



FRONTERA BIOTECNOLÓGICA



Revista Digital del IPN, CIBA Tlaxcala - No. 25 mayo - agosto 2023

¿POR QUÉ NOS SABEN
DULCES LAS COSAS?

EXTRACCIÓN ASISTIDA
POR ULTRASONIDO
PARA LA OBTENCIÓN DE
FLAVONOIDES: EL PUNTO DE
VISTA TECNO-ECONÓMICO

FERTILIZANTES ORGÁNICOS
A PARTIR DE RESIDUOS
AGROINDUSTRIALES
COMO UNA OPCIÓN
BIOTECNOLÓGICA, UNA
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

BIOFERTILIZANTES: EL FUTURO
LIMPIO Y SUSTENTABLE PARA
POTENCIAR EL DESARROLLO
DE LA AGRICULTURA





DIRECTORIO INSTITUCIONAL

IPN

ARTURO REYES SANDOVAL
DIRECTOR GENERAL

CARLOS RUIZ CÁRDENAS
SECRETARIO GENERAL

MAURICIO IGOR JASSO ZARANDA
SECRETARIO ACADÉMICO

ANA LILIA CORIA PÁEZ
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

YESSICA GASCA CASTILLO
SECRETARIA DE INNOVACIÓN E INTEGRACIÓN SOCIAL

MARCO ANTONIO SOSA PALACIOS
SECRETARIO DE SERVICIOS EDUCATIVOS

JAVIER TAPIA SANTOYO
SECRETARIO DE ADMINISTRACIÓN

JOSÉ ALEJANDRO CAMACHO SÁNCHEZ
SECRETARIO EJECUTIVO DEL PATRONATO DE OBRAS E
INSTALACIONES

MARÍA DE LOS ÁNGELES JASSO CISNEROS
ABOGADA GENERAL

MODESTO CÁRDENAS GARCÍA
PRESIDENTE DEL DECANATO

CIBA IPN

DIANA VERÓNICA CORTÉS ESPINOSA
DIRECTORA DEL CIBA-IPN, TLAXCALA

MARÍA DEL CARMEN CRUZ LÓPEZ
SUBDIRECTORA ACADÉMICA DEL CIBA-IPN, TLAXCALA

ERIK OCARANZA SÁNCHEZ
SUBDIRECTOR DE VINCULACIÓN DEL CIBA-IPN, TLAXCALA

VÍCTOR ERIC LÓPEZ Y LÓPEZ
EDITOR EN JEFE

GONZALO PÉREZ ARAIZA
SOPORTE TÉCNICO

PEDRO RAMÍREZ CALVA
DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN FRONTERA BIOTECNOLÓGICA

ISMAEL SÁNCHEZ GONZÁLEZ
DESARROLLO WEB

LILIA ESPINDOLA RIVERA
COORDINADORA ADMINISTRATIVA

CINTILLO LEGAL

FRONTERA BIOTECNOLÓGICA, año 11, número 25, mayo - agosto 2023, es una publicación cuatrimestral editada por el Instituto Politécnico Nacional a través del Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac - Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, México. Tels.: 01-248-48707-65 y 66 Conmutador IPN: 57296000, Ext. 87816. <http://www.revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx/>, Editor responsable: Dr. Víctor Eric López y López. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título No. 04-2015-120313501700-203, ISSN: 2448-8461, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Dr. Víctor Eric López y López., Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac - Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, fecha de última modificación, 20 de julio de 2023.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Politécnico Nacional.

CONTENIDO

MENSAJE EDITORIAL 3

¿POR QUÉ NOS SABEN DULCES LAS COSAS? 4

EXTRACCIÓN ASISTIDA POR ULTRASONIDO PARA LA OBTENCIÓN DE FLAVONOIDES: EL PUNTO DE VISTA TECNO-ECONÓMICO 13

FERTILIZANTES ORGÁNICOS A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO UNA OPCIÓN BIOTECNOLÓGICA, UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 19

BIOFERTILIZANTES: EL FUTURO LIMPIO Y SUSTENTABLE PARA POTENCIAR EL DESARROLLO DE LA AGRICULTURA 24

Mensaje Editorial

En un México de cambios, es importante que conozcamos temas diversos desde un enfoque científico pero comprensible para nuestra sociedad lo cual nos ayuda a tomar mejores decisiones en muchos aspectos de nuestra vida diaria.

Iniciaremos conociendo del por qué nos saben las cosas dulces, tanto de edulcorantes naturales como de los sustitutos, ingredientes indispensables hoy en la industria de alimentos.

Descubriremos que el ultrasonido puede ayudarnos como técnica asistida en la extracción de flavonoides que son compuestos de origen vegetal y con un gran potencial farmacéutico.

¿Queremos cuidar el medio ambiente? Pues entenderemos de las ventajas del aprovechamiento de residuos agroindustriales para la producción de vermicomposta y digestato que son utilizados como fertilizantes alternativos a los químicos en la agricultura.

Continuando con el mismo orden de ideas, entenderemos como es que los biofertilizantes que utilizan mezclas de microorganismos nos ayudan a promover el crecimiento de las plantas, mejorar la disponibilidad de nutrientes y pueden ayudarnos a recuperar suelos sobreexplotados. Finalmente, no nos resta más que hacer un llamado de atención para poner un granito de arena y cuidar nuestro medio ambiente, el saber de cómo funcionan las cosas y se aplican, como lo dijimos al principio de la nota, nos ayudará a tomar mejores decisiones y cuidar nuestro mundo entero.

“La Técnica al Servicio de la Patria”

Dr. Víctor Eric López y López
Editor en Jefe

¿POR QUÉ NOS SABEN DULCES LAS COSAS?

Jacqueline Meneses Pérez¹, Jocksan I. Morales Camacho², Silvia Luna Suárez¹

¹Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada - Instituto Politécnico Nacional, carretera estatal Santa Inés Tecuexcomac - Tepetitla km 1.5, Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México, C.P. 9070

²Departamento de Ingeniería Química, Alimentos y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla, Sta. Catarina Mártir, San Andrés Cholula, Puebla 72810, México

* Autor para correspondencia: silvials2004@yahoo.com.mx , sluna@ipn.mx

RESUMEN

Desde tiempos ancestrales los seres humanos han tenido afinidad por consumir alimentos dulces, hoy en día se consume una amplia gama de alimentos que dan este tipo de sabor, como son los productos de confitería, bebidas azucaradas, productos horneados, entre otros. Estos alimentos se han caracterizado por ser enriquecidos con edulcorantes, los cuales se denominan así por la presencia de moléculas que son capaces de activar el sabor dulce y que gracias a las características de estos edulcorantes y su interacción con receptores de la lengua el ser humano puede probar el sabor dulce característico de muchos alimentos. En este trabajo se hablará del papel tan importante del receptor del sabor dulce y los edulcorantes más utilizados en la industria alimentaria.

ABSTRACT

Since ancient times, human beings have had an affinity for consuming sweet foods, today a wide range of foods that give this type of flavor are consumed, such as confectionery products, sugary drinks, baked goods, among others. These foods have been enriched with sweeteners, which are molecules that can activate the sweet taste. Thanks to the characteristics of these sweeteners and their interaction with receptors on the tongue, humans can taste the sweetness of many foods. In this work, the important role of the sweet taste receptor and the most used sweeteners in the food industry will be discussed.

Keywords: Taste, Sweet taste receptor, Synthetic sweeteners, Natural sweeten

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la industria de los alimentos ha implementado el uso de nuevos ingredientes que le den ciertas propiedades a los alimentos y sean atractivas para el consumidor, ejemplo de ello son los alimentos con sabores dulces que desde hace muchos años han cobrado cierta importancia, sin embargo, el consumo excesivo de alimentos ricos en azúcares con un aporte de 4 kilocalorías por gramo está directamente relacionado con el incremento de trastornos metabólicos como la obesidad y enfermedades como la diabetes (Rani et al. 2016). De acuerdo con la Organización para la Comunicación y Desarrollo económico OCDE (2021) México ocupa el segundo lugar a nivel mundial con índices de obesidad con un 32.4 % de su población obesa, debido a ello se han buscado nuevas alternativas para sustituir el consumo de azúcares, sustituyéndola con otros compuestos como son los edulcorantes. De acuerdo con el Codex alimentario (1967) un edulcorante es aquella sustancia que tienen la capacidad de estimular el sabor dulce y estos se pueden clasificar de acuerdo con su origen en naturales o sintéticos, calóricos bajos en calorías y no calóricos haciendo

referencia a su aporte calórico. En este trabajo se hablará del papel tan importante del receptor del sabor dulce y los edulcorantes más utilizados en la industria alimentaria.

2. EL SABOR DULCE

El sabor permite al ser humano identificar ciertas sustancias, desde las más apetecibles hasta las más desagradables (Gutiérrez et al. 2020). El sabor está definido como una percepción compleja, de acuerdo con Doty (2015) el sabor es una percepción inducida por la estimulación multisensorial de los alimentos, en la cual intervienen otros parámetros como es la textura y el sentido del olfato. El ser humano puede percibir distintos sabores gracias a la presencia de papilas gustativas encontradas en la lengua, estas papilas a su vez contienen células receptoras del gusto que tienen la función de responder a estímulos químicos, gracias a estas células se pueden detectar cinco sabores: amargo, salado, agrio o ácido y el sabor umami característico del sabor salado de algunos aminoácidos (Ribeiro y Oliveira 202)

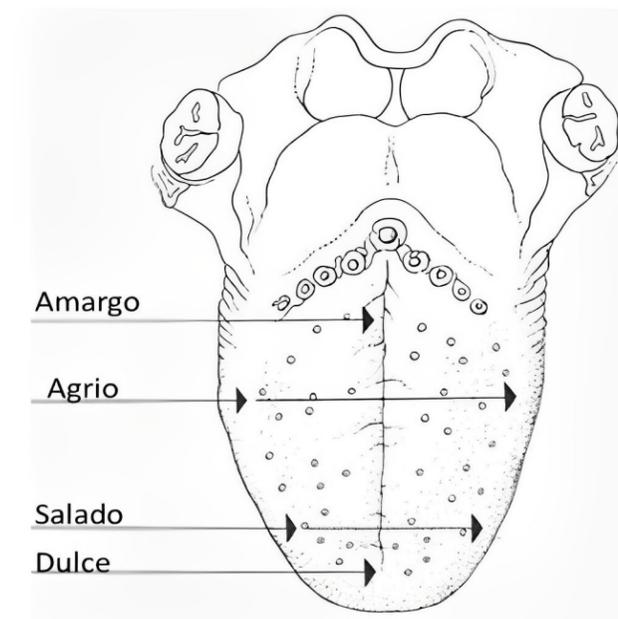


Figura 1. Percepción de sabores en la lengua (Spence, 2022).

El sabor dulce es uno de los sabores más agradable para el consumidor, pero se han preguntado ¿Cómo se puede percibir el sabor dulce? La presencia de receptores en la lengua tienen un papel fundamental en probar distintos sabores, debido a que estos se activan cuando ciertas moléculas presentes en los alimentos interactúan con ellos activando un sabor, en el caso específico del sabor dulce el cual se percibe en la punta de la lengua (Figura 1) tenemos un tipo de receptores, el cual es un heterodímero, es decir está formado por 2 subunidades llamadas TIR2 y TIR3 (Figura 2), este receptor está anclado a la proteína G, a su vez cada subunidad está conformada por 3 dominios,

el dominio módulo de venus atrapamoscas (VFTM), un dominio rico en cisteínas (CRD) el cual contiene 9 residuos de cisteínas conservados, y el dominio transmembrana (TMD) (Temussi 2006). Hoy en día ya se han realizado estudios para saber cómo moléculas dulces (sacarosa, fructosa, etc.) se relacionan con este receptor, ejemplo de ello es la glucosa y sacarosa que interactúan con el dominio VFTM y una vez que estos interactúan se desencadenan una serie de reacciones que activan el sabor dulce, así como este ejemplo pasa de manera similar con otro tipo de moléculas que tienen la capacidad de dar un sabor de dulzor (Assadi 2010).

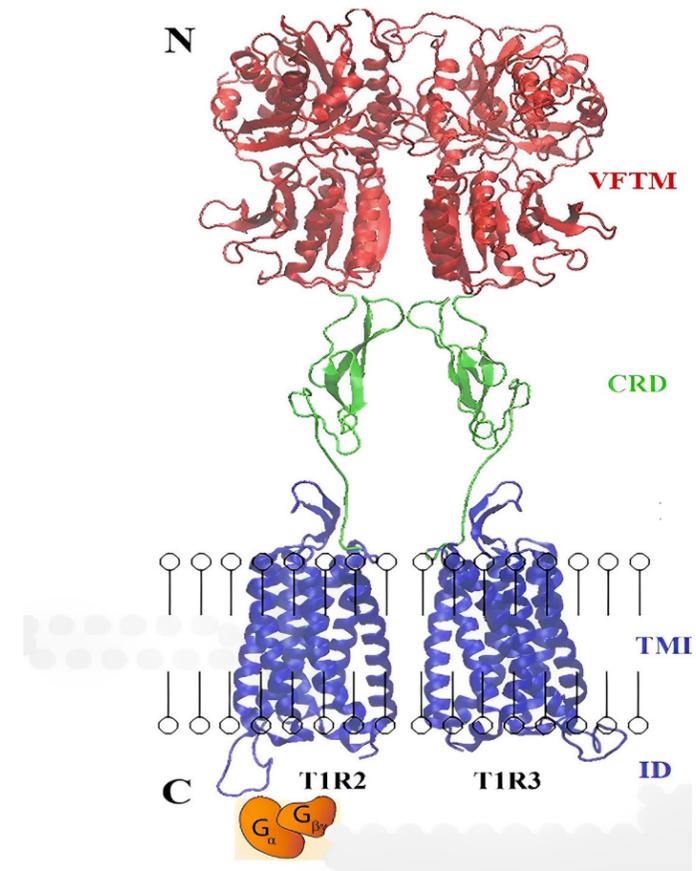


Figura 2. Receptor del sabor dulce, formado por 2 subunidades (TIR2 Y TIR3), cada subunidad está conformada por 3 dominios VFTM (color rojo), CRD (color verde) y TMD (color azul). Tomada de: Yang, Cui, & Liu, (2021).

3. EDULCORANTES CALÓRICOS DE ORIGEN NATURAL

Los edulcorantes naturales de tipo calórico se han utilizado desde hace muchos años en la industria de alimentos, dentro de este grupo podemos mencionar a la glucosa, sacarosa y fructosa, no obstante, estos edulcorantes cuando se ingieren en exceso tienen efectos en la salud debido a su aporte calórico (4Kcal/ g).

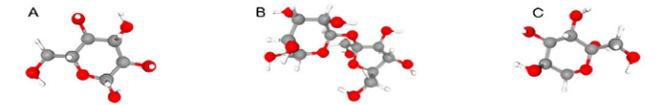


Figura 3. Estructura de los edulcorantes calóricos de origen natural. A Glucosa, B Sacarosa, C Fructosa. Tomadas de National Center for Biotechnology Information (2023).

Glucosa

La glucosa es un hidrato de carbono, su estructura consta de 6 carbonos, su fórmula química $C_6H_{12}O_6$, tiene una dulzura de 0.75 veces la del azúcar (sacarosa), aporta 4 calorías por gramo, se ha considerado fundamental para el consumo de energía y llevar a cabo todas las necesidades energéticas siendo el combustible metabólico primario de los mamíferos, provienen de la descomposición de carbohidratos, lípidos y proteínas. La glucosa sirve como un precursor para la síntesis de otros carbohidratos como la ribosa y glucógeno. Se encuentran de forma natural en muchos alimentos como frutas, verduras, cereales con alto contenido de almidón y en la miel. Una vez que la glucosa entra a nuestro organismo, viaja a través de la sangre hacia tejidos que requieren energía y es en donde se descompone en una serie de reacciones bioquímicas, las cuales liberan la energía en forma de ATP, cuya molécula se utiliza para llevar a cabo todos los procesos que requieren energía en nuestro organismo (Martín-Aragón 2006).

