

Sucroquímica, alternativa de diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar

Noé Aguilar Rivera, Daniel Arturo Rodríguez, Adolfo Castillo Morán y Agustín Herrera Solano

Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Veracruzana, México

naguilar@uv.mx

Resumen

La agroindustria de la caña de azúcar se enfrenta a problemas de sostenibilidad. Sacarosa como producto objetivo, es una molécula interesante, barata y renovable obtenida a partir de caña de azúcar en todo el mundo para servir como materia prima, como sustrato de fermentación o en la industria química (sucroquímica). Su complejidad estructural ofrece posibilidades en términos de propiedades y aplicaciones para la fabricación de productos finales, bioplásticos, solventes industriales y productos químicos (ésteres de sacarosa, surfactantes, compuestos polimerizables, edulcorantes, sustitutos de grasa). En este trabajo de revisión, se describen los recientes estudios, aplicaciones y posible futuro de los derivados de la sacarosa y la sucroquímica, como un prometedor campo de la química orgánica a partir de una fuente accesible, de bajo precio, ecológica y renovable, que tienen la mejor oportunidad de competir económicamente con los productos petroquímicos, tanto en el corto y largo plazo en un concepto de diversificación productiva.

Palabras clave: sacarosa, conversión química, diversificación productiva.

Sucrochemistry, Alternative for Sugarcane Agroindustry Diversification

Abstract

The sugarcane agroindustry is facing important sustainability issues. Sucrose, as a target product, is an interesting molecule, cheap and renewable, obtained from sugarcane crops worldwide to serve as a raw material for chemicals or as a fermentation substrate (sucrochemistry). Its structural complexity offers a wide range of potentialities in terms of properties and applications for the manufacture of end-products, bioplastics, industrial solvents, and chemicals (sucrose esters, surfactants, polymerizable compounds, sweeteners, fat substitutes). This review describes the results of recent studies, applications and the possible future of sucrose and sucrochemistry derivatives as a promising field in organic chemistry based on an accessible, low-priced, ecological and renewable source, which stands the best chance of competing economically with petrochemicals, in both the short and long terms, in a productive diversification concept.

Keywords: sucrose, chemical conversion, productive diversification.

Introducción

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) se cosecha en más de 130 países, su producto principal; el azúcar o sacarosa enfrenta la sustitución en el mercado de edulcorantes bajos en calorías de diversas presentaciones y agresivas campañas publicitarias sobre los peligros de salud, derivados del consumo de azúcar. Estas circunstancias hacen que los países productores de azúcar de caña tengan que disminuir costos de producción mediante la optimización, la modernización y reorganización espacial de la agricultura y la industrialización de los coproductos (azúcar, etanol y melazas) y subproductos (bagazo, lodo de filtros, vinazas etc.) de esta agroindustria, mediante diversos desarrollos tecnológicos para la supervivencia de la actividad agroindustrial, donde la sucroquímica forma parte de un proceso de diversificación productiva sostenible (Figura 1), lo cual permitirá hacer más rentables las economías azucareras (Aguilar *et al.*, 2009; Frenzel *et al.* 2009; Hugot, 1996).

En este sentido, la diversificación de la industria azucarera es un proyecto sumamente complejo, que ha sido evaluado como una alternativa tecno-económica competitiva en diversas economías azucareras, para aumentar ingresos y contrarrestar la volatilidad del precio internacional de azúcar al disminuir costos de producción e impactos am-

bientales, al convertir residuos o subproductos en materias primas para derivados de nuevos ciclos productivos como cogeneración, etanol combustible entre otros a nivel agroindustria.

En caña de azúcar, una decisión clave es si sus componentes estructurales pueden ser mejorados a través de ingeniería metabólica y estos se destinan para la coproducción con la sacarosa para el sector alimentario, o si solo la caña es cultivada para usos industriales no alimentarios. Actualmente, la economía está fuertemente a favor de una parte sustancial de la sacarosa para usos alimentarios. Bajo este escenario, los compuestos objetivo (derivados de la caña) deberían ser económicamente rentables y competitivos para reemplazar la diferencia de valor entre la caña de azúcar para alimentos y como materia prima para la fermentación industrial, y añadir valor agregado suficiente para justificar los costos de producción por separado y las corrientes de transformación de los nuevos derivados.

