & Luna-Bárceñas, G. (2012). New ecological nixtamalisation process for tortilla production and its impact on the chemical properties of whole corn flour and wastewater effluents. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(3), 564-571. doi: 10.1111/j.1365-2621.2011.02878.x
- Carvajal-Millán, E., Rascón-Chu, A., & Márquez-Escalante, J. A. (2005). Método para la obtención de goma de maíz a partir del líquido residual de la nixtamalización del grano de maíz. *Mexican Patent PA/a/2005/008124*.
- Castro-Muñoz, R., Barragán-Huerta, B. E., & Yáñez-Fernández, J. (2016). The use of nixtamalization waste waters clarified by ultrafiltration for production of a fraction rich in phenolic compounds. *Waste and Biomass Valorization*, 7(5), 1167-1176. doi: 10.1007/s12649-016-9512-6
- Castro-Muñoz, R., Cerón-Montes, G. I., Barragán-Huerta, B. E., & Yáñez-Fernández, J. (2015a). Recovery of carbohydrates from nixtamalization wastewaters (nejayote) by ultrafiltration. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14(3), 735-744. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/620/62043088014.pdf>
- Castro-Muñoz, R., Orozco-Álvarez, C., Cerón-Montes, G. I., & Yáñez-Fernández, J. (2015b). Characterization of the microfiltration process for the treatment of nixtamalization wastewaters. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 7(1), 23-34. doi: 10.5154/r.inagbi.2015.03.001
- Castro-Muñoz, R., Orozco-Álvarez, C., & Yáñez-Fernández, J. (2015c). Recovery of bioactive compounds from food processing wastewaters by ultra and nanofiltration: A review. *Advances in BioResearch*, 6(3), 152-158. doi: 10.15515/abr.0976-4585.6.3.152158
- Castro-Muñoz, R., & Yáñez-Fernández, J. (2015). Valorization of nixtamalization wastewaters (nejayote) by integrated membrane process. *Food and Bioproducts Processing*, 95, 7-18. doi: 10.1016/j.fbp.2015.03.006
- Choi, H., Zhang, K., Dionysiou, D. D., Oerther, D. B., & Sorial, G. A. (2005). Effect of permeate flux and tangential flow on membrane fouling for wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 45(1), 68-78. doi: 10.1016/j.seppur.2005.02.010
- Domínguez-Espinosa, R., & Pacheco-Carrillo, D. (2003). Efluentes de la industrialización del maíz: ¿contaminante o recurso valioso? *Revista de la Universidad Autónoma de Yucatán*, 54-63. Retrieved from <http://www.cirsociales.uady.mx/revUADY/pdf/227/ru2277.pdf>
- Durán-de Bazúa, C., Sánchez-Tovar, S. A., Hernández-Morales, M. R., & Bernal-González, M. (2007). Use of Anaerobic-Aerobic Treatment Systems for Maize Processing Installations: Applied Microbiology in Action. *Communicating Current Research and Educational Topics and Trends in Applied Microbiology*, 1-10. Retrieved from <http://www.formatex.org/microbio/pdf/Pages3-12.pdf>
- ## Agradecimientos
- Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), al Instituto Politécnico Nacional por el financiamiento otorgado y a la Agencia Ejecutiva en el ámbito Educativo, Audiovisual y Cultural (EACEA, por sus siglas en inglés) por la beca doctoral de Roberto Castro-Muñoz en el marco del programa Erasmus Mundus Doctorado en Ingeniería de Membranas (EUDIME).
- Fin de la versión en español*
-
- Escalante-Aburto, A., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P. I., Barrón-Hoyos, J. M., Figueroa-Cárdenas, J. D., & López-Cervantes, J. (2013). The nixtamalization process and its effect on anthocyanin content of pigmented maize, a review. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(4), 429-437. Retrieved from <http://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/36-4/8a.pdf>
- Fernández-Muñoz, J. L., San Martín-Martínez, E., Díaz-Góngora, J. A. I., Calderón, A., Alvarado-Escobar, A., Ortiz-Cárdenas, H., & Leal-Pérez, M. (2006). Steeping time and cooking temperature dependence of calcium ion diffusion during microwave nixtamalization of corn. *Journal of Food Engineering*, 76, 568-572. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.06.004
- Ferreira-Rolón, A., Ramírez-Romero, G., & Ramírez-Vives, F. (2014). Aumento de la actividad metanogénica en los lodos granulares, precipitando calcio en el nejayote mediante el burbujeo de CO₂. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(2), 517-525. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v13n2/v13n2a16.pdf>