Sacarosa

La sacarosa es un disacárido, formado por glucosa y fructosa, mejor conocida como el azúcar de mesa, desde tiempos ancestrales ha sido ampliamente consumida por el ser humano siendo una de las sustancias más abundantes en el mundo. Para su comercialización se obtiene a partir de la caña de azúcar y de la remolacha. Este carbohidrato aporta 4 Kcal/g y es característico del sabor dulce, de manera natural se encuentra en la mayoría de las frutas y su contenido varía en función del grado de madurez, debido a esto las frutas maduras resultan ser más dulces que los frutos inmaduros (Badui 2016).

Fructosa

La fructosa es un monosacárido, siendo uno de los carbohidratos más consumidos principalmente por pacientes con diabetes debido a que tiene un índice glucémico más bajo comparado con la sacarosa (Carvalho et al. 2019), la fructosa se encuentra principalmente en los jugos de frutas y en las mieles. La fructosa se ha considerado el azúcar de origen natural más dulce. De manera industrial se obtiene del maíz en forma de cristales o en polvo, sin embargo, a pesar de su alto poder edulcorante no se recomienda la ingesta en altas dosis por posibles efectos secundarios entre los que destacan el incremento en las concentraciones de colesterol total.

4. EDULCORANTES CALÓRICOS DE ORIGEN SINTÉTICO

El jarabe de alta fructosa hoy en día es de los más utilizados en la industria alimentaria, es obtenido a partir de la molienda húmeda de los granos de maíz, por medio de una triple hidrólisis ácida del almidón en dextrinas en un proceso denominado licuefacción y la hidrólisis de estos compuestos en unidades de glucosa en el proceso de la sacarificación. Posteriormente, la glucosa es transformada en fructosa por medio de la enzima glucosa isomerasa por la acción de la enzima glucosa isomerasa, una de las ventajas que tiene el jarabe de alta fructosa es comparado con la sacarosa, el jarabe de alta fructosa es 170 veces más dulce, debido a esta propiedad ha sido utilizado en bebidas azucaradas como refrescos y zumo de frutas (Bray et al. 2004).

5. EDULCORANTES NO CALÓRICOS DE ORIGEN NATURAL

Los edulcorantes no calóricos son aquellos que como su nombre lo indica no aportan calóricas cuando se consumen y son obtenidos de plantas naturales, debido a estas características estos edulcorantes se empezaron a utilizar como sustitutos de azúcar de mesa, dentro de este grupo podemos describir los siguientes:

Stevia

La stevia rebaudiana (Figura 4) es una planta originaria del suroeste de Brasil y Paraguay (Reyes 2014) desde su descubrimiento se volvió una planta con gran importancia por la presencia de un compuesto llamado esteviósido el cual es un glucósido encontrado en las hojas de la planta y es caracterizado por su bajo contenido calórico y su alto poder de dulzor, que es de 250 a 300 veces mayor que la sacarosa (Brandle et al. 2002). Fue aprobada por la FDA para su consumo desde el año 2005 y se ha catalogado como un edulcorante Generalmente Reconocido como Seguro (GRAS) desde entonces el consumo de Stevia se ha ido incrementando a lo largo de los años debido a sus propiedades para el control de peso y la obesidad, estos hallazgos se han encontrado gracias a diversos estudios con modelos murinos, en los que se indica que las ratas suministradas con dosis de esteviósidos por 3 días redujeron sus niveles de glucosa, además de perder 1 Kg de peso (Anton et al. 2010). Otra característica de Stevia es su baja toxicidad mientras la ingesta no sobrepase la dosis establecida (2 mg/Kg de peso) al día. Hoy en día es empleada en mermeladas, bebidas, dulces, pastelería, productos lácteos, entre otros (Durán et al. 2012).



Figura 4. Planta de Stevia rebaudiana. Tomada de Chonata Orozco (2020).

Luo Han Guo/ Luo Han Kuo (mogrósidos)

Los mogrósidos son compuestos presentes en el fruto de la planta conocida como Luo Han Guo originaria del Sur de China, estos compuestos se clasifican en mogrósidos I, II, III, IV y V, cada uno con diversas características y funciones, el mogrósido V se ha caracterizado por su capacidad edulcorante 250 veces mayor que el de la sacarosa (Stephens 2018), en el año 2007 la FDA reportó que era Generalmente Reconocido como Seguro (GRAS), y que debido a su alta estabilidad se puede añadir a diversos productos principalmente en productos horneados, ya que es resistente y estable a altas temperaturas (Qin et al. 2007).

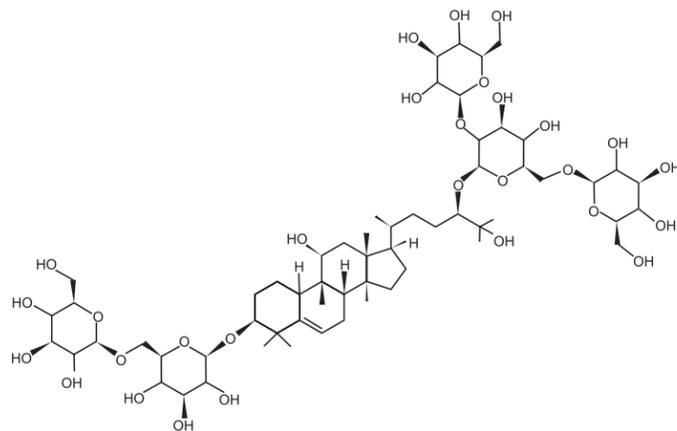


Figura 5. Estructura de mogrósido V. Tomada de Stephens-Camacho et al. (2018).

Eritritol

El eritritol es un alcohol de azúcar de 4 carbonos usado como sustituto del azúcar, lo podemos encontrar de manera natural en frutas como melón, uvas, peras y en alimentos fermentados como el queso y la salsa de soya, de manera endógena es producido por la vía de las pentosas fosfato (PPP), de manera comercial se obtiene a gran escala a partir de la fermentación por levaduras y hongos similares a las levaduras utilizando sustratos como glucosa, fructosa, xilosa, sacarosa, celulosa y glicerol. El eritritol comparado

con la sacarosa es aproximadamente 70% tan dulce como esta (Mazi y Stanhope 2023). Hoy en día el eritritol se agrega en alimentos procesados como un edulcorante a granel y en combinación con otro tipo de edulcorantes debido a su alto potencial como edulcorante no calórico, su tolerancia digestiva es alta siendo la ingesta en países desarrollados de 30g por día, además se ha visto que tiene presuntos efectos no cancerígenos antioxidantes. Los estudios informan que el eritritol no tiene efectos insulinémicos o glucémicos a corto plazo, por ello se ha considerado como un edulcorante apropiado para pacientes diabéticos o con obesidad. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud se ha asignado una ingesta diaria de eritritol admisible que es "no especificada" y no se ha exigido por parte de la FDA la divulgación del contenido de este edulcorante en los diversos productos alimenticios. Actualmente se está investigando sobre los efectos que pudiera tener el consumo de este edulcorante, debido a que en este caso se han visto posibles efectos trombóticos después de la ingesta de eritritol, sin embargo, se necesitan más estudios clínicos para determinar sus efectos secundarios (Witkowski et al. 2023).

6. EDULCORANTES BAJOS EN CALORÍAS DE ORIGEN NATURAL

Tagatosa

La tagatosa es un edulcorante de origen natural bajo en calorías que se ha caracterizado por sus propiedades funcionales, es un monosacárido el cual presenta un carbono quiral en la posición cuatro, siendo una imagen especular del átomo de carbono respecto a la D fructosa (Vastenavond et al. 2012). Se encuentra de manera natural en algunas frutas y productos lácteos. De manera comercial se obtiene a partir de lactosa a través de procesos enzimáticos y químicos (Fujimaru et al. 2012). Se caracteriza por tener un aspecto similar a la sacarosa provocando un sabor dulce sin cualidades indeseables como la amargura, astringencia o sensaciones de tipo químico. Actualmente de acuerdo con la FDA desde el año 2011 se ha reconocido como un compuesto seguro GRAS, otra de las características que tiene la tagatosa comparada con otro tipo de edulcorantes es la mínima absorción que tiene en el tracto gastrointestinal y su bajo contenido calórico, aportando únicamente el 33% de calorías que aporta la sacarosa, teniendo un efecto glucémico menor. Una de las ventajas que tiene son sus características sensoriales favorables pudiendo usarlo de manera individual o combinado con otros edulcorantes para enmascarar sabores desagradables. En cuanto al poder de dulzor de acuerdo con Vastenavond y colaboradores (2012) es 0.90 a 0.92 veces dulce que la sacarosa

7. EDULCORANTES BAJOS EN

CALORÍAS DE ORIGEN SINTÉTICO

Polioles (Sorbitol, Xilitol y Manitol)

Los polioles o también llamados alcoholes de azúcar son aquellos derivados de los azúcares por un proceso de reducción de un grupo aldo o ceto a un grupo hidroxilo, de manera natural son producidos por diversos microorganismos y organismos superiores. Actualmente la producción de estos polioles es importante para la industria alimentaria por su uso como edulcorantes y potenciadores de sabor; su obtención a nivel industrial se lleva a cabo por la hidrogenación química de azúcares, siendo uno de los procesos con mayor costo debido al requerimiento de parámetros como la temperatura, la presión y el uso de catalizadores puros. El bajo contenido calórico de los polioles en relación con los azúcares se debe en parte a su menor descomposición en el cuerpo y también a su mala absorción en el intestino (Rice et al. 2020). Si bien estos rasgos tienen efectos positivos efectos tales como disminución de glucosa en la sangre, los polioles no digeridos son libres de ser descompuestos por miembros de la microbiota intestinal. Dentro del grupo de polioles se incluyen al manitol, xilitol y sorbitol (Bielecki 1982). El manitol tiene del 50-60% de dulzura de la sacarosa, se utiliza en diversos productos como la goma de mascar como agente de carga y polvo y, de manera similar, en caramelos de menta y su más amplio uso es como una alternativa de sacarosa en recubrimientos de chocolate sin azúcar, glaseados para pasteles. Por otro lado, el sorbitol es un isómero del manitol, tiene una dulzura relativa a la sacarosa del 60%, sin embargo, a diferencia del manitol este es 20 veces más soluble en agua por ende se prefiere su uso en diversas aplicaciones como es su uso en gomas de mascar. El sorbitol cristalino combinado con su sabor dulce y agradable efecto refrescante, es muy práctico para masticar chicle y caramelos. Vilela et al. (2015) describieron el uso de sorbitol para reemplazar la sacarosa en mermeladas, su estudio comprobó que las mermeladas de cerezas preparadas con sorbitol mostraron una menor actividad del agua asociada por lo tanto un menor crecimiento microbiano. Finalmente, el xilitol es uno de los edulcorantes más antiguos, su dulzura es 100% similar a la de la sacarosa, su principal aplicación ha sido en la goma de mascar. Estudios han demostrado que el xilitol es el mejor poliol candidato para reemplazar la sacarosa en pasteles, en gran parte debido a su capacidad para igualar la dulzura y el sabor, también se ha utilizado en la elaboración de caramelos, chocolate, helados y productos horneados, donde se ha concluido que es un sustituto de azúcar adecuado (Ronda et al. 2005)

Isomaltosa

La isomaltosa es un poliol utilizado como sustituto de azúcar con un bajo contenido calórico y bajas propiedades glucémicas en diabéticos. Es una mezcla de polioles 1-O-a-D-glucopiranosil-D-manitol (GPM) y 6-O-a-D-glucopiranosil-D-sorbitol (GPS). Es un derivado de la sacarosa en dos pasos,

El primero es el reordenamiento enzimático de sacarosa (2-O-a-D-glucopiranosil-D-fructofuranosa) en isomaltulosa (palatinosa; 6-O-a-Dglucopiranosil-D-fructofuranosa) y posteriormente la hidrogenación catalítica de isomaltulosa en isomaltosa. En el tracto digestivo superior, la isomaltosa se hidroliza lenta e incompletamente a glucosa, sorbitol y manitol (Dills, 1989). Este edulcorante aporta únicamente 2 Kcal/g, es decir la mitad de la energía aportada por la sacarosa, también estudios han comprobado su uso como dulces amigables con los dientes siendo una opción favorable para el consumo en niños, por otro lado, a diferencia de otros edulcorantes artificiales, la isomaltosa no tiene sabores amargos, metálicos u otros sabores secundarios desagradables. Sin embargo, una de las limitantes es su baja percepción de dulzor en seres humanos, comparado con a sacarosa este se percibe en un 45 a 60% (Pereira et al. 2020).

8. EDULCORANTES NO CALÓRICOS DE ORIGEN SINTÉTICO

Los edulcorantes sintéticos no calóricos empezaron a ganar popularidad durante las guerras mundiales, debido a la crisis agrícola y por ende una reducción en la producción de azúcar; por otro lado, los altos índices de obesidad en el mundo alertaron a toda la comunidad científica y se empezaron a buscar nuevas alternativas de productos que suplieran el azúcar de mesa por edulcorantes que dieran un mayor poder de dulzor pero que además tuvieran un menor o nulo índice calórico, (Scott et al. 2006). Los nuevos edulcorantes han superado el poder de dulzor comparado con la sacarosa, dentro de este grupo de edulcorantes podemos mencionar a la sucralosa, sacarina, ciclamato, aspartamo y Acesulfamo k (Figura 6).

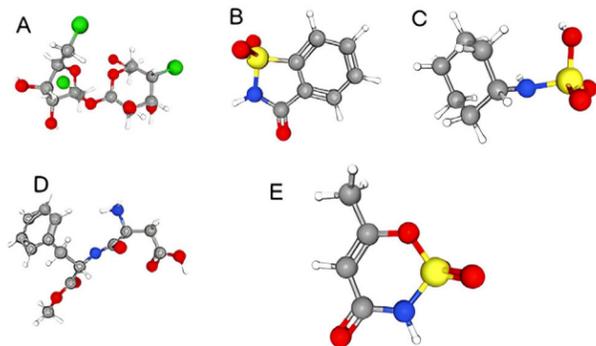


Figura 6. Moléculas de los edulcorantes no calóricos de origen sintético. A, sucralosa, B, sacarina, C, ciclamato, D, aspartamo y E, Acesulfamo k. Tomadas de National Center for Biotechnology Information (2023).

Sucralosa

La sucralosa es un edulcorante no calórico aprobado por la FDA (1999) para su venta y consumo, mejor conocido con su nombre comercial Splenda, su poder de dulzor es de 600 veces más dulce que la sacarosa y debido a ello

con pocas cantidades se puede endulzar un alimento, una característica que tiene es su estabilidad al calor, es decir si se utiliza en alimentos que requieran una alta temperatura no pierde su poder de dulzura (Duran 2013). Cuando se consume sucralosa no es digerida y metabolizada en el cuerpo humano, por ello es ampliamente consumida por personas que padecen diabetes u obesidad. A nivel comercial es utilizada en diversos productos como son postres, productos horneados, cereales, mermeladas, entre otros. (Goldsmith 2000).