Por lo tanto, la sucroquímica, o química de la sacarosa, y la alcohóquímica, o química del etanol y sus productos derivados como desarrollo tecnológico, han estado presentes en mercados del mundo desarrollado desde la segunda guerra mundial (Bolton, 1972) y actualmente en el paradigma tecnológico de la bio-refinería o química verde

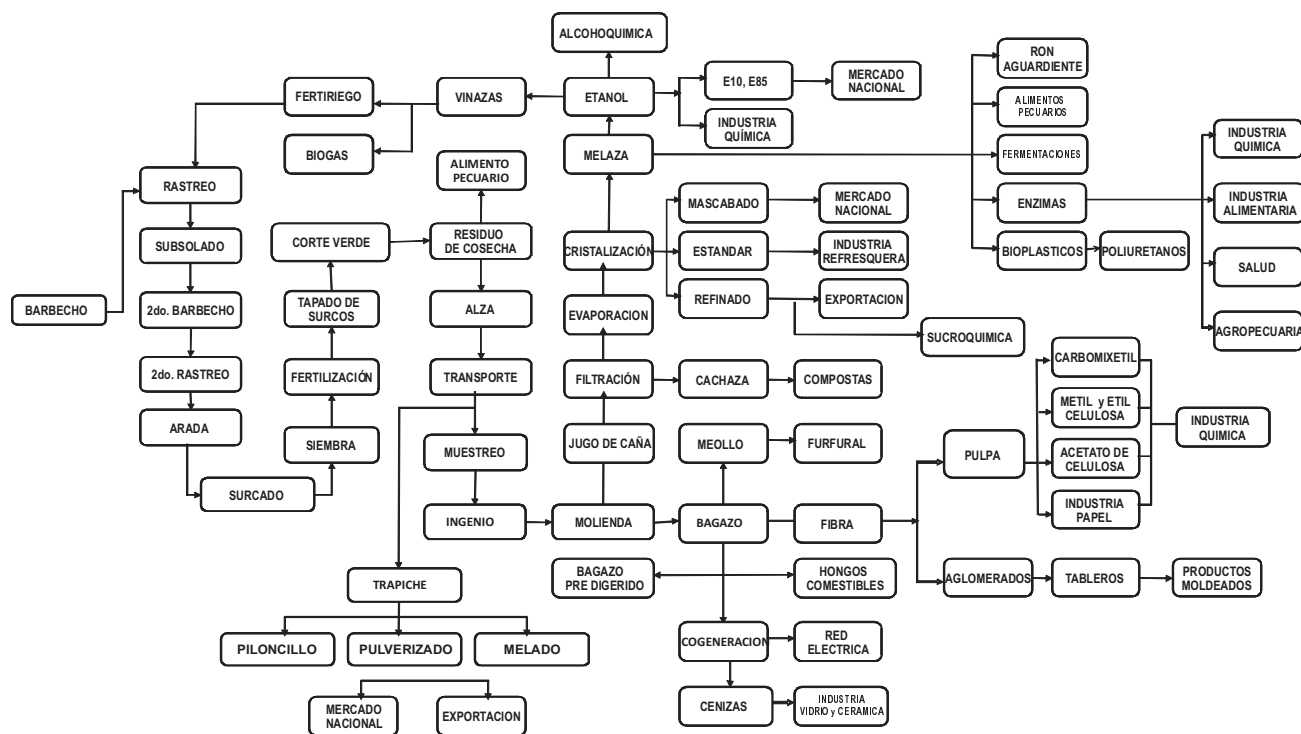


Figura 1. Diversificación productiva sostenible en la agroindustria azucarera.

orientadas a productos de alto valor, sustitutivos de los derivados del petróleo, fabricados en pequeño volumen (Peters *et al.* 2010; Brown *et al.* 2007; Viniestra 2007; Larrahondo, 2005; Godshall, 2002; Verhart, 1994; De Wit, 1993).