- Galanakis, C. M., Castro-Muñoz, R., Cassano, A., & Conidi, C. (2016). Recovery of high-added-value compounds from food waste by membrane technology. In: Figoli, A., Cassano, A., & Basile, A. (Eds.), *Membrane technologies for biorefining* (pp. 189-210). Reino Unido: Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-08-100451-7.00008-6
- García-Zamora, J. L., Sánchez-González, M., Lozano, J. A., Jáuregui, J., Zayas, T., Santacruz, V., Hernández, F., & Torres, E. (2015). Enzymatic treatment of wastewater from the corn tortilla industry using chitosan as an adsorbent reduces the chemical oxygen demand and ferúlico acid content. *Process Biochemistry*, 50, 125-133. doi: 10.1016/j.procbio.2014.10.012
- González, R., Reguera, E., Figueroa, J. M., & Martínez, J. L. (2003). Study of the Influence of nejayote and other additives on the cohesive strength and electric properties of black agglomerates. *Journal of Applied Polymer Science*, 90(14), 3965-3972. doi: 10.1002/app.13098
- González-Martínez, S. (1984). Biological treatability of the wastewaters from the alkaline cooking of maize

- (Indian corn). *Environmental Technology Letters*, 5(1-11), 365-372. doi: 10.1080/09593338409384287
- Gutiérrez-Urbe, J. A., Rojas-García, C., García-Lara, S., & Serna-Saldívar, S. O. (2010). Phytochemical analysis of wastewater (nejayote) obtained after lime-cooking of different types of maize kernels processed into masa for tortillas. *Journal of Cereal Science*, 52(3), 410-416. doi: 10.1016/j.jcs.2010.07.003
- Krishnan, R., Ríos, R., Salinas, N., & Durán-de Bazúa, C. (1998). Treatment of maize processing industry wastewater by percolating columns. *Environmental Technology*, 19(4), 417-424. doi: 10.1080/09593331908616697
- López-Martínez, L. X., Oliart-Ros, R. M., Valerio-Alfaro, G., Chen-Hsien, L., Parkin, K. L., & García, H. S. (2008). Antioxidant activity, phenolic compounds and anthocyanins content of eighteen strains of Mexican maize. *LWT-Food Science and Technology*, 42(6), 1187-1192. doi: 10.1016/j.lwt.2008.10.010
- Matos-Chamorro, A., & Chambilla-Mamani, E. (2010). Importancia de la fibra dietética, sus propiedades funcionales en la alimentación humana y en la industria alimentaria. *Revista de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(1).
- Mendis, M., & Simsek, S. (2014). Arabinoxylans and human health. *Food Hydrocolloids*, 42, 239-243. doi: 10.1016/j.foodhyd.2013.07.022
- Niño-Medina, G., Carvajal-Millán, E., Gardea-Bejar, A., Rascón-Chu, A., & Márquez-Escalante, J. A. (2007). Caracterización composicional, fisicoquímica y funcional de una goma de maíz recuperada del nejayote. *XVII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería*.
- Niño-Medina, G., Carvajal-Millán, E., Lizardi, J., Rascon-Chu, A., Márquez-Escalante, J. A., Gardea, A., Martínez-López, A. L., & Guerrero, V. (2009). Maize processing waste water arabinoxylans: Gelling capability and cross-linking content. *Food Chemistry*, 115(4), 1286-1290. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.01.046
- Niño-Medina, G., Carvajal-Millán, E., Lizardi, J., Rascon-Chu, A., Márquez-Escalante, J. A., Guerrero, V., Guerrero, V., & Salas-Muñoz, E. (2010). Feruloylated arabinoxylans and arabinoxylan gels: structure, sources and applications. *Phytochemistry Reviews*, 9(1), 111-120. doi: 10.1007/s11101-009-9147-3
- Nucci, E. R., Silva, R. G., Gomes, T. C., Giordano, R. C., & Cruz, J. G. (2005). A fuzzy logic algorithm for identification of the harvesting threshold during PGA production by *Bacillus megaterium*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22(4), 521-527. doi: 10.1590/S0104-66322005000400004
- Pappa, M. R., de Palacios, P. P., & Bressani, R. (2010). Effect of lime and wood ash on the nixtamalization of maize and tortilla chemical and nutritional characteristics. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65, 130-135. doi: 10.1007/s11130-010-0162-8
- Paz-Samaniego, R., Carvajal-Millan, E., Brown-Bojorquez, F., Rascón-Chu, A., López-Franco, Y. L., Sotelo-Cruz, N., & Lizardi-Mendoza, J. (2015). Gelation of arabinoxylans from maize wastewater-effect of alkaline hydrolysis conditions on the gel rheology and microstructure. *Wastewater Treatment Engineering*, 101-114. doi: 10.5772/61022
- Pflugfelder, R. L., Rooney, L. W., & Waniska, R. D. (1988). Dry matter losses in commercial corn masa production. *Cereal Chem*, 65(2), 127-132. Retrieved from http://www.aacnet.org/publications/cc/backissues/1988/Documents/65_127.pdf
- Ponce-Noyola, T., & Pérez-Avalos, O. (2002). Celulasas y xilanasas en la industria. *Avance y Perspectiva*, 21, 273-277.