Sacarina

La sacarina es el edulcorante más antiguo que se conoce, fue sintetizado en el año de 1878 por Remson y Fahlberg en la Universidad Johns Hopkins de Baltimore, es no calórico y su poder de dulzor es 300 veces más dulce que la sacarosa (Mahmood y Al- Juboori 2020). Sin embargo, en 1977 la FDA intentó prohibir este edulcorante debido a que diversos estudios de laboratorio con ratas a las cuales se les suministraban dosis de sacarina tenían una incidencia a la aparición de cáncer de vejiga (Weihrauch y Diehl 2004). Sin embargo, no se ha comprobado algún efecto secundario en humanos y en muchos países está permitido su uso bajo regulaciones específicas y dosis permisibles en bebidas, alimentos procesados y como sustituto de azúcar, (Kroger et al. 2006).

Ciclamato

Edulcorante descubierto en 1937, se caracteriza por ser un edulcorante no calórico, en países como Estados Unidos se empezó a comercializar desde 1950, pero en 1970 la FDA prohibió su uso en este país debido a que se tenían sospechas que causaba cáncer, como edulcorante es 30 veces más dulce que la sacarosa, no obstante, cuando se consume deja un sabor amargo por ello para poder incrementar su poder de dulzor y disminuir el desagradable amargor se utiliza en conjunto con la sacarina, haciendo una excelente sinergia (Chattopadhyay et al. 2014). A nivel metabólico el ciclamato muestra una toxicidad muy baja, sin embargo, cuando se consume las bacterias presentes en el intestino lo metabolizan formando un compuesto llamado ciclohexilamina que resulta tener un mayor grado de toxicidad, debido a esto, las investigaciones se están centrando en elucidar los efectos que puede tener el alto consumo de ciclamato (Renwick et al. 2004).

Aspartamo

Edulcorante descubierto en 1965 por James Schlatter, fue introducido al mercado en 1981 con el nombre de NutraSweet y en sus inicios no se tenía conocimiento de que tuviera efectos secundarios, su poder de dulzor es aproximadamente entre 180 a 200 veces mayor que la sacarosa, uno de los inconvenientes que tiene cuando se consume es su desaparición tardada del sabor dulce y un

sabor desagradable al final (Czarnecka 2021). De acuerdo con la FDA, el consumo de aspartamo está aprobado en diversos productos con dosis específicas, en América del Norte (50 mg/ peso) Europa y Asia (40 mg/peso). Debido a que el aspartamo está conformado de 2 aminoácidos L-fenilalanina y ácido L-aspártico), cuando se metaboliza se libera metanol, ácido aspártico y fenilalanina la cual es metabolizada en el hígado a tirosina mediante la enzima fenilalanina hidroxilasa. En personas que carecen de esta enzima, quienes tienen la enfermedad fenilcetonuria, no es recomendable el consumo de este edulcorante, debido a que no pueden metabolizar correctamente el aminoácido y su acumulación conlleva un daño neurológico, retraso global y discapacidad intelectual que en dosis elevadas pueden causar un riesgo, por lo que todos los alimentos que contienen aspartamo deben tener una etiqueta con la leyenda "contiene fenilalanina" (Choudhary y Lee 2018).

Acesulfamo K

Es un edulcorante desarrollado en el año de 1970 por Horchst, tiene apariencia de polvo cristalino color blanco. Se caracteriza por ser de 120 a 150 veces más dulce que la sacarosa (Karstadt 2010), es estable al calor siendo útil para productos horneados y que requieren de un tratamiento térmico (Nabors 2002). Es uno de los edulcorantes que no se metaboliza en el organismo por lo tanto su aporte calórico es nulo, siendo ampliamente utilizado en una diversidad de productos como edulcorante de mesa, néctares de frutas, productos horneados, productos lácteos e incluso en algunos productos de cuidado personal como pasta de dientes, (García 2013).

9. TIPOS DE SUSTITUTOS DE AZUCARES Y EDULCORANTES MAS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

Debido a los altos índices de prevalencia en obesidad y casos de diabetes por el consumo excesivo de azúcares se han buscado nuevas alternativas que limiten y disminuyan el consumo de azúcares simples a menos del 10% del consumo calórico diario tal es el caso de edulcorantes y sustitutos de azúcar que han cobrado gran importancia en la industria alimentaria y hoy en día se utilizan en diversos productos para disminuir el consumo de sacarosa o mejor conocida como azúcar de mesa, estos edulcorantes en su mayoría se caracterizan por su alto poder de dulzura comparada con la sacarosa, como se puede observar en la figura 6, en los cuales se observa su poder de dulzor tomando como referencia el azúcar de mesa, sin embargo, se está estudiando su efecto en la salud debido a que su consumo pudiera tener efectos desfavorables en la salud (Moorandian et al. 2017).

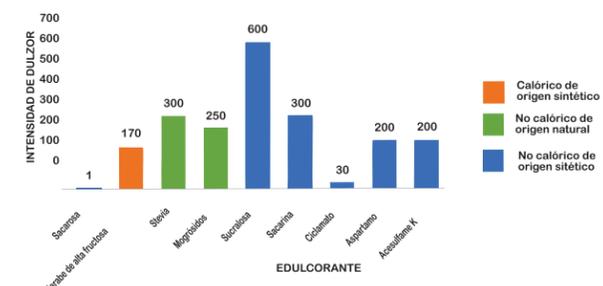


Figura 7. Intensidad de dulzor con respecto al azúcar de mesa (sacarosa). Información obtenida de Moorandian et al. (2017).

10. CONCLUSIONES

Como pudimos observar en esta revisión, es gracias al receptor del sabor dulce que tenemos en la lengua, y las interacciones que se dan entre éste y los edulcorantes que podemos darnos cuenta de que un alimento es dulce. Los edulcorantes de origen natural y sintético se introdujeron en la industria alimentaria para otorgar el sabor dulce de muchos alimentos debido a que se han considerado una alternativa para sustituir el azúcar de mesa y disminuir los índices de trastornos metabólicos y enfermedades como la obesidad y diabetes, sin embargo; es necesario seguir investigando más a fondo si los edulcorantes en este caso de origen sintético no tienen un efecto secundario en la salud, se regulen las dosis permisibles en alimentos y la dosis de ingesta para que consideren seguros y confiables para el consumidor.

11. AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Investigación y Posgrado-IPN, por el apoyo al proyecto 20231031

12. REFERENCIAS

- Anton SD, Martin CK, Han H, Coulon S, Cefalu WT, Geiselman P, Williamson D (2010). Effects of stevia, aspartame, and sucrose on food intake, satiety, and postprandial glucose and insulin levels. *Appetite* 55:1 37-43.
- Assadi FM, Mailet EL, Radek JT, Quijada J, Markley JL, Max M (2010). Key amino acid residues involved in multi-point binding interactions between brazzein, a sweet protein, and the TIR2-TIR3 human sweet receptor. *Journal of molecular biology* 398:4 584-599.
- Badui S (2016). *Química de los alimentos*. México, Pearson Educación.
- Brandle JE, Richman A, Swanson AK, Chapman BP (2002). Leaf ESTs from *Stevia rebaudiana*: a resource for gene discovery in diterpene synthesis. *Plant molecular biology* 50:4 613-622.
- Bray G, Nielsen S, Popkin M (2004). Consumption of high-fructose corn syrup in beverages may play a role in

the epidemic of obesity. *The American journal of clinical nutrition* 79:4, 537-543.

Bieleski RL. (1982). Sugar alcohols. *Plant carbohydrates I: intracellular carbohydrates*, 158-192.

Carvalho P, Carvalho E, Barbosa S, Mandarim A, Hernández A, & Del-Sol, M (2019). Efectos metabólicos del consumo excesivo de fructosa añadida. *International Journal of Morphology* 37:3, 1058-1066.

Chattopadhyay S, Raychaudhuri U, & Chakraborty R (2014). Artificial sweeteners—a review. *Journal of food science and technology* 51:4, 611-621. Chonata Orozco E. (2020). La Stevia (Rebaudiana) como edulcorante acalórico. Propuesta de su adición a galletas (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de Valencia).

Choudhary K, Lee Y (2018). The debate over neurotransmitter interaction in aspartame usage. *Journal of Clinical Neuroscience* 56: 7-15.

Czarnecka K, Pilarz A, Rogut A, Maj P, Szymańska J, Olejnik Ł, Szymański P (2021). Aspartame true or false. Narrative review of safety analysis of general use in products. *Nutrients* 13:6. 1957.

Dills W (1989). Sugar alcohols as bulk sweeteners. *Annual Review of Nutrition*, 9:1 161-186.

Doty RL (2015). *Handbook of olfaction and gustation*. John Wiley & Sons.

Durán S, Córdón K, Rodríguez MD (2013). Edulcorantes no nutritivos, riesgos, apetito y ganancia de peso. *Revista chilena de nutrición* 40:3 309-314.

Durán S, Rodríguez MD, Córdón K, Record J (2012). Estevia (Stevia rebaudiana), edulcorante natural y no calórico. *Revista chilena de nutrición* 39:4 203-206.

Fujimaru T, Park J, & Lim J. (2012). Sensory characteristics and relative sweetness of tagatose and other sweeteners. *Journal of food science*, 77:9 S323-S328.

García JM, Casado GM, García J (2013). Una visión global y actual de los edulcorantes: aspectos de regulación. *Nutrición hospitalaria* 28: 17-31.

Goldsmith LA (2000). Acute and subchronic toxicity of sucralose. *Food and chemical toxicology* 38: 53-69.

Gutierrez R, Fonseca E, Simon A (2020). The neuroscience of sugars in taste, gut-reward, feeding circuits, and obesity. *Cellular and Molecular Life Sciences* 77:18 3469-3502.

Karstadt M (2010). Inadequate toxicity tests of food additive acesulfame. *International journal of occupational and environmental health* 16:1 89-96.

Kroger M, Meister K, Kava R (2006). Low-calorie sweeteners and other sugar substitutes: a review of the safety issues. *Comprehensive reviews in food science and food safety* 5:2 35-47.

Mazi T, & Stanhope K (2023). Erythritol: An In-Depth Discussion of Its Potential to Be a Beneficial

Dietary Component. *Nutrients*, 15:1 204.

Mahmood R, Juboori B (2020). A Review: Saccharin Discovery, Synthesis, and Applications. *Ibn AL-Haitham journal for pure and applied science* 33:2 43-61.

Martín-Aragón, S. (2006). Azúcares y edulcorantes en la dieta: características y usos. *Farmacia profesional*, 20(2), 66-70.

Martín-Aragón S. (2006). Azúcares y edulcorantes en la dieta: características y usos. *Farmacia profesional*, 20:2 66-70.

Mooradian AD, Smith M, Tokuda M. (2017). The role of artificial and natural sweeteners in reducing the consumption of table sugar: A narrative review. *Clinical nutrition eSPen*, 18 1-8.

Nabors LO (2002). Sweet choices: sugar replacements for foods and beverages. *Food technology (Chicago)* 56:7 28-34.

National Center for Biotechnology Information (NCBI) 2023. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>

Qin X, Xiaoqian S, Ronggan G, Yuxian W, Zhunian T, Shouji G, Heimbach J. (2008). Subchronic 90-day oral (Gavage) toxicity study of a Luo Han Guo mogrosin extract in dogs. *Food and chemical toxicology* 44:12 2106-2109.

Pereira S, Hernandez Salazar LT, Laska M. (2021). Taste detection threshold of human (*Homo sapiens*) subjects and taste preference threshold of black-handed spider monkeys (*Ateles geoffroyi*) for the sugar substitute isomalt. *Primates*, 62 389-394.

Renwick AG, Thompson JP, O'shaughnessy M, Walter EJ. (2004). The metabolism of cyclamate to cyclohexylamine in humans during long-term administration. *Toxicology and applied pharmacology*, 196:3 367

Reyes R, Sotelo M, Panucar L (2014). Estudio de la Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) como edulcorante natural y su uso en beneficio de la salud. *Scientia Agropecuaria* 5:3 157-163.

Ribeiro G, Oliveira J (2021). Sweet taste and obesity. *European journal of internal medicine* 92:3-10.

Rani V, Deep G, Singh RK, Palle K, Yadav UC (2016). Oxidative stress and metabolic disorders: Pathogenesis and therapeutic strategies. *Life sciences* 148:183-193.

Rice T, Zannini E, Arendt, Coffey A (2020). A review of polyols—biotechnological production, food applications, regulation, labeling and health effects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60:12, 2034-2051.

Ronda F, Gomez M, Blanco CA, Caballero PA. (2005). Effects of polyols and nondigestible oligosaccharides on the quality of sugar-free sponge cakes. *Food chemistry*, 90:4 549-555.

Scott SK, Rabito FA, Price PD, Butler NN, Schwartzbaum JA, Jackson BM, Harris RE (2006). Comorbidity among the morbidly obese: a comparative study of 2002 US hospital patient discharges. *Surgery for Obesity and Related Diseases* 2:2 105-111.

Spence C. (2022). The tongue map and the spatial modulation of taste perception. *Current Research in Food Science*. 598-610-

Stephens-Camacho NA, Valdez-Hurtado S, Lastra-Zavala G, Félix-Ibarra LI (2018). Consumo de edulcorantes no nutritivos: efectos a nivel celular y metabólico. *Perspectivas en Nutrición Humana* 202

Stephens N, Valdez S, Lastra G, Félix L (2018). Consumo de edulcorantes no nutritivos: Efectos a nivel celular y metabólico. *Perspectivas en Nutrición Humana* 20:2 185-202.

Temussi PA (2006). Natural sweet macromolecules: how sweet proteins work. *Cellular and Molecular Life Sciences CMLS* 63:16 1876-1888. Vastenavond M, Bertelsen H, Hansen J, Laursen S, Saunders J y Eriknaer K (2012). Tagatose (D-tagatose). In: Nabors L, editor. *Alternative sweeteners*. Boca Raton, Fla: CRC Press

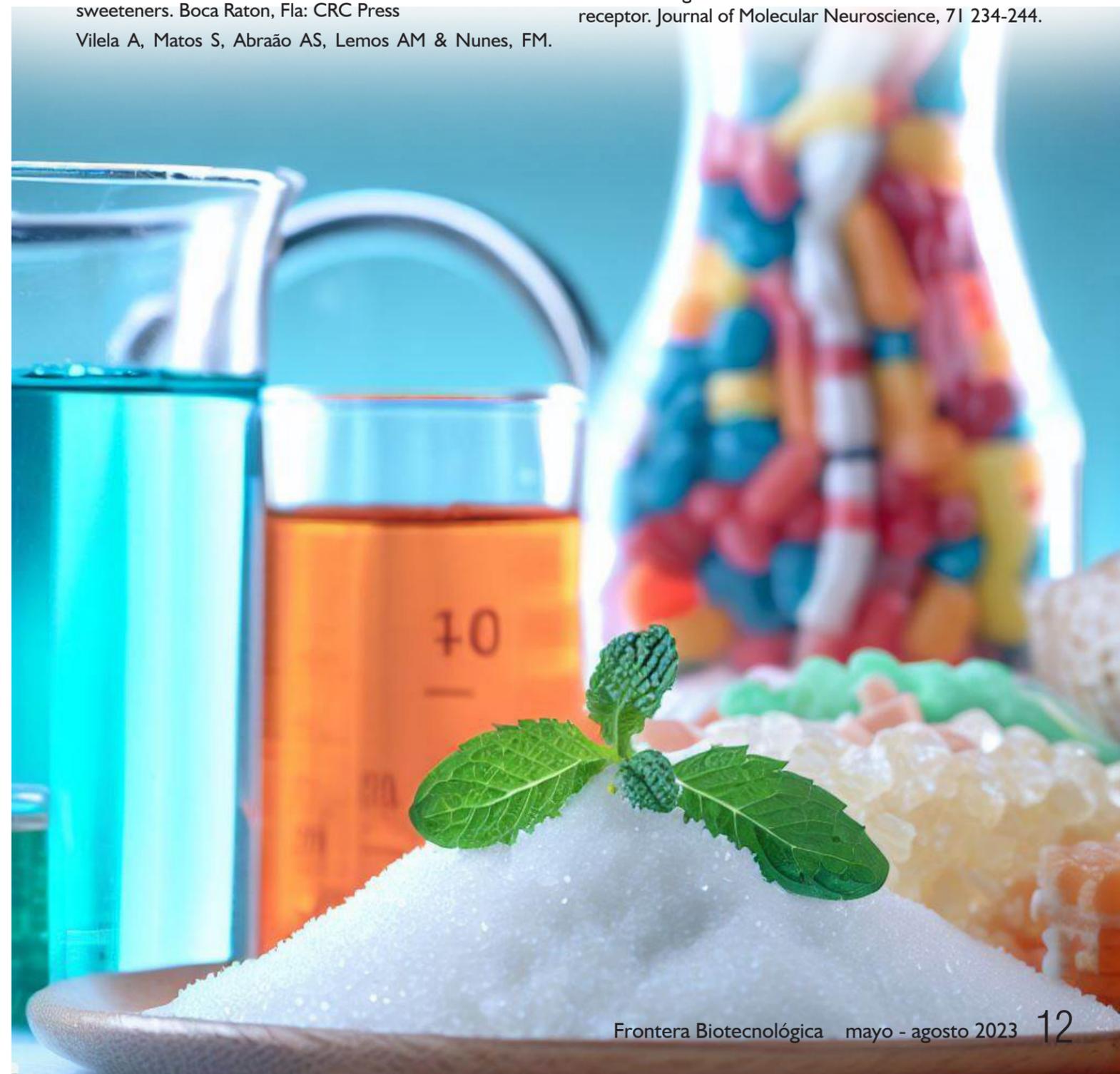
Vilela A, Matos S, Abraão AS, Lemos AM & Nunes, FM.