En este sentido, la llamada **química verde** o **química sustentable** (el uso de la química para prevenir la contaminación a través del diseño de productos y procesos químicos que sean ambientalmente benignos), ha crecido sustancialmente desde su aparición a principios de los años 1990. Este crecimiento está basado en un fuerte desarrollo científico guiado por la necesidad económica de lograr un desarrollo sostenible (Lichtenthaler 2004; Gunningham, 1997; Vlitos, 1977). Se trata de una herramienta imprescindible cuando se hace necesario introducir mejoras tecnológicas en todos los aspectos de los procesos químicos tradicionales como el azucarero, que generen impactos negativos tanto sobre la salud humana como en el ambiente y los mercados de productos tradicionales. Se parte de la base de la sostenibilidad ambiental en: (1) diseñar productos nuevos que sean útiles y viables comercialmente, pero cuya toxicidad sea mínima y (2) diseñar –para productos ya existentes– pasos sintéticos alternativos que no requieran sustratos o solventes ni generen subproductos tóxicos (Birch, 2007, Mirkov, 2007 y Avram, 2005).

Tradicionalmente, los criterios para priorizar una vía de síntesis sobre otra se basaron en la disponibilidad y precio

de materias primas, en los rendimientos del proceso y en el consumo de energía. A partir de la puesta en marcha de estrategias preventivas a estos criterios, hay que agregarle los relacionados con toxicidad (tanto para el ser humano y ecosistemas), a lo largo no solamente del proceso de síntesis sino del ciclo de vida del producto que debe: (1) Ser comercialmente útil, (2) Presentar una mínima toxicidad tanto para el ser humano como para el ambiente, (3) Ser fabricado en procesos viables, (4) No contribuir a la contaminación y (5) La diversidad de posibles usos que cabe esperar es resultado de los esfuerzos realizados para hacer de la sacarosa y el etanol (recursos renovables) la principal fuente de alimentos sintéticos y químicos a nivel mundial, reemplazando así al petróleo (recurso limitado). Esto ha llevado a la constitución de nuevas rutas productivas, la **sucroquímica** y la **alcohoquímica**; para las cuales la sacarosa no es un edulcorante sino una sustancia química y el etanol una materia prima, no un solvente, que pueden transformarse en otros productos químicos de mayor valor; en este sentido, el desarrollo de la química de la sacarosa como un campo definido de estudio está relacionado con la creación de la *Sugar Research Foundation* (Fundación para la Investigación del Azúcar) en 1943 con el propósito de llevar a cabo investigaciones aplicadas sobre la utilización del azúcar desde un punto de vista no alimentario como lo reportado por Walford (2006).

Propiedades químicas de la sacarosa

La sacarosa (α -D-Fructofuranosil)- β -D-glicopiranosil) Glc(α 1 \leftrightarrow 2 β)Fru es un disacárido compuesto por una molécula de glucosa (dextrosa) y una de fructosa (levulosa), compuesta de 12 átomos de carbono, 22 átomos de hidrógeno y 11 de oxígeno con fórmula condensada $C_{12}H_{22}O_{11}$ (oxígeno 51,42%, carbono 42,10%, hidrógeno 6,48%) con peso molecular 342.30; sólido cristalino que carameliza a 160°C, es un azúcar no reductor y poli alcohol que tiene 3 grupo hidroxilos primarios (-CH₂OH 6,1' y 6') y 5 en posición secundaria (-CH-OH, 2, 3, 3', 4 y 4') (Figuras 2 y 3).