- Pulido, R., Escárcega, C., & Durán-de Bazúa, C. (1987). Modelo cinético para reactores biológicos rotatorios usados en el tratamiento aerobio de efluentes líquidos de la industria del maíz. *Tecnología, Ciencia y Educación*, 2(1), 15-24. Retrieved from <http://www.imiq.org/wp-content/uploads/2012/02/26.pdf>
- Ramírez-Romero, G., Reyes-Velazquez, M., & Cruz-Guerrero, A. (2013). Estudio del Nejayote como medio de crecimiento de probióticos y producción de bacteriocinas. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(2), 463-471. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62029966009>
- Reyes-Vidal, M. Y., Aceves-Diez, Á., Martínez-Silva, A., & Asaff, A. (2012). Investigación, desarrollo tecnológico e innovación para el cuidado y reúso del agua. *Revista de Estudios Sociales*, 2, 203-216.
- Riser-Roberts, E. (1998). *Remediation of petroleum contaminated soils: biological, physical and chemical processes*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers.
- Rodríguez-Méndez, L. I., Figueroa-Cárdenas, J. D., Ramos-Gómez, M., & Méndez-Lagunas, L. L. (2013). Nutraceutical properties of flour and tortillas made with an ecological nixtamalization process. *Journal of Food Science*, 78(10), 1529-1534. doi: 10.1111/1750-3841.12241
- Rojas-García, C., García-Lara, S., Serna-Saldívar, S. O., & Gutiérrez-Urbe, J. A. (2012). Chemopreventive effects of free and bound phenolics associated to steep waters (nejayote) obtained after nixtamalization of different maize types. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67(1), 94-99. doi: 10.1007/s11130-011-0272-y
- Ruiz-Gutiérrez, M. G., Quintero-Ramos, A., Meléndez-Pizarro, C. O., Lardizábal-Gutiérrez, D., Márquez-Meléndez, R., & Talamás-Abud, R. (2010). Changes in mass transfer, thermal and physicochemical properties during nixtamalization of corn with and without agitation at different temperatures. *Journal of Food Engineering*, 98(1), 76-83. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.12.010
- Salmerón-Alcocer, A., Rodríguez-Mendoza, N., Pineda-Santiago, V., Cristiani-Urbina, E., Juárez-Ramírez, C., Ruiz-Ordaz, N., & Galíndez-Mayer, J. (2003). Aerobic treatment of maize-processing wastewater (nejayote) in a single-stream multi-stage bioreactor. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2(5), 401-406. doi: 10.1139/S03-046

- Sánchez-González, M., Blanco-Gámez, A., Escalante, A., Valladares, A. G., Olvera, C., & Parra, R. (2011). Isolation and characterization of new facultative alkaliphilic *Bacillus flexus* strains from maize processing waste water (nejayote). *Letters in Applied Microbiology*, 54(4), 1-7. doi: 10.1111/j.1472-765X.2011.03021.x
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2011). *Perspectivas de largo plazo para el sector agropecuario de México 2011-2020*. México: Autor. Retrieved from http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/estudios_economicos/escenariobase/perspectivalp_11-20.pdf
- Suarez-Meraz, K. A., Ponce-Vargas, S. M., López-Maldonado, J. T., Cornejo-Bravo, J. M., Oropeza-Guzmán, M. T., & López-Maldonado, E. A. (2016). Eco-friendly innovation for nejayote coagulation-flocculation process using chitosan: Evaluation through zeta potential measurements. *Chemical Engineering Journal*, 284, 536-542. doi: 10.1016/J.CEJ.2015.09.026
- Tejeda, M. A., Montesinos, C. R. M., & Guzmán, Z. R. (1995). *Bioseparaciones*. Hermosillo Sonora, México. Editorial Unison.
- Tortora-Gerard, J., Funke-Berdell, R., & Case-Christine, L. (2007). *Introducción a la Microbiología*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Médica Panamericana.
- Trejo-González, A., Feria-Morales, A., & Wild-Altamirano, C. (1982). The role of lime in the alkaline treatment of corn of tortilla preparation. *Advances in Chemistry*, 198, 245-263. doi: 10.1021/ba-1982-0198.ch009
- Valderrama-Bravo, C., Gutiérrez-Cortez, E., Contreras-Padilla, M., Rojas-Molina, I., Mosquera, J. C., Rojas-Molina, A., Beristain, F., & Rodríguez-García, M. E. (2012). Constant pressure filtration of lime water (nejayote) used to cook kernels in maize processing. *Journal of Food Engineering*, 110(3), 478-486. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.12.018
- Valderrama-Bravo, C., Gutiérrez-Cortez, E., Contreras-Padilla, M., Oaxaca-Luna, A., del Real-López, A., Espinosa-Arbelaez, D. G., & Rodríguez-García, M. E. (2013). Physic-mechanic treatment of nixtamalization byproduct (nejayote). *Journal of Food*, 11(S1), 75-83. doi: 10.1080/19476337.2013.781680
- Velasco-Martínez, M., Angulo, O., Vázquez-Couturier, D. L., Arroyo-Lara, A., & Monroy-Rivera, J. A. (1997). Effect of dried solids of nejayote on broiler growth. *Poultry Science*, 76(11), 1531-1534. Retrieved from <http://ps.oxfordjournals.org/content/76/11/1531.long>
- Voet, D., & Voet, J. G. (2006). *Bioquímica*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Médica Panamericana.