(2015). Sucrose replacement by sweeteners in strawberry, raspberry, and cherry Jams: Effect on the textural characteristics and sensorial profile—A chemometric Approach. *Journal of Food Processing*, 2015.

Weihrauch MR, Diehl V (2004). Artificial sweeteners do they bear a carcinogenic risk? *Annals of Oncology* 15:10 1460-1465.

Witkowski M, Nemet I, Alamri H, Wilcox J, Gupta N y Hazen S (2023). The artificial sweetener erythritol and cardiovascular event risk. *Nature Medicine*, 1:9.

Yang L, Cui M, & Liu B (2021). Current progress in understanding the structure and function of sweet taste receptor. *Journal of Molecular Neuroscience*, 71 234-244.



EXTRACCIÓN ASISTIDA POR ULTRASONIDO PARA LA OBTENCIÓN DE FLAVONOIDES: EL PUNTO DE VISTA TECNO-ECONÓMICO

Ivo Heyerdahl-Viau^{1*}

Departamento de Sistemas Biológicos, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, Calz. del Hueso 1100, Coapa, Villa Quietud, Coyoacán, 04960 Ciudad de México, CDMX
Correo electrónico del autor por correspondencia: ivoheyerdahl@gmail.com

RESUMEN

Los flavonoides son fitoquímicos con gran potencial farmacoterapéutico, por lo que es necesario estudiar los métodos de extracción para su obtención. La extracción asistida por ultrasonido es uno de los métodos más rápidos y eficientes para la obtención de flavonoides, y varios análisis tecno-económicos sugieren que también es un método más rentable comparado con otros, sobre todo en procesos continuos. Dentro de las variables a tomar en cuenta para optimizar la rentabilidad de los proyectos se encuentra la escala, la obtención de la materia prima, el tiempo de sonicación y el costo de los equipos. Sin embargo, la mayoría de los estudios se enfocan sólo en flavonoides de tipo antocianina, por lo que aún hace falta más investigación.

Palabras clave: flavonoides, extracción asistida por ultrasonido, antocianinas, análisis tecno-económico, costo de manufactura

ABSTRACT

Flavonoids are phytochemicals with great pharmacotherapeutic potential, so it is necessary to study the extraction methods to obtain them. Ultrasound-assisted extraction is one of the fastest and most efficient methods for obtaining flavonoids, and several techno-economic analyzes suggest that it is also a more feasible method compared to others, especially in continuous process. Among the variables to consider to optimize the feasibility of the projects is the scale, the obtaining of the raw material, the sonication time and the cost of the equipment. However, most studies focus only on anthocyanin-type flavonoids, so more research is still needed.

Key words: flavonoids, ultrasound-assisted extraction, anthocyanins, techno-economic analysis, cost of manufacture

1. INTRODUCCIÓN

Los flavonoides son los metabolitos secundarios más abundantes producidos por los vegetales. Son compuestos fenólicos con una estructura que consiste en 15 carbonos en un arreglo de tres anillos C6-C3-C6, dos de ellos bencénicos (anillos A y B), conectados entre sí por un anillo pirano (anillo C) (Damián-Reyna et al. 2016) (Figura 1)

De acuerdo con sus diferencias estructurales, los flavonoides se dividen en grupos: en flavanos, flavanoles, flavonas, flavonoles, flavanonas, flavanonoles, isoflavonoides, chalconas, antocianinas y neoflavonoides (Nabavi et al. 2020; Panche et al. 2016) (Figura 2).

Estos compuestos pueden encontrarse en cualquier parte del vegetal, pero es frecuente encontrarlos en flores, hojas, semillas y frutos, entre otras partes de la planta (Shen et al. 2022). Asimismo, también se cuenta con abundante evidencia científica de que los flavonoides pueden ejercer

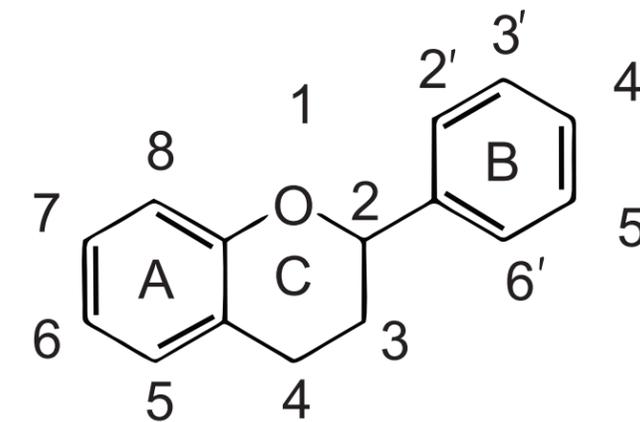
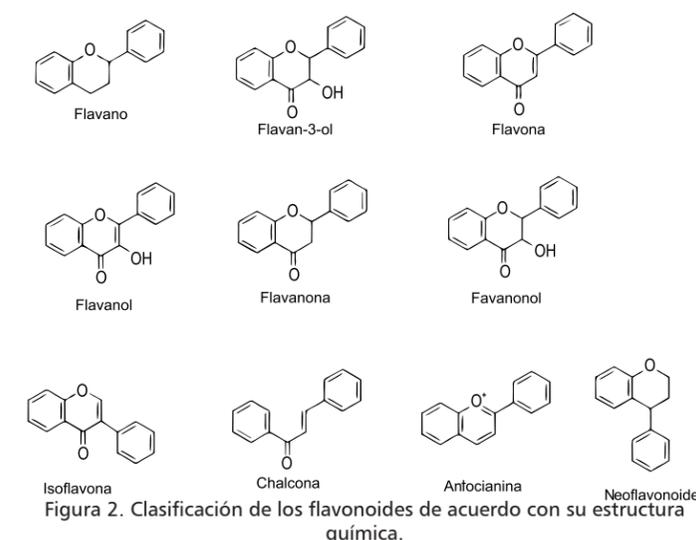


Figura 1. Estructura básica de los flavonoides.

efectos biológicos terapéuticos en humanos, incluyendo actividad cardioprotectora, antibacteriana, antifúngica, antiviral, antiinflamatoria, anticancerígena, antidiabética, neuroprotectora, entre otras, por lo que se trata de compuestos con gran potencial farmacéutico y de gran interés para la comunidad científica (Ullah et al. 2020).



El primer paso de para estudiar estos compuestos es su extracción a partir de la fuente vegetal. Para ello, se cuenta con métodos clásicos de extracción, como extracciones simples asistidas por agitación o calentamiento y soxhlet, las cuales se caracterizan por el empleo de grandes cantidades de disolventes, largos tiempos de extracción, obtención de bajos rendimientos, baja selectividad, degradación térmica de los compuestos y desventajas ambientales y económicas (Chaves et al. 2020).

Por eso, se han desarrollado métodos modernos de extracción, los cuales reducen las desventajas previamente mencionadas. Estos métodos incluyen la extracción asistida por microondas (AEM), que se basa en el uso de esta radiación para la obtención de fitoquímicos (Chaves et al. 2020), la extracción asistida por líquido presurizado

(EALP), que se basa en el empleo de altas presiones y temperaturas para mantener al disolvente de extracción en estado líquido por arriba de su punto de ebullición para aumentar la penetración a la matriz vegetal y la solubilización de los fitoquímicos (Andreu y Picó, 2019), o la extracción asistida por ultrasonido (EAU), la cual es de las técnicas más empleadas para la obtención de flavonoides debido a que es muy eficiente, rápida, reproducible, simple, ecológica y genera un rápido retorno de inversión (Chaves et al. 2020). Estas características son importantes debido a que el proceso de descubrimiento y desarrollo de un nuevo medicamento puede tomar hasta una década y un costo promedio de US\$2.8 billones (Paul et al. 2021), por lo que los investigadores deben optimizar los procesos de búsqueda y obtención de moléculas de manera que se reduzcan al máximo los costos de manufactura (CM).

En el presente artículo, se describen algunos estudios publicados en los últimos cuatro años en idioma inglés sobre los análisis tecno-económicos (ATEs) y la rentabilidad de la EAU para la extracción de flavonoides.

2. CM, PRECIOS DE VENTA Y ATEs

En términos de valor monetario, el CM es la cantidad de dinero que el productor paga para manufacturar sus productos. Posteriormente, el productor debe establecer el precio de venta de sus productos de manera tal que exista un margen de beneficio, es decir, que la manufactura del producto sea rentable y que el productor obtenga ganancias monetarias a partir de su venta (Mankiw, 2012).

Por otro lado, a lo largo de los años, se han vivido diferentes revoluciones industriales, comenzando por la primera en 1784 con la aparición de las primeras máquinas que empleaban vapor como fuente de poder. A partir de la década del 2010, se empezó a vivir la cuarta revolución industrial, también llamada "Indusrtly 4.0" (IR 4.0), la cual se basa en el uso de internet y computadoras para digitalizar y automatizar procesos de manufactura (Sreedharan.V y Unnikrishnan, 2017), así como el empleo de inteligencia artificial y análisis de datos para una rápida y eficiente toma de decisiones y mejor monitoreo y control de procesos de manera tal que puede aumentar la productividad de los manufactures y la rentabilidad de sus procesos y productos (Saleh et al. 2022).

Como parte de este enfoque de "Smart Industries" de la IR 4.0, surgen los ATEs, que buscan optimizar los procesos de producción y los parámetros económicos simultáneamente. Para ello, mediante softwares profesionales, se lleva a cabo una simulación computacional del proceso previamente conceptualizado y con ello, una serie de análisis holísticos completados consecutivamente: 1) diseño del proceso, 2) modelado del proceso, 3) dimensionamiento de equipos, 4) costo de capital (incluyendo costos del equipo y materiales establecidos en los pasos previos), 5) costos de operación

(incluyendo costos de obtención y procesamiento de materias primas, de labor de operación y de tratamiento de residuos, entre otros) y 6) análisis de flujo de dinero. Con ello, se hace un balance económico con el que el productor puede predecir variables importantes de su proceso como el CM, el tiempo de retribución, los precios de compra de insumos y los precios de venta que debe establecer para que el proceso y el producto se rentable. La realización de estos análisis se ha vuelto más relevante hoy en día debido a la gran competencia comercial entre empresas de diferentes industrias y a la posibilidad de un mejor aprovechamiento de los recursos con los que cuentan los investigadores (Chai et al. 2022).

Por ello, hoy en día los químicos y biotecnólogos frecuentemente se apoyan del software SuperPro Designer®. Es un programa que se desarrolló específicamente llevar a cabo ATEs de bioprocesos y es capaz de realizar la simulación computacional con diferentes tipos y marcas de equipos, a diferentes dimensiones y en procesos continuos o por lotes para predecir y ajustar las condiciones óptimas del proceso, los rendimientos obtenidos con esas condiciones y los costos que conlleva. Asimismo, también puede predecir el balance de energía y materiales y la caracterización del flujo de desechos. Además, este software es fácil de usar para investigadores no expertos, por lo que es una buena herramienta para iniciarlos y orientarlos en todo lo referente a los aspectos económicos de sus experimentos (Canizales et al. 2020).

3. FUNDAMENTO DE LA EAU Y SU APLICACIÓN PARA LA EXTRACCIÓN DE FLAVONOIDES

La EAU se basa en el hecho de que el ultrasonido genera cavitación (Vinatoru et al. 2017), es decir, la generación, crecimiento y colapso de millones de burbujas del líquido del medio de extracción (Roohinejad et al. 2016); el ultrasonido se propaga a través de ondas sucesivas de compresión y rarefacción, y cuando se encuentra en interfaces líquido-sólido como lo son los medios de extracción fitoquímica, se generan las burbujas de cavitación durante la rarefacción, las cuales crecen progresivamente durante ciclos sucesivos debido a que ingresan a ellas pequeñas cantidades de gas o vapor del medio. Parte de este gas es expulsado durante la fase de compresión hasta que, después de algunos ciclos, las burbujas alcanzan un tamaño inestable y colapsan violentamente, generando un chorro de disolvente que se dispara a alta velocidad y que impacta con el vegetal (Vinatoru et al. 2017) (Figura 3), generándole daños como erosión, fragmentación y sonoporación (aumento de la permeabilidad de la membrana celular), entre otros (Chemat et al. 2017), dando lugar a la extracción de fitoquímicos, como los flavonoides.

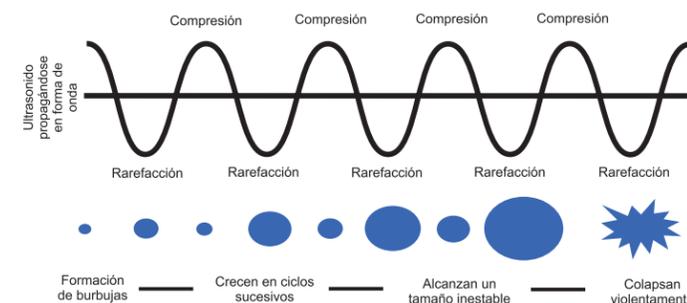


Figura 3. Generación de burbujas de cavitación por ultrasonido.

La EAU presenta varias ventajas. Por ejemplo, se reduce el tiempo de extracción, el volumen de disolventes y las temperaturas utilizadas y es útil para la obtención de compuestos termolábiles (Zhang et al. 2018). Además, la EAU se puede combinar con otros métodos de extracción convencionales, dando lugar a técnicas como el sono-soxhlet o incluso con otros métodos modernos de extracción, dando lugar a técnicas como la extracción asistida por ultrasonido-microondas (EAUM) o extracción asistida por ultrasonido y líquidos presurizados (EAULP). Asimismo, hoy en día ya se cuenta con equipos de EAU de escala industrial (Chemat et al. 2017), por lo que puede ser aprovechado por las grandes empresas si se estandarizan las condiciones de trabajo

Anteriormente ya se ha demostrado que la EAU es un buen método de extracción de flavonoides y es posible obtener mejores rendimientos comparados con métodos clásicos o incluso métodos modernos como AEM. (Lin et al. 2021). Por eso, también es importante estudiar la rentabilidad de este método de extracción para la obtención de flavonoides.