Debido a que la alta producción de sacarosa es en forma cristalina, lo hace un sustrato interesante para el desarrollo de nuevas tecnologías químicas y microbiológicas. La reactividad es mayor en los carbonos primarios. La presencia de estos grupos hace posible la síntesis de numerosos derivados, y es fácilmente atacada por ácidos, oxidantes y álcalis. Al calentar en un medio ácido o por acción de la enzima invertasa se descompone para formar (+) D-glucosa y (-) D-fructosa, mezcla que se llama azúcar invertido y al proceso inversión o hidrólisis; es estable al aire pero en polvo se torna higroscópica, absorbiendo hasta el 1% de humedad; es fermentable pero en altas concentraciones (~17%) resiste a la descomposición bacteriana. Se utiliza como endulzante, preservante, antioxidante, excitante, agente granulador y tensoactivo en jabones, productos de belleza, tintas (Peters *et al.* 2010; Barros *et al.* 2008; Queneau, 2007, 2004 2000; Boscoso, 2003; Cooper, 2002; Polat 2001; Colonna, 2000; Descotes, 1992; Schiweck *et al.*, 1991; James *et al.*, 1989; Barker *et al.*, 1962).

La solubilidad de la sacarosa en agua es influenciada por la presencia de sales minerales, a 40°C y a bajas concentraciones la solubilidad disminuye, mientras que a altas concentraciones de sales (excepto para calcio) la solubilidad se incrementa. Este fenómeno es debido al desarrollo de compuestos de adición entre la sal y la sacarosa y está determinado por la naturaleza del anión de la sal y la concentración de la sacarosa y la temperatura de la solución. Las sales más conocidas son: NaCl-Su-2H₂O, NaBr-Su-2H₂O, NaI-Su-2H₂O, 3NaI-2Su-3H₂O, KI-Su-2H₂O y CuSO₄-Su-2H₂O; estas sales y otras disminuyen la actividad óptica de la sacarosa (Colonna, 2000; Mathlouthi, 1995; Descotes, 1992).

Propiedades tecnológicas de la sacarosa

El azúcar comercial es sacarosa de diferentes grados de pureza. El tipo refinado es una de las sustancias orgánicas más puras que se conocen, contiene 99,96% de sacarosa.

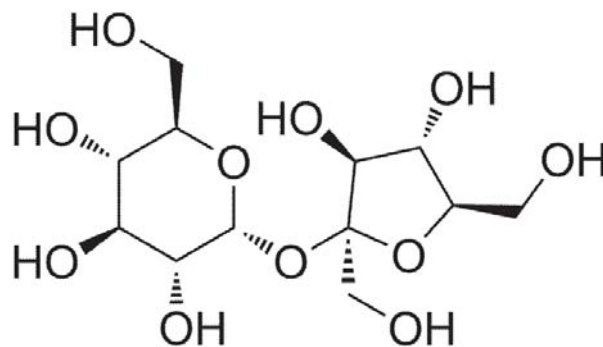


Figura 2. Estructura molecular de la sacarosa (Lichtenthaler, 2004).

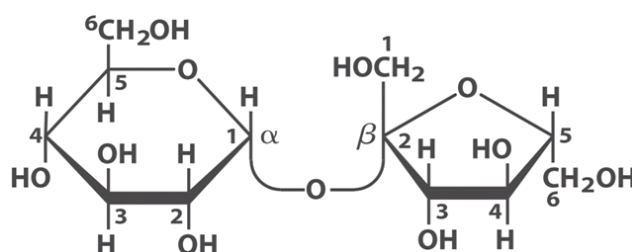


Figura 3. Sitios de reactividad de la molécula de sacarosa (Boscoso, 2003; Polat, 2001).

Tradicionalmente ha sido considerado exclusivamente como una sustancia edulcorante, sin embargo, es químicamente versátil, debido a que constituye “un alcohol polihídrico” barato, que puede usarse en una amplia gama de reacciones técnicamente posibles y análogas a la petroquímica (Peters *et al.* 2010). Otras propiedades importantes de acuerdo a algunos autores (Barros *et al.* 2008; Brown *et al.* 2007; Germano, 2006; Lichtenthaler, 2004; Boscolo, 2003; Jarosz, 2002; Polat, 2001; Luberoff, 1997; Schiweck *et al.* 1991; Gruber, 1990; Hayakawa, 1990; Thomas, 1987, Khan, 1984, 1976; Kollonitsch, 1970) son:

- La sacarosa es soluble en agua, y si en algunas reacciones químicas esto es una ventaja, en otras puede ser una limitación.
- La sacarosa es fácilmente metabolizada por microorganismos, plantas, animales, etc. lo que la hace biodegradable, representando una ventaja importante sobre algunos derivados químicos del petróleo, como los detergentes.
- La sacarosa no es tóxica, propiedad que amplía aún más el campo de sus aplicaciones útiles en áreas como alimentos, fármacos y cosméticos.
- La sacarosa forma fácilmente compuestos con algunos iones metálicos.
- La sacarosa es higroscópica, es decir, tiene tendencia a absorber la humedad.

- f. La sacarosa es una importante materia prima para procesos de conversión microbiana y por ello se ha utilizado tradicionalmente en la producción de alcoholes, ácidos orgánicos, etc.
- g. La sacarosa es inestable al calor y ello ha tendido a crearle problemas en ciertos procesos químicos.
- h. La sacarosa no solamente produce energía, sino que también posee masa, lo que le confiere una ventaja importante en la búsqueda de sistemas alternativos de energía; ya que algunas de las alternativas que se están investigando, por ejemplo, la energía eólica, nuclear y los hidrosistemas, aunque producen energía, no tienen masa que puedan transferir a otros productos.
- i. Hay dos reacciones químicas manifiestas de la sacarosa que deben siempre valorarse; una es la hidrólisis, es decir, la inversión del ángulo de polarización en presencia de ácidos de Lewis; con agua, la inversión arroja dos azúcares sencillas, la D-glucosa y la D-fructosa. La otra reacción manifiesta es la pirólisis, o caramelización, que es más complicada que la hidrólisis y hace parte del conocido proceso de caramelización que ocurre cuando el azúcar se calienta a temperaturas muy superiores a los 140°C en presencia de sal o ácidos catalizadores. Los productos resultantes son agua y una mezcla sumamente compleja de subproductos degradables.
- j. Las moléculas de azúcares del tipo pentosas y hexosas (fructosa, glucosa, galactosa, etc.) son algo inestables. Según Paturau (1989), estas moléculas desempeñan uno de los papeles más importantes en el reino vegetal, donde constantemente se forman, desintegran y transforman". Pero lo que es una ventaja en reacciones biológicas puede constituir un serio obstáculo en las químicas.
- k. Los hidroxilos de la sacarosa son habitualmente menos reactivos en agua. Esta propiedad plantea un problema cuando se hacen derivados del azúcar en un medio acuoso.
- l. La elevada proporción del oxígeno, frente al carbono en la sacarosa, limita el número de disolventes orgánicos que pueden utilizarse. El petróleo es generalmente bajo en oxígeno o tiene exclusivamente átomos de carbono e hidrógeno. Como hidrocarburo químico esto permite obtener buenos rendimientos. De este modo la relación teórica rendimiento/peso del etileno derivado del petróleo es de 165%, mientras que la producción de etanol por fermentación directa de la sacarosa resulta en la pérdida de dos tercios del oxígeno y un tercio del carbono, siendo su rendimiento teórico máximo de 54%. Estas limitaciones no constituyen obstáculos insuperables. Hay medios para evitarlas; uno es concentrar la

atención en derivados que, a pesar de tener rendimientos bajos o moderados, no pueden ser substituidos fácilmente por otros productos; otro medio sería centrar el interés en reacciones que utilicen un proceso biológico, por ejemplo, el ácido cítrico (Gruber, 1990; Hayakawa; 1990; Thomas, 1987; Khan, 1984, 1976).

- m. La sacarosa puede modificarse químicamente o hacerse reaccionar para dar una amplia variedad de productos. Generalmente estos productos no habían encontrado mercados por varias razones: (i) los costos de producción eran muy elevados en relación con el producto existente derivado de una sustancia petroquímica, (ii) insuficiente trabajo de desarrollo para aplicaciones apropiadas, (iii) la industria química estaba y está aún orientada hacia las materias primas petroquímicas en lugar de la sacarosa, (iv) no existía plataforma o infraestructura dentro de la industria azucarera o de la industria química para asegurar la comercialización de las sustancias químicas derivadas del azúcar.