4. ATEs DE LA EXTRACCIÓN DE FLAVONOIDES MEDIANTE EAU

Hoy en día se cuenta con varios estudios que sugieren que la EAU es un método más rentable para la obtención de flavonoides a comparación de otros métodos de extracción. Por ejemplo, en un estudio, se determinó el contenido total de fenoles (CTF) obtenido a partir de *Adenaria floribunda* mediante EAU, soxhlet y extracción con agua caliente (EAC), encontrando que a pesar de que la extracción con soxhlet obtuvo mayores rendimientos de CTF, también fue 36 veces más lento y requirió mayor consumo de energía que las otras dos extracciones, lo cual condujo a que, de acuerdo con un ATE llevado a cabo con SuperPro Designer®, también generara mayor CM (US\$5.8 por frasco-l de 100 mL de extracto) comparado con EAC (US\$3.92 por frasco-l) y EAU (US\$3.86 por frasco-l), y sólo es rentable si el extracto obtenido se vende a US\$7 por frasco-l, mientras que los procesos de EAU y EAC son igualmente rentables si el producto se vende a US\$4 por frasco-l, pero la EAU permite mayores rendimientos de extracción en menor tiempo, lo que lo hace un método más eficiente. Sin embargo, aunque se encontró el flavonoide

catqueina en estos extractos, este estudio se enfocó en el CTF en general y no únicamente en flavonoides (Valdés-Duque et al. 2022). A pesar de ello, es un buen indicativo de la rentabilidad de la EAU para la obtención de este tipo de compuestos frente a otros métodos de extracción.

En otro estudio, se empleó el software SuperPro Designer® para estudiar las variables y condiciones con las que se puede optimizar la rentabilidad de la EAU en un extractor semicontinuo para la obtención de fenoles a partir de infrutescencia de iraca (*Carludovica palmata*). Como resultado, se encontró que el CM disminuyó de US\$456.04 Kg-l a US\$93.43 Kg-l cuando la capacidad del extractor aumentó de 5 L a 500 L, por lo que el escalado es factible. Asimismo, el CM estimado más bajo fue de US\$56.09 Kg-l cuando el precio de venta del producto obtenido es de e US\$100 Kg-l y el costo de los equipos es de US\$1.73 x 106. Nuevamente, aunque en la práctica se encontró el flavonoide apigenina, el estudio se enfocó en fenoles en general (Galviz-Quezada et al. 2019). Sin embargo, tal como se observa en otros estudios descritos a continuación, su aporte en el enfoque de los costos del escalado de estos procesos es valioso.

Por otro lado, los estudios sobre la rentabilidad de la extracción de antocianinas mediante EAU son los más frecuentes para flavonoides. El interés en la comunidad científica sobre este grupo específico de flavonoides recae en sus diversas actividades biológicas (antioxidante, antiinflamatoria, anticancerígena, antimicrobiana, etc.), su baja toxicidad y su buena hidrosolubilidad (Tan et al. 2022).

Por ejemplo, en un estudio se evaluó obtención de extractos ricos en antocianinas a partir de ñame morado (*Dioscorea alata*) mediante EAU, extracción asistida por disolventes a baja presión (LPSE) y soxhlet, encontrando que, en condiciones óptimas, la EAU no sólo obtuvo mejores rendimientos de extracción en menor tiempo, sino que el CM, evaluado mediante un ATE llevado a cabo con SuperPro Designer®, fue menor (US\$124.08 Kg-l) comparado con el de LPSE (US\$263.65 Kg-l) y soxhlet (US\$765.13 Kg-l). Este CM se obtuvo en un proceso semicontinuo empleando un extractor de 500 L, mientras que un reactor de 5 L genera un CM mucho mayor (US\$950.52 Kg-l); en el caso del reactor de 500 L el proceso rentable si el precio de venta del extracto obtenido es mayor a US\$170 Kg-l mientras que para proyectos de laboratorio a baja escala (5 L) es importante considerar que el proceso sólo es rentable si el precio de venta del producto es mayor (>US\$250 Kg-l), por lo que el tiempo de retribución también es mayor (Ochoa et al. 2020). Asimismo, cabe hacer notar que el CM en este estudio es 24% mayor que el estudio realizado por Galviz-Quezada et al. (2019) anteriormente descrito, lo cual puede explicarse con que dicho artículo consideró nulo el costo del material crudo debido a que la infrutescencia de iraca es un subproducto de los cultivos de ese vegetal y, por

lo tanto, el CM también fue menor al del estudio de Ochoa et al. (2020), lo cual demuestra que gran parte del costo del proceso depende de las materias primas y su obtención, y no sólo del método montado en el laboratorio.

Por ello, en otro estudio posterior realizado por los mismos autores, se llevó a cabo un ATE con el mismo software para la obtención del mismo extracto a partir de la misma materia prima, pero esta vez tomando en cuenta variables como los costos de compra del material crudo, su lavado y procesamiento, la recuperación del producto obtenido y el lavado posterior a la extracción. Asimismo, en esta ocasión simulamos el proceso en una planta con una capacidad de 600 Kg h⁻¹ en un proceso continuo. Como resultado, se observó que, a pesar de que las nuevas variables sí influyeron en el CM, si se considera un precio de compra de fñame morado de US\$0.8 Kg⁻¹, este nuevo método con proceso continuo redujo mucho el CM (US\$15.49 Kg⁻¹) en comparación con el del estudio previo debido a que los procesos continuos reducen el tiempo de producción, mejoran la utilización del equipo y mejora la consistencia de la calidad del producto. Este proceso resulta rentable cuando el extracto rico en antocianinas obtenido se vende a US\$22 Kg⁻¹ (Ochoa et al. 2021).

Por otro lado, en otro estudio se llevó a cabo un ATE comparativo entre EAU y extracción asistida por calentamiento para la obtención de un polvo crudo de antocianinas a partir de cáliz de *Hibiscus sabdariffa* con extractores de 600 L. No es de sorprender que la EAU obtuvo un menor CM (US\$164.28/Kg) comparado con el método clásico (US\$176.31/Kg) con una certidumbre de 80.08%, pero, lo que es más, se realizó un análisis de sensibilidad, es decir, un análisis de cómo se ve afectado el CM en función a los cambios que pueden sufrir las diferentes variables del proceso; como resultado, se encontró que el tiempo de tratamiento ultrasónico tuvo la mayor contribución positiva (aumento del COM), con un +61.2%, seguido de la obtención de otros compuestos distintos a antocianinas (+21.1%), el costo del extractor (17%), el precio de la planta (+0.5) y la recuperación de antocianinas (+0.2%) (Adeyi et al. 2021). Este es un trabajo muy valioso ya que señala cuáles son las variables que más pueden afectar la rentabilidad del proceso, lo cual puede orientar al resto de investigadores.

Por último, cabe mencionar que en un estudio se empleó la EAULP para obtener fenoles a partir de la fruta de la pasión, encontrando flavonoides C-glicosilados como isoorientina, vicenina, isovitexina, vitexina y orientina. Aunque se obtuvieron mejores rendimientos con esta técnica que con la EALP sola, la mejoría no fue estadísticamente significativa. Posteriormente, al llevar a cabo el ATE con el software SuperPro Designer®, se encontró que con las condiciones empleadas en la práctica (extractor con capacidad para 300 mL), el CM fue de US\$245.46/g (Pereira et al. 2021), lo cual es mucho más costoso que los métodos previamente

descritos, lo cual puede deberse a la combinación de métodos de extracción y, nuevamente, a que se evaluó el enfoque de un proyecto a baja escala. Sin embargo, dado que es fácil de adaptar la EAU a otros métodos de extracción, este estudio es importante y deberán hacerse más análisis con este enfoque para evaluar otras combinaciones de métodos de extracción y a diferentes escalas para comparar tanto los rendimientos de extracción como los CMs.

5. CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

Mediante el empleo de EAU se obtienen buenos rendimientos de extracción de flavonoides, y, en muchas ocasiones, superiores comparados con los obtenidos mediante otras técnicas. Asimismo, si se optimizan las condiciones, puede resultar ser un método más rentable y rápido en comparación a otros, por lo que en general, se trata de una técnica muy eficiente y una buena opción para la obtención de flavonoides para su posterior estudio, sobre todo en extractores que llevan a cabo procesos continuos. Sin embargo, hay que considerar que, de acuerdo con algunos estudios, este método puede resultar más costoso si se aplica a baja escala, lo cual puede dificultar los primeros pasos de la investigación, por ejemplo, a nivel universitario. Además, la obtención de la materia prima y su procesamiento también influyen significativamente en los CMs del proceso, por lo que deben estudiarse cuidadosamente al montar el método. Por último, también es necesario resaltar que algunos estudios están enfocados en el ATE de la EAU para fenoles en general, y los trabajos que abordan exclusivamente flavonoides suelen enfocarse sólo en antocianinas, por lo que, en general, esta línea de investigación aún es incipiente y hacen falta más análisis sobre los costos y rentabilidad de la obtención de flavonoides mediante EAU.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adeyi O, Adeyi AJ, Oke EO, Okolo BI, Olalere AO, Otolorin JA, Taiwo AE (2021) Techno-economic and uncertainty analyses of heat- and ultrasound-assisted extraction technologies for the production of crude anthocyanins powder from *Hibiscus sabdariffa* calyx. *Cogent Engineering* 8(1):1947015.
- Andreu V, Picó Y (2019) Pressurized liquid extraction of organic contaminants in environmental and food samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 118:709–721.
- Canizales L, Rojas F, Pizarro CA, Caicedo-Ortega NH, Villegas-Torres MF (2020) SuperPro Designer®, User-Oriented Software Used for Analyzing the Techno-Economic Feasibility of Electrical Energy Generation from Sugarcane Vinasse in Colombia. *Processes* 8(9):1180.
- Chai SYW, Phang FJF, Yeo LS, Ngu LH, How BS (2022) Future era of techno-economic analysis: Insights from review. *Frontiers in Sustainability* 3:70.

Adeyi O, Adeyi AJ, Oke EO, Okolo BI, Olalere AO, Otolorin JA, Taiwo AE (2021) Techno-economic and uncertainty analyses of heat- and ultrasound-assisted extraction technologies for the production of crude anthocyanins powder from *Hibiscus sabdariffa* calyx. *Cogent Engineering* 8(1):1947015.

Andreu V, Picó Y (2019) Pressurized liquid extraction of organic contaminants in environmental and food samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 118:709–721.

Canizales L, Rojas F, Pizarro CA, Caicedo-Ortega NH, Villegas-Torres MF (2020) SuperPro Designer®, User-Oriented Software Used for Analyzing the Techno-Economic Feasibility of Electrical Energy Generation from Sugarcane Vinasse in Colombia. *Processes* 8(9):1180.

Chai SYW, Phang FJF, Yeo LS, Ngu LH, How BS (2022) Future era of techno-economic analysis: Insights from review. *Frontiers in Sustainability* 3:70.

Chaves JO, de Souza MC, da Silva LC, Lachos-Perez D, Torres-Mayanga PC, Machado APDF, Forster-Carneiro T, Vázquez-Espinosa M, González-de-Peredo AV, Barbero GF, Rostagno MA (2020) Extraction of Flavonoids From Natural Sources Using Modern Techniques. *Frontiers in Chemistry* 8:864.

Chemat F, Rombaut N, Sicaire AG, Meullemiestre A, Fabiano-Tixier AS, Abert-Vian M (2017) Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry* 34:540–560.

Damián-Reyna AA, González-Hernández JC, Chávez-Parga MDC (2016) Current procedures for extraction and purification of citrus flavonoides. *Revista Colombiana de Biotecnología* 18(1):135–147.

Galviz-Quezada A, Ochoa-Aristizábal AM, Arias-Zabala ME, Ochoa S, Osorio-Tobón JF (2019) Valorization of iraca (*Carludovica palmata*, Ruiz & Pav.) infructescence by ultrasound-assisted extraction: An economic evaluation. *Food and Bioproducts Processing* 118:91–102.

Lin X, Wu L, Wang X, Yao L, Wang L (2021) Ultrasonic-assisted extraction for flavonoid compounds content and antioxidant activities of India *Moringa oleifera* L. leaves: Simultaneous optimization, HPLC characterization and comparison with other methods. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants* 20:100284.

Mankiw GN (2012) Principios de Economía (6ta edición). CENAGE Learning. México, D.F. 260 pp.

Nabavi SM, Šamec D, Tomczyk M, Milella L, Russo D, Habtemariam S, Sutar I, Rastrelli L, Daglia M, Xiao J, Giampieri F, Battino M, Sobarzo-Sanchez E, Nabavi SF, Yousefi B, Jeandet P, Xu S, Shiroye S (2020) Flavonoid biosynthetic pathways in plants: Versatile targets for metabolic engineering. *Biotechnology Advances* 38:107316.

Ochoa S, Durango-Zuleta MM, Osorio-Tobón JF (2020) Techno-economic evaluation of the extraction of anthocyanins from purple yam (*Dioscorea alata*) using ultrasound-assisted extraction and conventional extraction processes. *Food and*

Bioproducts Processing 122:111–123.

Ochoa S, Durango-Zuleta MM, Osorio-Tobón JF (2021) Integrated process for obtaining anthocyanins rich-extract by ultrasound-assisted extraction and starch recovery from purple yam (*Dioscorea alata*): a techno-economic evaluation. *Biomass Conversion and Biorefinery* 1–10.

Panche AN, Diwan AD, Chandra SR (2016) Flavonoids: an overview. *Journal of Nutritional Science* 5:e47.

Paul D, Sanap G, Shenoy S, Kalyane D, Kalia K, Tekade RK (2021) Artificial intelligence in drug discovery and development. *Drug Discovery Today* 26(1):80.

Pereira DTV, Zobot GL, Reyes FGR, Iglesias AH, Martínez J (2021) Integration of pressurized liquids and ultrasound in the extraction of bioactive compounds from passion fruit rinds: Impact on phenolic yield, extraction kinetics and technical-economic evaluation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 67:102549.

Roohinejad S, Koubaa M, Barba FJ, Greiner R, Orlin V, Lebovka NI (2016) Negative pressure cavitation extraction: A novel method for extraction of food bioactive compounds from plant materials. *Trends in Food Science & Technology* 52:98–108.

Saleh N, Ijab MT, Hashim N (2022) A Review on Industrial Revolution 4.0 (IR4.0) Readiness Among Industry Players. In *International Conference on Computer, Information Technology and Intelligent Computing (CITIC 2022)*. Edited by SC Haw and K Sonai Muthu. Atlantis Press. 216-231 pp.

Shen N, Wang T, Gan Q, Liu S, Wang L, Jin B (2022) Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. *Food Chemistry* 383:132531.

Sreedharan VR, Unnikrishnan A (2017) Moving Towards Industry 4.0: A Systematic Review. *International Journal of Pure and Applied Mathematics* 117(20):929–936.

Tan J, Han Y, Han B, Qi X, Cai X, Ge S, Xue H (2022) Extraction and purification of anthocyanins: A review. *Journal of Agriculture and Food Research* 8:100306.

Ullah A, Munir S, Badshah SL, Khan N, Ghani L, Poulson BG, Emwas AH, Jaremko M (2020) Important Flavonoids and Their Role as a Therapeutic Agent. *Molecules* 25(22):5243.

Lopeda-Correa M, Valdés-Duque M, Osorio-Tobón, JF. (2022). Ultrasound-Assisted Extraction of Phenolic Compounds from *Adenaria floribunda* Stem: Economic Assessment. *Foods* 11(18):2904.