En este sentido, numerosos Investigadores desde la década de 1970 (James *et al.* (1989); Hough, (1977); Vlitos (1977); Stewart (1973); Bolton (1972); Kollonitsch (1970), reportaron que para la aplicación comercial de los trabajos científicos de conversión de la sacarosa, principalmente como esteres Wernicke *et al.* (1998); Gupta (1983); Barker *et al.* (1962); y desarrollar extensivamente la sucroquímica ésta debe transformarse en otros productos de mayor valor, ya sea química o microbiológicamente. Para este objetivo se tienen tres procedimientos: conversión microbiana, reactividad, degradación y síntesis químicas derivadas de su reactividad.

Para la conversión microbiana y los procesos de fermentación deben valorarse numerosos factores:

- a. El uso de microorganismos en la conversión de un producto químico en otro es relativamente no-específico. Esto significa que después de un tratamiento apropiado no solamente el azúcar, sino la mayor parte de las fuentes de carbohidratos pueden convertirse en materias primas. Utilizar este proceso significaría, por lo tanto, que una industria química basada en la sacarosa debe ser altamente competitiva, en cuanto a costo de la materia prima, con otras fuentes de carbohidratos, por ejemplo maíz, arroz, trigo, papa, yuca. Dicho de otro modo, la ventaja específica de la sacarosa podría muy bien perderse en el proceso no-específico de conversión microbiana.
- b. Debido a que en los procesos de conversión se utilizan microorganismos, los rendimientos son inevitablemente bajos, ya que el microorganismo debe metabolizar una porción de la sacarosa como fuente de su energía.

- c. El proceso de conversión microbiana tiene bajos índices de reacción, y requiere grandes volúmenes del producto y prolongados tiempos de residencia.
- d. En el proceso microbiano, la separación del producto buscado de los otros plantea problemas tecnológicos cuya solución eleva necesariamente los costos. Algunos productos derivados mediante esta conversión son: antibióticos, ácido glucónico, gomas de xantato, biopolímeros, ácido ascórbico (vitamina C) y etanol (Cooper, 2002; Thomas, 1987 y Kollonitsch, 1970).

Reactividad de la sacarosa

Debido a la presencia de grupos –OH, las reacciones más importantes que pueden llevarse a cabo son:

1. Inversión. Es la reacción más importante de la sacarosa, de carácter irreversible; tiene lugar cuando una molécula de sacarosa y una de agua generan una molécula de glucosa y una de fructosa, en la cual la velocidad de reacción se incrementa hasta 5000 veces al pasar la temperatura de 20 a 90 °C, al mismo tiempo la reacción toma lugar a pH cercano a 7 y disminuye a medida que este decrece.

2. Descomposición Térmica (pirólisis o caramelización). En estado cristalino la sacarosa presenta una gran estabilidad, a medida que se incrementa la temperatura, a cerca de 200 °C se rompe la molécula para genera glucosa y fructosa y una serie de productos de descomposición en una mezcla oscura denominada “caramelo”. El posterior calentamiento de este producto en la presencia de oxígeno llega a la combustión liberando energía (Šimkovic, 2003).

3. Reacción de Maillard. Los azúcares reductores, producto de la hidrólisis de la sacarosa, reaccionan con aminoácidos y proteínas generando una serie de compuestos coloridos en la preparación de alimentos a alta temperatura seguido de compuestos volátiles y diversos sabores producto de la degradación de los componentes de la sacarosa (Barros *et al.* 2008; Šimkovic *et al.* 2003; Polat 2001; Colonna, 2000; Mathlouthi, 1995; Kollonitsch, 1970).

4. Degradación ácida. Los monosacáridos generados por la inversión en la presencia de ácidos a pH 3 generan de manera alterna productos secundarios de condensación en la forma de oligosacáridos y derivados furánicos.