Vinatoru M, Mason TJ, Calinescu I (2017) Ultrasonically assisted extraction (UAE) and microwave assisted extraction (MAE) of functional compounds from plant materials. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 97:159–178.

Zhang QW, Lin LG, Ye WC (2018) Techniques for extraction and isolation of natural products: A comprehensive review. *Chinese Medicine* 13(1):1–26.

APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA ELABORACIÓN DE VERMICOMPOSTA Y DIGESTATO, UNA REVISIÓN

Angélica Romero-Rodríguez* María Myrna Solís Oba, Daniel Santos Ubaldo y José Agustín Pacheco Ortiz.
Centro de investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA-IPN), Tlaxcala, México.
*Autor de correspondencia Email: aromeror1000@alumno.ipn.mx

RESUMEN

Por mucho tiempo se consideraba que el alcance de la biotecnología sólo era el uso de la tecnología para modificar o mejorar parcial o totalmente un sistema o procesos biológicos para el bienestar industrial y del humano. Sin embargo, actualmente y gracias a los avances en la ciencia, los beneficios que trae la biotecnología también son al ambiente, enfocados a resolver los problemas como el cambio climático, aprovechamiento de residuos, restauración de aguas y suelos contaminados, entre otros. Específicamente el manejo adecuado y aprovechamiento de los residuos agroindustriales como materia prima, pueden emplearse partir de procesos de transformación con microorganismos para la obtención de biocombustibles; producción de alto valor agregado como son las enzimas, vitaminas, antioxidantes, alimentos para animales, antibióticos y fertilizantes orgánicos como la vermicomposta y el digestato. Este aprovechamiento de los residuos puede ayudar a reducir los costos de producción y la carga de contaminación al medio ambiente. El presente escrito es una revisión bibliográfica que tiene como objetivo conocer un poco más sobre la vermicomposta y el digestato que se obtienen a partir de residuos agroindustriales y las características que hacen que estos productos puedan ser utilizados en la agricultura.

Palabras clave: Agroindustrial, Residuos, Fertilizante.

ABSTRACT

For a long time it was considered that the scope of biotechnology was only the use of technology to partially or totally modify or improve a biological system or processes for industrial and human well-being. However, currently and thanks to advances in science, the benefits that biotechnology brings are also to the environment, focused on solving problems such as climate change, waste management, restoration of contaminated water and soil, among others. Specifically, the proper management and use of agro-industrial waste as raw material, can be used from transformation processes with microorganisms to obtain biofuels; production of high added value such as enzymes, vitamins, antioxidants, animal feed, antibiotics and organic fertilizers such as vermicompost and digestate. This use of waste can help reduce production costs and the pollution load on the environment. This paper is a bibliographical review that aims to learn a little more about vermicompost and digestate that are obtained from agro-industrial residues and the characteristics that make these products usable in agriculture.

Keywords: Agroindustrial, Waste, Fertilizer.

I. INTRODUCCIÓN

Los residuos son aquellos materiales o productos que son desechados y que se encuentran en estado sólido o semisólido, líquido o gaseoso, comúnmente se contienen en recipientes o depósitos; pueden ser susceptibles de ser valorizados o requieren sujetarse a tratamiento o disposición final (SEMARTNAT 2006).

Específicamente, las industrias basadas en la agricultura producen una gran cantidad de residuos orgánicos anualmente, éstos al ser liberados al ambiente, sin un procedimiento de eliminación adecuado, causan contaminación ambiental, gastos económicos y efectos nocivos para la salud de diferentes organismos en los ecosistemas. Las practicas para la eliminación o manejo de estos residuos por lo regular son la quema, vertimiento a relleno sanitario no planificado (Sadh et al. 2018). Sin embargo, los residuos orgánicos no sólo representan un riesgo para el ambiente y la salud cuando no se disponen adecuadamente, también son una fuente en gran medida, de proteínas, azúcares y minerales debido a su composición nutricional, además pueden aprovecharse como materias primas para la producción y desarrollo de otros productos de base biológica como por ejemplo biocombustibles, enzimas, alimentos para animales, biofertilizantes, etcétera; donde su uso puede además, ayudar a reducir el costo de producción (Cortez y Ligabue-Braun 2021).

En general se pueden considerar dos tipos de residuos agroindustriales, los residuos agrícolas y los residuos industriales (provenientes del procesamiento de alimentos). Además los residuos agrícolas se pueden dividir en residuos de campo y residuos de proceso (Figura 1) (Sadh et al. 2018). Las características o composición química y biológica de los residuos agroindustriales dependen del proceso de transformación y de la materia prima utilizada; sin embargo, la mayoría son materiales lignocelulósicos y contienen en mayor porcentaje celulosa, hemicelulosa y lignina (Alonso et al. 2012).

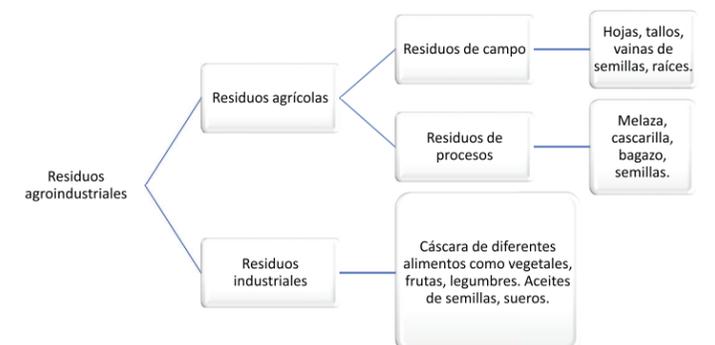


Figura 1. Residuos agroindustriales (Sadh et al. 2018)

El presente artículo es una revisión bibliográfica de la obtención de fertilizantes orgánicos (vermicomposta y digestato) a partir de residuos agroindustriales, que es una

de las aplicaciones que se ha dado para el aprovechamiento de dichos residuos.

2. FERTILIZANTES ORGÁNICOS

Un fertilizante es cualquier producto, ya sea de origen natural o sintético, que se aplica al suelo o a los tejidos de las plantas para suministrar uno o más de los nutrientes esenciales para el crecimiento de los organismos vegetales. La mayoría de los fertilizantes empleados en la agricultura, son comerciales y proporcionan los tres nutrientes principales de las plantas el nitrógeno, fósforo y potasio (Larramendy y Soloneski 2019).

Específicamente, los fertilizantes orgánicos representan un amplio grupo de materiales derivados de subproductos agrícolas e industriales; cada uno de ellos tiene un proceso de degradación diferente, ya sea por parte de macro y microorganismos (anélidos, artrópodos, bacterias, hongos, actinomicetos, etc.), en procesos aeróbicos o anaeróbicos. Los fertilizantes de fuentes orgánicas son esenciales para la microbiota del suelo que descomponen la materia del fertilizante para crecer y liberan los nutrientes al suelo, beneficiando así a las plantas que se encuentran en ese medio (Pratap 2012). El uso de residuos para su obtención reduce los costos de producción, además, se sabe que los nutrientes que incorporan al suelo se mantienen por más tiempo, tienen un impacto menor al medio ambiente, aumentan el contenido de materia orgánica del suelo y son económicos para los agricultores que producen a baja y mediana escala (Gómez et al. 2011). Entre los fertilizantes orgánicos más empleados destacan las vermicompostas y el digestato.

3. VERMICOMPOSTA

El vermicompostaje se refiere a un proceso de compostaje realizado por diferentes especies de lombrices de tierra, una de las más utilizadas es *Eisenia fetida*, que tienen una capacidad natural de degradar residuos orgánicos, al descomponerlos mecánicamente, aumentando así el área de superficie del sustrato y, con ello, aumenta la actividad microbiana externa y dentro del intestino de la lombriz (Atiyeh et al. 2000). Prácticamente cualquier material de origen biológico y de naturaleza biodegradable puede ser utilizado como material sustrato para el proceso de vermicompostaje, siempre que no contenga ninguna sustancia potencialmente tóxica para las lombrices. Dado que los residuos del procesamiento agroindustrial son el subproducto o producto final del procesamiento de materiales agrícolas, ofrecen oportunidades potenciales para ser utilizados como sustrato para las lombrices de tierra y los microorganismos.

La vermicomposta tiene muchos beneficios, funciona como promotor y protector del crecimiento de las plantas,

tienen cantidades altas de macroelementos como N, K y P, micronutrientes, microorganismos beneficiosos del suelo como bacterias fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fósforo, también libera enzimas como amilasa, lipasa, celulasa y quitinasa que continúan descomponiendo la materia orgánica en el suelo para liberar los nutrientes y ponerla a disposición de las raíces de las plantas. Le confiere al suelo alta porosidad, drenaje y capacidad de retención de agua; de igual forma se conoce que la liberación de nutrientes se lleva a cabo en un período de tiempo más largo y funciona como “fertilizante de liberación lenta”. Por otro lado, la vermicomposta también protege a las plantas contra diversas plagas y enfermedades, ya que las lombrices de tierra bioacumulan y biodegradan sustancias tóxicas y matan a los patógenos en el medio en el que habitan (Pratap 2012; Ghoreishy et al. 2018; Mupambwa y Mkeni 2018).

Entre los trabajos realizados para la obtención de vermicomposta a partir de los residuos agroindustriales, Nogales et al. (2005) reportaron que el principal residuo de la actividad vitivinícola es el sarmiento producido durante la poda de la vid. El potencial de estos residuos en el vermicompostaje ha sido investigado utilizando *Eisenia andrei*. La biomasa de lombrices y la actividad enzimática siguió durante 16 semanas de vermicompostaje en un experimento en laboratorio. Los cambios en las enzimas hidrolíticas y las actividades microbianas en general durante el proceso de vermicompostaje indicaron la descomposición de los residuos. El resultado fue la obtención de un material estable que puede ser utilizado como fertilizante, su caracterización mostró una relación C:N óptima (menor a 20), con una conductividad eléctrica ligeramente salina, sin evidencia que fuera fitotóxico, con altas cantidades de materias húmicas y el contenido de nutrientes como el nitrógeno y el potasio fue superior después del proceso de vermicompostaje (el nitrógeno aumentó un 53% y el potasio aumentó un 73%), por último el pH se estabilizó en 7. Dichos resultados mostraron que el valor agronómico de estos residuos es alto, ya que no afectó el proceso de las lombrices para su degradación y además dadas las características del producto final, éste puede ser empleado como fertilizante.

Por otro lado, Palma et al. (2016) evaluaron la calidad nutricional de diferentes vermicompostas elaboradas con residuos de cachaza, bagazo y caña de azúcar de la agroindustria, mezclados con diferentes fuentes de estiércol (gallina, caballo, vaca y borrego), sometidas a vermicompostaje con lombriz *Eisenia fetida*, durante tres meses, los resultados mostraron que las vermicompostas tuvieron un valor de pH y materia orgánica aceptable (entre 6.2 y 6.7, y entre 39 y 47%, respectivamente), la conductividad eléctrica y la relación C/N fueron superiores al rango aceptable (entre 5.32 dSm-1 y 7.26 dSm-1, y entre el 63.1 y el 83.14, respectivamente) y el nitrógeno total fue inferior a lo registrado en la norma (0.37%). Se evidenció

que los mejores tratamientos fueron los adicionados con estiércol de borrego y vaca, ya que la aplicación del estiércol provee cantidades importantes de microorganismos que ayudan al proceso de degradación de los residuos, así como también aporta cantidades importantes de nutrientes como el nitrógeno.

Por último, Namli et al. (2020) llevaron un monitoreo de supervivencia de la lombriz de tierra *Eisenia fetida* durante el vermicompostaje de residuos de la industria azucarera. Estos residuos se denominan Lodos de Decanter (DS) y PKF(residuos de suelo de filtro de prensa). En el experimento se prepararon 11 mezclas diferentes de DS, PKF y estiércol de corral (FYM) en diferentes proporciones. Los resultados del estudio indicaron que las lombrices no vivían en el medio que contiene más del 50% de PKF y 50% de DS. Concluyeron que el vermicompost puede ser obtenido de los desechos de producción de la fábrica de azúcar mediante la aplicación del proceso de vermicomposta en lodos de Decanter en la proporción máxima del 50% o su mezcla con PKF junto con FYM.

4. DIGESTATO

Los residuos agroindustriales o estiércoles de animales son utilizados para la producción de biogás, en donde aproximadamente del 20-95% de la materia prima orgánica se degrada (dependiendo de la composición de la materia prima), por medio de un proceso de digestión anaeróbica o biometanización, este último es un proceso biológico que se da en ausencia de oxígeno a través de diferentes etapas, en donde participan poblaciones bacterianas, las cuales actúan catalizando cuatro fases consecutivas: hidrolítica, acidogénica, acetogénica y metanogénica. Los microorganismos transforman la fracción más degradable de la materia orgánica en biogás (compuesto formado en su gran mayoría por metano y dióxido de carbono); mientras que los compuestos de más difícil digestión van a conformar el digestato. Tal cual el digestato es un subproducto del proceso de digestión que puede ser utilizado como fertilizante orgánico, ya que contiene nutrientes como el nitrógeno y fósforo, entre otros macro y micronutrientes, que se mineralizan en el digestor, pasan a estar disponibles y no se pierden en el proceso. Un ejemplo de los compuestos que están disponibles en los digestatos (y que es de suma importancia en el suelo), es la presencia de nitrógeno como amonio (NH₄⁺). El digestato mejora el rendimiento del cultivo cuando se usa como fertilizante, ya que aparte de los macro y micronutrientes que aporta al suelo, también presenta compuestos reguladores del crecimiento vegetal que beneficia directamente al desarrollo de la planta (Möller y Müller 2012; Bongiovanni et al. 2018).

Para el caso de la producción de digestato (también llamado biol), Gordon (2013) elaboró un abono líquido mediante fermentación anaeróbica a partir de suero de leche y otros componentes (agua, estiércol, melaza, alfalfa, ceniza, humus y lactofermento) en diferentes concentraciones establecidas en 4 tratamientos, obtuvo los mejores resultados de composición

del abono en el tratamiento donde la concentración de suero de leche fue mayor. La mezcla de lactosuero con excretas de ganado vacuno presentó un pH de 5.8, los macronutrientes presentes son importantes para el beneficio de las plantas (P₂O₅ 1.39%, K₂O 0.14%, Ca 0.053% y Mg 0.014%), debido al tipo de alimentación semi intensivo que se brinda en la ganadería.

Ivanchenko et al. (2021) obtuvieron biogás y digestato a partir de residuos que contienen N, P, K y Ca, residuos vegetales y lodos activados de aguas residuales espesadas, sobre la producción de biogás y la calidad agronómica de los digestatos. La eficiencia de este proceso se evaluó mediante el rendimiento de metano durante la codigestión anaeróbica con bioaditivo (suero de queso), así como el contenido de nutrientes en los digestatos mediante el uso de un agroquímico. Los digestatos obtenidos tienen un efecto estimulante sobre el crecimiento de las plantas de cebada y guisantes. En particular, la digestión con 3% en peso de suero tuvo el máximo impacto en el rendimiento de la planta (+0.3–0.4 t ha⁻¹ en comparación con el control). Los digestatos obtenidos pueden considerarse fertilizantes organominerales ya que contienen hasta un 43 % de la cantidad total de N, P, K y Ca y cumplen los requisitos de contenido de metales pesados de la legislación Ucraniana.

Por último, Rahman et al. (2019), determinaron que la producción de digestato a partir de la digestión anaeróbica de excrementos de aves, lodo de prensa, bagazo de caña de azúcar y raíces y cogollos de remolacha azucarera, podría ser una fuente eficaz en la elaboración de un fertilizante que ocupa los residuos de la industria azucarera, como materia prima.

5. CONCLUSIONES

Los desechos o residuos agroindustriales son ricos en composición de nutrientes y compuestos bioactivos, en consecuencia, deben ser considerados como materia prima para la obtención de fertilizantes orgánicos como la vermicomposta y el digestato. La presencia de tales nutrientes en estos residuos ofrece condiciones adecuadas para el crecimiento prolífico de microorganismos, los microorganismos tienen potencial para reutilizar los residuos como materia prima para su crecimiento a través de procesos de degradación o fermentación anaerobios o aerobios. El seguir en la búsqueda de alternativas para dar uso a los residuos agroindustriales por medio de aplicaciones biotecnológicas es importante para la sociedad y el medio ambiente, teniendo en consideración los factores de la sustentabilidad.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Investigación y Posgrado-IPN, y al CONACyT por el apoyo al número de matrícula 1001897.

REFERENCIAS

Alonso M, Ramírez C, Rigal L (2012) Valorización de residuos agroindustriales del tequila para alimentación de rumiantes. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18(3):449-457.

Atiyeh R, Arancon N, Edwards C, Metzger J (2000) Influence of earthworm-processed pig manure on the growth and yield of greenhouse tomatoes. *Bioresource Technology* 75:175-180.

Bongiovanni M, Marzari R, Silvana A (2018) Uso de digestato como biofertilizante derivado de la generación de biogas. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 1-6.

Cortez F, Ligabue-Braun R (2021) Agro-Industrial Residues: Eco-Friendly and Inexpensive Substrates for Microbial Pigments Production. *Front. Sustain. Food Syst* 18:1-16.

Ghoreishy F, Mohammadi A, Fallahzade J (2018) Using composted wheat residue as a growth medium in culture of tomato. *Journal of Plant Nutrition* 41(6):766-773.

Gordon V (2013) Utilización de suero de leche para la elaboración de abono orgánico (biol). Trabajo de grado, Universidad Politécnica Estatal del Carchi, Tulcán, Ecuador.

Gómez D, Vázquez M, Rodríguez I, Posas F, Matute D (2011) *Abonos Orgánicos. Sistemas de agronegocios agrícolas*, Serie: Producción orgánica de hortalizas de clima templado. Tegucigalpa, Honduras. 26pp.

Ivanchenko A, Yelatontsev D, Savenkov A (2021) Anaerobic co-digestion of agro-industrial waste with cheese whey: Impact of centrifuge comminution on biogas release and digestate agrochemical properties. *Biomass and Bioenergy* 147: 106-110.

Larramendy M, Soloneski S (2019) *Organic Fertilizers History: Production and Applications*. IntechOpen, London, United Kingdom, 13-17 pp.

Möller K, Müller T (2012) Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences* 12(3): 242-257.

Mupambwa H, Mkeni P (2018) Optimizing the vermicomposting of organic wastes amended with inorganic materials for production of nutrient-rich organic fertilizers: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 25(11):10577-10595.

Namlı A, Akça H, Akça M (2020) Vermicomposting of agro-industrial waste by-product of the sugar industry. *Soil Sci* 9(4):292-297

Nogales R, Celia C, Benitez E (2005) Vermicomposting of winery wastes: A laboratory study. *J Environ. Sci. Health* 40:59-673.

Palma D, Zavala J, Cámara J, Ruiz E, Salgado S (2016) Uso de residuos de la agroindustria de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) para elaboración de abonos orgánicos. *Agroproductividad* 9(7):29-34.

Pratap R (2012) *Organic fertilizers: types, production and environmental impact*. Agriculture issues and policies. Nova Science Publishers, Inc. New York, U.S.A. 290pp.

Sadh P, Duhan S, Duhan J (2018) Agro-industrial wastes and their

utilization using solid state fermentation: a review. *Bioresour. Bioprocess* 5(1):1-15.

Rahman A, Kumer S, Feng L, Moller H (2019) Anaerobic digestion of agro-industrial wastes of Bangladesh: Influence of total solids content. *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 12(4):484-493.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006) *Residuos* [en línea]. Disponible en https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf

BIOFERTILIZANTES: EL FUTURO LIMPIO Y SUSTENTABLE PARA POTENCIAR EL DESARROLLO DE LA AGRICULTURA

1Pablo Galindo-Martorell, 2Fidel Landeros Jaime, 3Edgardo Ulises Esquivel Naranjo, 4José Antonio Cervantes Chávez. 1pagalmar@gmail.com, 2landeros@uaq.mx, 3ulises.esquivel@uaq.mx, 4jose.antonio.cervantes@uaq.mx.

Unidad de Microbiología Básica y Aplicada, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro. Campus Aeropuerto | Carretera a Chichimequillas, Ejido Bolaños, Querétaro, Qro. C.P. 76140.

RESUMEN

Los biofertilizantes, son una mezcla de microorganismos vivos, como bacterias, hongos o algas; los cuales mejoran la disponibilidad de nutrientes y promueven el crecimiento de las plantas, éstos representan un potencial avance en la sustentabilidad de los cultivos y el bienestar de los suelos. Los resultados obtenidos en los cultivos probados en los años recientes demuestran que el aprovechamiento de los nutrientes es mayor mediante la aplicación de los biofertilizantes en comparación con los fertilizantes químicos. A diferencia de los fertilizantes químicos, su importancia radica en la nula contaminación inherente debido a que están formulados a base de metabolitos y/o microorganismos benéficos para las plantas, además del mantenimiento natural de los suelos; así como el bajo impacto económico que representan al sector agrícola. El mercado global de los biofertilizantes se ha abierto camino entre los agricultores, lenta pero seguramente, hasta representar varios millones de dólares anuales dado su beneficio y aceptación por del sector agrícola.

Palabras clave: Biofertilizantes, microorganismos benéficos, rizósfera, inoculantes.

ABSTRACT

The biofertilizers are a mixture of microorganisms like bacteria, fungi, algae which improve nutrient availability and promote the growth of the plant, nowadays represent a breakthrough in crop sustainability and soil well-being. Recently, the results obtained in several crops tested demonstrated that nutrient utilization is better when biofertilizers are supplied as compared with chemical fertilizers. In contrast to the contamination produced by chemical fertilizers, its importance lies in the zero pollution, since they are formulated from beneficial plant's microorganisms or their metabolites, in addition to the natural maintenance of the soil; as well as the low economical impact they represent on the agricultural sector. The global biofertilizer market has made its way among farmers, slowly but surely, to represent several million dollars annually considering its benefits and acceptance by the agricultural sector.

Keywords: Biofertilizers, beneficial microorganisms, rhizosphere, inoculants.

1. INTRODUCCIÓN

Durante siglos, la agricultura ha sido la fuente principal para obtener alimentos y sustento para la conformación de sociedades, desde que se abandonó el nomadismo por el sedentarismo. Los vestigios más antiguos que se han encontrado de esta transición datan de hace 12,000 años (Reed 2011). Existen hipótesis centrales que intentan explicar

esta serie de eventos según Corrales (2022), la primera es que se debió a un crecimiento demográfico descontrolado, en el que no hubo una separación de grupos, sino que la población se concentró en una región geográfica favorecida por las condiciones ambientales. La segunda hipótesis es que algunas poblaciones lograron un entendimiento y dominio tal de las técnicas de caza, pesca y recolección que les permitió no depender del entorno, sino transformar las primeras aldeas para que soportasen el desarrollo de la flora y fauna que posteriormente domesticaron. Con el paso del tiempo, los humanos nos dimos cuenta de que ciertos sustratos, nutrientes o moléculas promueven el desarrollo de las plantas en sus diversas etapas de crecimiento; ya sea como precursores de hormonas, azúcares o iniciadores de diversos procesos anabólicos y catabólicos. El conjunto de estas moléculas se les llama fertilizantes, los cuales son principalmente absorbidos mediante las raíces de las plantas, por lo que son fundamentales los mecanismos de acción que permiten la internalización de los nutrientes hacia la planta (Adesemoye y Kloepper 2009). Estos fertilizantes son denominados edáficos, ya que están presentes en el suelo y mediante él se movilizan entre organismos y tejidos (Salazar Hidalgo, K. N. 2022).

2. FERTILIZANTES QUÍMICOS

Originalmente, los fertilizantes eran las excretas de los animales porque estas se reducen a sus compuestos básicos por degradación biológica (Prasad y Shivay, 2021). Tras identificar que los elementos, tales como: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), y sus complejos, son los responsables de favorecer el desarrollo, se idearon reactores químicos que imitan las reacciones biológicas que realizan los insectos y los microorganismos para la producción de esos elementos. Con estos procesos se pretende refinar las porciones fundamentales que las plantas absorben para su desarrollo.

Además de los edáficos, existen los de aplicación foliar, es decir, los fertilizantes rociados sobre las hojas de la planta. Este sistema se usa como complemento al fertilizante edáfico y permite superar los límites de los nutrientes del suelo, relacionados con el ataque de nematodos, y los efectos de lixiviación, que reduce la captación de nutrientes por las raíces (Niu et al. 2021). Sin embargo, el fertilizante foliar debe atravesar las barreras propias de las hojas, entre otras, la capa hidrofóbica de cera, que es superada debido a las cargas iónicas de los nutrientes. Por lo tanto, deben estar solvatados en su totalidad, siendo así una penetración pasiva (Martínez-Gutiérrez et al. 2022).

Actualmente, se han desarrollado fertilizantes foliares en base a la quelación de nutrientes en moléculas solubles en agua y no tóxicas (Peralta 2018). Sin embargo, David

(2017) describió que la relación costo/beneficio de los fertilizantes foliares no era favorable. En este estudio, se reporta que por cada dólar invertido se generan 1.19 dólares en ventas, hasta un 50% menos que en fertilización únicamente edáfica (Martínez-Gutiérrez et al. 2022). Sin embargo, diferentes autores han descrito que ninguno de los dos métodos anteriores son los más eficientes, puesto que el porcentaje del rendimiento para los fertilizantes de desecho y los químicos rondan el 30% al 40%, dependiendo del cultivo (Aguilar Carpio et al. 2019; Rodríguez-Herrera et al. 2020). Por lo anterior, es necesario considerar el ciclo fotosintético de la planta, en el que se observa que los desechos depositados dentro de las áreas rizoides llegan a constituir hasta un 50% (Jiménez Ortiz et al. 2019)

2.1.- Problemática generada debido al uso de fertilizantes químicos

Los fertilizantes químicos son los más usados en la industria agrícola y provocan contaminación de los suelos al no aprovecharse el 100% de los elementos liberados al ecosistema. Debido a la erosión del suelo por sobreexplotación, los microorganismos en él ven superada su capacidad de procesamiento y los suelos captan el agua ineficientemente, lo que a su vez perjudica el desarrollo de las plantas. Los problemas más comunes por el uso de fertilizantes químicos están relacionados con la sobrefertilización, que incrementa los costos, contaminando los suelos y mantos acuíferos (Bhatt et al. 2019).

2.2.- Sobreexplotación del suelo

La degradación del suelo es una de las consecuencias más importantes respecto al mal uso que se le pueda dar a este ecosistema. La erosión química representa uno de los problemas más impactantes para la economía y la ecología de las regiones agrícolas y es ocasionada naturalmente por el viento o lluvias regulares. Sin embargo, el manejo agrícola de los suelos y cultivos también juega un factor crítico. En Europa se estima que 68.3% del territorio continental perdido debido a la erosión ha sido consecuencia de la sobreexplotación agrícola. Este impacto se puede medir en los campos agrícolas mediante la aplicación de la ecoeficiencia, definida como la tasa entre los resultados deseados y los efectos negativos al ambiente durante el uso del suelo, incluyendo parámetros complejos como el comportamiento del agricultor y la relación hortaliza/erosión (Eder et al. 2021).

Bajo el mismo contexto, un índice negativo de ecoeficiencia refleja una mala decisión en la elección del cultivo, una nula o poca rotación de hortalizas, características que deterioran la calidad biológica y química del suelo fértil. Tal recurso es renovable hasta cierto punto, ya que depende del tiempo

de descanso que se le dé; sin embargo, los ritmos de cultivo actuales no son compatibles con la velocidad biológica de recuperación de los suelos (Pengue 2010).

3.- BIOFERTILIZANTES

En contraste con los fertilizantes químicos, se encuentran los denominados biofertilizantes o inóculos microbiológicos, que son obtenidos de fuentes naturales. Su función principal es la de mejorar la fertilidad del suelo y la salud de las plantas; teniendo como consecuencia la adición de nutrientes, promotores de crecimiento y la protección contra enfermedades (Nosheen et al. 2021). Por lo anterior, es importante conocer qué microorganismos están presentes, qué efectos tienen sobre las plantas y qué nutrientes requieren, puesto que, al liberarse sobre un cultivo agrícola, se consideran como biofertilizantes. Kumar et al. (2022) catalogan los diversos biofertilizantes de acuerdo con su aportación a los ciclos nutrimentales de la planta.

Según su función, encontramos a los biofertilizantes fijadores de nitrógeno de vida libre (*Azotobacter* sp., *Clostridium* sp.), de vida asociativa (*Azospirillum* sp.), o simbióticos (*Rhizobium* sp., *Trichodemium* sp.). Por otro lado, están los microorganismos movilizados de fosfato (*Bacillus circulans*, *B. subtilis*), solubilizadores de zinc (*Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp.), movilizados de potasio (*Aspergillus brasiliensis*, *Bacillus* sp.), oxidantes de azufre (*Thiobacillus* sp.), promotores del crecimiento de la planta (*Bacillus*, *Erwinia*, *Pseudomonas* sp., *Stenotrophomonas*, *Xanthomonas*), procesamiento de micronutrientes (*Thiobacillus* sp., *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp.) (Kumar et al. 2022), (Figura 1).

La zona inmediata a las raíces tiende a presentar una gran cantidad de microorganismos relacionados con la misma, a esa región se le denomina rizósfera. Esta puede incluir microorganismos de vida libre o en estrecha relación con las células vegetales, que conforman sistemas complejos de comunicación y retroalimentación. Es tal la complejidad de la simbiosis que, en muchos casos, es imposible separar al microorganismo de la célula de la raíz, convirtiéndolo en un espécimen difícil de estudiar (Blackstone, N. W. 2020).

En cuanto a la movilización de fósforo, la función principal de los microorganismos es la de acidificar el suelo mediante la liberación de ácidos orgánicos, transformando el fósforo en una forma soluble y asimilable por las plantas (Adesemoye y Kloepper 2009). El efecto secundario de la acidificación del suelo es la liberación microbiológica de hierro y zinc. Los ejemplos más relevantes de este grupo son, dentro de las bacterias, los géneros de *Bacillus*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, y *Rhizobium* (Nosheen et al. 2021). Estos géneros de microorganismos también liberan enzimas que controlan las poblaciones de fitopatógenos.

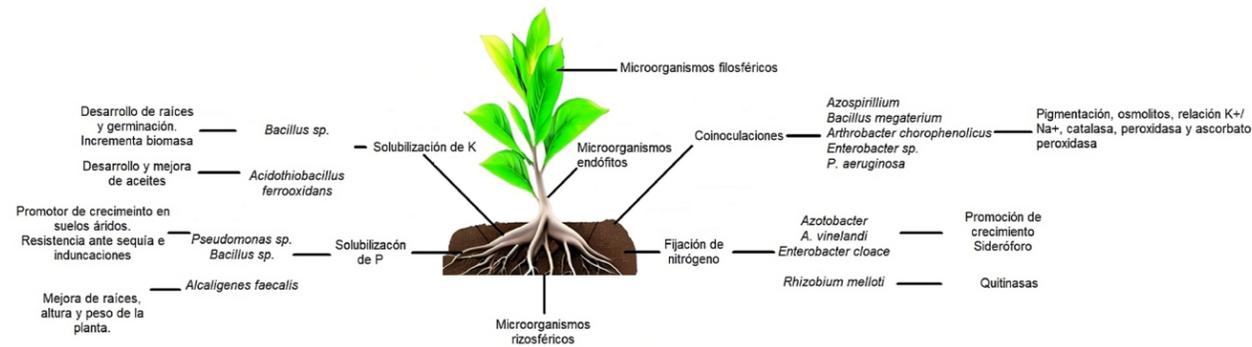


Figura 1. Nomenclatura de los microbiomas de la planta y ejemplos de simbioses y sus funciones (Galindo Martorell, 2023).