5. Degradación alcalina. La reacción en medio alcalino induce el rompimiento de la molécula y la formación de ácidos orgánicos y al rearrreglo de la molécula de glucosa a una mezcla de manosa y fructosa, responsable de la presencia de estos en productos alimenticios siempre y cuando exista un ambiente alcalino; a pH ligeramente ácido la conversión es de 3,8% y a pH 9,8 30,8% (Mathlouthi, 1995; Van Nostrand, 1990; Kollonitsch, 1970).

Degradación química

Estructural y funcionalmente la molécula de sacarosa es única debido a su carácter orgánico y de la reactividad de sus 8 grupos –OH pudiéndose, al igual que los alcoholes, reaccionar con haluros, tiocianatos, tiocetatos, hidrogeno u otros grupos monovalentes para formar esterres, éteres, uretanos y más modificando a si sus propiedades químicas y generando productos de interés tecnológico. La complejidad de estos productos resultantes va a depender del grado de sustitución de los grupos-OH por un determinado agente químico o degradación química (Queneau, 2007, 2004, 2000; Descotes, 1992).

Síntesis dirigida de la sacarosa

Dada la limitada aplicación económica de la sacarosa, por medio de los procesos de conversión microbiana o de degradación química, cualquier promesa de una industria sucroquímica debe basarse en la síntesis dirigida. Este enfoque hace uso de la sacarosa en la forma en que normalmente se encuentra en el mercado, es decir, en su estado anhidro puro. El potencial para utilizar la sacarosa de este modo está ligado con las propiedades químicas identificadas antes, ya que el objeto de la síntesis dirigida es producir reacciones con compuestos sintetizantes seleccionados, y estas reacciones se determinaran en última instancia por la reactividad y estabilidad de las moléculas del azúcar. Un obstáculo importante en el desarrollo de derivados de la sacarosa sintética lo constituye la solubilidad restringida de los reactivos en otros disolventes que no sean aquellos que posean una reactividad similar a la de la sacarosa misma (Polat 2001; James *et al.*, 1989; Van Nostrand, 1990).

La sacarosa reacciona con agentes como aldehídos y cetonas para formar acetales cíclicos; con metales alcalinos como sodio, litio y potasio para producir mono y polisacratos como productos industriales intermedios. Otras rutas importantes de reacción de la sacarosa para generar diferentes mezclas de componentes de interés económico son la oxidación, pirólisis, hidrogenación, aminólisis, halogenación; y otras como las rutas biotecnológica y síntesis orgánica constituyen la sucroquímica o síntesis dirigida de la sacarosa, un resumen de los productos que pueden ser obtenidos por las rutas sucroquímicas (Figura 4).

Conclusiones

Aunque en la actualidad a partir de la sacarosa son reportadas en la extensa literatura los productos que pueden fabricarse, estos caen dentro de ciertas categorías comerciales amplias: (a) alimentos, (b) piensos, (c) combustibles, (d) explosivos, (e) elastómeros, (f) lubricantes, (g) di-



Figura 4. Productos derivados de la sacarosa (Paturau, 1989).

solventes, (h) acondicionadores del suelo, (i) fibras, (j) adhesivos, (k) papel, (l) plaguicidas, (m) plastificantes, (n) bioplásticos, (o) revestimientos de superficie, (p) agentes reductores de tensión superficial, (q) medicinas/fármacos, y (r) cosméticos. Estos productos presentan dos grandes ventajas a favor de la sucroquímica, y provienen de un producto agrícola. Esta ventaja ha sido mencionada con frecuencia, es decir, que el azúcar es un recurso renovable, en tanto que el petróleo es un recurso finito. La segunda ventaja importante es el impacto ambiental. La mayoría de las sustancias sucroquímicas son biodegradables, atóxicas, no carcinógenas, entre otros, lo que contribuye a un efecto socio-ambiental favorable.