Si bien la mayoría de los biofertilizantes descritos son bacterianos y fúngicos, también existen los basados en algas. Ese grupo se caracteriza por realizar la fotosíntesis, metabolizar el carbono y aportar oxígeno. La aplicación de algas macro y microscópicas, como biofertilizantes, dependiendo de la especie y la dosis aplicada, suele tener efectos que incluyen el aumento de la porosidad del suelo, la retención de agua, la producción de hormonas vegetales, vitaminas y aminoácidos (Collahuazo-Reinoso y Araujo-Abad 2019). Como ejemplo tenemos macroalgas marrones, que aportan nitrógeno, potasio, fósforo, carbohidratos, reguladores del crecimiento vegetal, resistencia al congelamiento, tolerancia a la salinidad, y resistencia ante hongos, bacterias y virus. Además, se encuentran las macroalgas rojas, que aportan elementos traza; así como la presencia de algas verdeazules (Sharma 2020), que fijan de 18 a 45 kg N / ha dentro de plantíos sumergidos de arroz, aunado a la producción de promotores del crecimiento.

3.1.- Interacción planta microorganismo

La interacción entre plantas y microorganismos puede ser muy específica y depende de los organismos y de los metabolitos que intervienen. A veces, esta regulación está guiada por los microorganismos, como en el caso de *Bacillus velezensis* que obliga a la interacción mediante moléculas de RNA (Fan et al. 2015). Las interacciones de microorganismos más estudiadas son dedicadas a la utilización del fósforo, nitrógeno, zinc y azufre (Nosheen et al. 2021). El proceso de solubilización que emplea los ácidos orgánicos se basa en la extrusión de protones, también conocido como el transporte activo o expulsión de iones de hidrógeno con carga positiva (Park et al. 2009), mientras que la quelación, que consiste en la captación de metales por parte de moléculas orgánicas o inorgánicas, se efectúa gracias a la secreción de moléculas que tienen en su estructura química grupos glucónicos o cetoglucónicos.

El azufre se procesa mediante su oxidación, forma en la que las plantas lo pueden metabolizar (Pourbabaee et al. 2020). Por otra parte, el zinc se solubiliza al ser capturado por iones quelantes y procesado por los microorganismos oxido-reductores (Kamran et al. 2017).

3.2.- Situación actual del uso de biofertilizantes

La población moderna cada vez tiende a solicitar una mayor cantidad de productos orgánicos libres de fertilizantes químicos y sustancias sintéticas. Situación que conlleva al cambio sustancial en las formas en las que la agricultura se desarrolla. Lenta, pero firmemente, los biofertilizantes se han comenzado a popularizar entre los agricultores por la propia demanda de los consumidores y las normativas globales (Figura 2).

MERCADO DE BIOFERTILIZANTES POR REGIÓN (BILLONES DE DÓLARES)

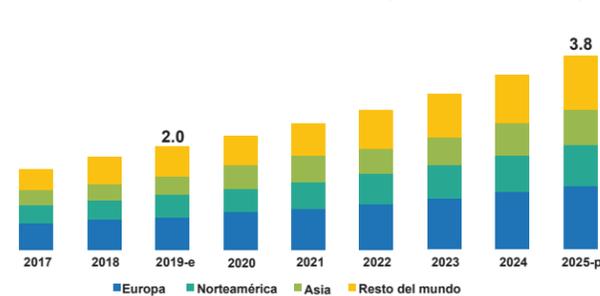


Figura 2. Valor global del mercado de biofertilizantes en años anteriores y proyección. (Editada de Research and markets. 2023).

Si bien el mercado se está abriendo a la opción biológica de los fertilizantes, aún es complicado que una mayoría de agricultores acepte eliminar el uso de fertilizantes químicos. No obstante, hasta el 2014 la demanda de estos productos ha aumentado firmemente, se estima que para el año 2025 el mercado crecerá en un 13%, alcanzando un valor global en \$4.09 billones de dólares. Entre los organismos con mayor demanda

encontramos: *Agrobacterium radiobacter*, *Azospirillum sp.*, y *Bacillus subtilis*, según el reporte de Research and Markets del 2021. Actualmente, existen más de 50 productos exitosos a nivel continental (Tabla 1).

Tabla 1. Biofertilizantes de mayor relevancia aplicados y el producto comercial

Tipo de biofertilizante	epa P	roducto comercial
Fijación de nitrógeno	<i>Azotobacter chroococcum</i>	Bioazato, Bhoomi, Rakshka, Azonik
	<i>Azotobacter vinelandii</i>	
Solubilizador/ movilizador de fosfato	<i>Pseudomonas striata</i>	P sol B
	<i>Bacillus megaterium</i>	
Solubilizador de potasio	<i>Bacillus mucilaginosus</i>	Bio-NPK, Biopotash
Solubilizador de zinc	<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	Zn sol B
	<i>Delftia acidovorans</i>	S sol B
Promotor de crecimiento	<i>Pseudomonas chloropsis</i>	Cedomon

Por otra parte, el desarrollo de los biofertilizantes promueve el interés en el estudio de las interacciones entre las plantas y su microbioma, como la investigación mencionada sobre *B. velezensis* u otros como la tolerancia al estrés mediada por el metabolismo de *polihidroxibutirato* por *M. extorquens* (Pirttilä et al. 2021). Estos dos casos ejemplifican que es necesario profundizar en el estudio de las interacciones entre las plantas y los microorganismos que rodean. Este conocimiento y el desarrollo de biofertilizantes mejorará la producción de alimentos, así como el bienestar del ecosistema.

3.3.- Perspectivas del uso de biofertilizantes

Actualmente, se están estudiando consorcios de microorganismos, combinaciones para replicar lo que sucede en la naturaleza entre los microorganismos de los suelos y las plantas. Respecto a esto, se han realizado avances significativos en el desarrollo de nanopartículas biofertilizantes (Singh 2015), que consiste en la liberación del biofertilizante en las cantidades mínimas necesarias. Los biofertilizantes se acoplan a nanopartículas de aluminio, oro o plata, y posteriormente son liberados en soluciones acuosas controladas en el suelo donde habitan las plantas. Esto hace que la internalización de los nutrientes y los simbiontes acoplados al metal sea más fácil y eficiente que de forma foliar (Zambrano-Mendoza et al. 2021).

Por otra parte, se ha estado trabajando en la inducción de tumores benignos en plantas no susceptibles a desarrollar nódulos simbióticos (Walker et al. 2013) y así favorecer la fijación de nitrógeno y la síntesis de floroglucinol. Esta metodología ha surgido a partir de estudios relacionados con cepas de *Agrobacterium* y *A. tumefaciens*. De los estudios se ha concluido que al aplicar esta tecnología se puede revertir un estado anómalo en la salud del cultivo al facilitar

la metabolización de ciertos nutrientes y el almacenamiento vegetal de agua.

4. CONCLUSIONES

A pesar de que los biofertilizantes llevan ya muchos años siendo estudiados y aplicados, el impacto que tienen en la agricultura comercial a nivel mundial sigue siendo superado por los fertilizantes químicos. El mercado que se ha proyectado por los analistas económicos para estos productos se encuentra creciendo lentamente, pero al ser apoyados por legislaciones locales de cada país, estos tienen mayor relevancia año tras año. Con el paso del tiempo, se desarrollan mejores y diversas técnicas con la finalidad de fertilizar los campos de cultivo mediante el uso de microorganismos simbióticos. Cada una de estas técnicas surge como respuesta a necesidades específicas de cada suelo, entendiendo que para determinar las carencias y beneficios del mismo es necesario ejecutar un estudio del suelo detallado, y así elegir qué biofertilizante es el que mejor se adecúa al ecosistema en cuestión. La técnica de aplicación debe ser elegida según la necesidad del campo, así como la capacidad económica del agricultor, ya que el propósito final de la aplicación del biofertilizante es el incremento de las ganancias económicas al mismo tiempo que se reduce el impacto ambiental.

5.- AGRADECIMIENTOS. P.G.M. Agradezco a mi esposa la Bióloga Ileana Zapata Jiménez que en todo momento me apoyó e incentivó a continuar con este y otros proyectos. Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Querétaro que aportó todos los recursos necesarios para lograr este documento, proyecto FNB202207. Agradecemos los comentarios y sugerencias de los dos revisores anónimos que enriquecieron este escrito.

6.- BIBLIOGRAFÍA

Aguilar Carpio C, Alcantara Jiménez JA, Leyva Bautista S, Ayvar Serna S, Díaz Villanueva GE. 2019. Rendimiento y rentabilidad de genotipos de papaya en función de la fertilización química, orgánica y biológica. *Remexca*. 10(3):575-84

Adesemoye, A. O., & Kloepper, J. W. (2009). Plant-microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(1), 1-12

Bhatt, M. K., Labanya, R., & Joshi, H. C. (2019). Influence of long-term chemical fertilizers and organic manures on soil fertility a review. *Universal Journal of Agricultural Research*, 7(5), 177-188.

Blackstone, N. W. (2020). Chemiosmosis, evolutionary conflict, and eukaryotic symbiosis. *Symbiosis: Cellular, Molecular, Medical and Evolutionary Aspects*, 237-251.

Collahuazo-Reinoso Y, Araujo-Abad S. 2019. Producción de biofertilizantes a partir de microalgas. *CEDAMAZ*. 10(2):75–80

David, W. O. P. (2017). Reducción de la fertilización edáfica con aplicación de fertilizantes foliares en cultivo de arroz. Universidad Agraria del Ecuador

Eder, A., Salhofer, K., & Scheichel, E. (2021). Land tenure, soil conservation, and farm performance: An eco-efficiency analysis of Austrian crop farms. *Ecological Economics*, 180, 106861

Fan B, Li L, Chao Y, Förstner K, Vogel J, et al. 2015. dRNA-Seq Reveals Genomewide TSSs and Noncoding RNAs of Plant Beneficial Rhizobacterium, *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42. *PLoS ONE*. 10(11): e0142002

Corrales, J. (2022). Gibaja, J. F.; Ibáñez, J. J. y Mozota, M. 2021: ¿Qué sabemos de? El Neolítico. CSIC y Catarata, Madrid. *Revista Atlántica-Mediterránea de Prehistoria y Arqueología Social*, 24, 140–143.

Jiménez Ortiz MM, Gómez Álvarez R, Oliva Hernández J, Granados Zurita L, Pat Fernández JM, Aranda Ibañez EM. 2019. Influencia del estiércol composteado y micorriza arbuscular sobre la composición química del suelo y el rendimiento productivo de maíz forrajero (*Zea mays* L.). *NS*. 11(23):165–97

Kamran S, Shahid I, Baig DN, Rizwan M, Malik KA, Mehnaz S. 2017. Contribution of zinc solubilizing bacteria in growth promotion and zinc content of wheat. *Front. Microbiol*. 8:2593

Kumar S, Diksha, Sindhu SS, Kumar R. 2022. Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. *Current Research in Microbial Sciences*. 3:100094

Martínez-Gutiérrez A, Zamudio-González B, Tadeo-Robledo M, Espinosa-Calderón A, Cardoso-Galvão JC, Vázquez-Carrillo MG. 2022. Rendimiento de híbridos de maíz en respuesta a la fertilización foliar con bioestimulantes. *Remexca*. 13(2):289–301

Niu J, Liu C, Huang M, Liu K, Yan D. 2021. Effects of foliar fertilization: a review of current status and future perspectives. *J. Soil Sci. Plant Nutr*. 21(1):104–18

Nosheen S, Ajmal I, Song Y. 2021. Microbes as biofertilizers, a potential approach for sustainable crop production. *Sustainability*. 13(4):1868

Park KH, Lee CY, Son HJ. 2009. Mechanism of insoluble phosphate solubilization by *Pseudomonas fluorescens* RAF15 isolated from ginseng rhizosphere and its plant growth-promoting activities. *Lett. Appl. Microbiol*. 49(2):222–28

Pengue, W. A. (2010). Agricultura mundial, suelo virtual y agrocombustibles. *Cuaderno Interdisciplinar de Desarrollo Sostenible (CUIDES)*, (4), 125-158.

Peralta DEA. 2018. Evaluación de tres dosis de fertilizante quelatado en tres híbridos de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill). Undergraduate thesis

Pirttilä AM, Mohammad Parast Tabas H, Baruah N, Koskimäki JJ. 2021. Biofertilizers and biocontrol agents for agriculture: how to identify and develop new potent microbial strains and traits. *Microorganisms*. 9, 817:

Prasad R, and Shivay Y, S. (2021). Enhanced Efficiency Fertilizers or Slow-Release and NI/UI Blended Nitrogen Fertilizers. *Indian Journal Fertilisers* 17(4): 316-315.

Pourbabae AA, Koohbori Dinekaboodi S, Seyed Hosseini HM, Alikhani HA, Emami S. 2020. Potential Application of Selected Sulfur-Oxidizing Bacteria and Different Sources of Sulfur in Plant Growth Promotion under Different Moisture Conditions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*. 51(6):735–45

Research and Markets 2021. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5390494/global-biofertilizers-market-2021-2025> 7.

Reed, C. A. (Ed.). (2011). *Origins of agriculture*. Walter de Gruyter

Rodríguez-Herrera SA, Salgado-Ramírez O, García-Rodríguez JG, Cervantes-Ortiz F, Figueroa-Rivera MG, Mendoza Elos M. 2020. Fertilización química y orgánica en avena: rendimiento y calidad de la semilla. *Agron. Mesoam*. 567–79

Salazar Hidalgo, K. N. (2022). *La fertilización edáfica y su impacto en la agricultura moderna* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2022).

Sharma P. (2020). Role of biofertilizer (BGA) y nitrogenous fertilizer on grain yield, nitrogen content y nitrate reductase activity of two rice (*Oryza sativa*) varieties jaya y sarju-52. *G-Journal of Environmental Science and Technology*

Singh, A., Singh, N. B., Hussain, I., Singh, H., & Singh, S. C. (2015). Plant-nanoparticle interaction: an approach to improve agricultural practices and plant productivity. *Int J Pharm Sci Invent*, 4(8), 25-40

Zambrano-Mendoza, J. L., Sangoquiza-Caiza, C. A., Campaña-Cruz, D. F., & Yáñez-Guzmán, C. F. (2021). Use of biofertilizers in agricultural production. *Technology in Agriculture*, 193.

Walker, V., Bruto, M., Bellvert, F., Bally, R., Muller, D., Prigent-Combaret, C. & Comte, G. (2013). Unexpected phytostimulatory behavior for *Escherichia coli* and *Agrobacterium tumefaciens* model strains. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 26(5), 495-502.

INVESTIGACIÓN + POSGRADOS

- Maestría en Biotecnología Aplicada
- Maestría en Biotecnología Productiva
- Doctorado en Ciencias en Biotecnología
- Doctorado en Biotecnología Productiva



Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada
Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal
Tecuemac - Tepetitla K. 1.5, Tlaxcala, C.P. 90700, México
www.cibatlaxcala.ipn.mx