Sin embargo, Independientemente de la aparición de edulcorantes nuevos en el mercado como la fructosa y edulcorantes químicos de alta intensidad, el azúcar sigue siendo el alimento calórico más extensamente usado de todos los países, sobre todo entre los de bajos ingresos. Por lo que son necesarias políticas públicas que permitan el desarrollo de este sector y su diversificación productiva especialmente en países productores de caña de azúcar para evitar depender de un solo producto.

Así mismo, para la consolidación de la sucroquímica, como una industria química competitiva a nivel mundial, los países azucareros deben primeramente incrementar significativamente la producción de caña de azúcar, con tecnologías de bajo impacto ambiental para abastecer las necesidades del edulcorante y etanol combustible para una población creciente, es decir, analizar las posibilidades reales de los ingenios o centrales azucareros para producir etanol y energía eléctrica con el bagazo y los residuos de cosecha como energéticos, como una plataforma para el despliegue como biorrefinería y posteriormente tener excedentes del edulcorante, sin competencia de las mate-

rias primas para una industria química basada en la sucroquímica, en segundo lugar existe la necesidad de invertir en la formación de recursos humanos calificados para la investigación, desarrollo y mercadotecnia de nuevos derivados sucroquímicos y, la organización de su estructura industrial e infraestructura logística, es decir, liderazgo en costos/diferenciación de productos, más específicamente tecnología definiendo procesos y estableciendo industrias que están vinculadas entre sí, insumos específicos, economía agrícola y de la producción, diferenciación de productos, y conocimiento de mercados.

Referencias

- AGUILAR, R.N; MENDOZA, G.G.; CONTRERAS, S.C.; FORTANELLI, M.J. (2009). ¿Por qué diversificar la agroindustria azucarera en México? Revista **Globalización competitividad y gobernabilidad** 3(1): 62-75.
- AVRAM, P.; MORGEN, B. (2005). Benchmarking concept for an integrated sugar, ethanol and co-generation plant. International Society of Sugar Cane Technologists Congress Vol. 2; 0130-0204; Guatemala City (GT).
- BARKER, S.A., BRIMACOMBE, J.S., JARVIS, J.A.; WILLIAMS, J.M. (1962). Sucrose derivatives. Part I. Reaction of sucrose with enol ethers. **J. Chem. Soc.**, 3158-3161.
- BARROS, M.T; KRASIMIRA, T; PETROVA, P; CORREIA-DASILVA (2008). Sucrose Chemistry: Fast and Efficient Microwave-Assisted Protocols for the Generation of Sucrose-Containing Monomer Libraries. http://www.intechopen.com/source/pdfs/17019/InTech_Sucrose_chemistry_fast_and_efficient_microwave_assisted_protocols_for_the_generation_of_sucrose_containing_monomer_libraries.pdf
- BIRCH, R.G. (2007). Metabolic engineering in sugarcane: assisting the transition to a bio-based economy. Chapter 11. En: Verpoorte c Springer *et al.* (eds.), **Applications of Plant Metabolic Engineering** (pp.249-281) Australia: University of Queensland.
- BOLTON, C.H; HOUGH, L.; KHAN, R. (1972). Sucrochemistry. **Carbohydrate Research** 21(1):133-143.
- BOSCOLO, M. (2003). Sucroquímica: síntese e potencialidades de aplicações de alguns derivados químicos de sacarose. **Química nova**. 26(6):906-912.
- BROWN, G.; H. VÁZQUEZ, L.; ALBA, M.; REYNA, J.L.; GARCÍA, M.E. RODRÍGUEZ (2007). Estudio de un polímero funcionalizado de sacarosa. **Revista Mexicana de Ingeniería Química** 6(001):27-32.
- COLONNA, W.J.; SAMARAWEEERA, U. (2000). Sugar, Properties of Sucrose. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0471238961.1618151603151215.a01/abstract>.
- COOPER, J.M. (2002). Pharmaceutical applications of sucrose or 'Does a spoonful of sugar really help the medicine go down. **Int. Sugar Journal** 104(1243):301-305.

- DESCOTES, G. (1992). Recent developments in sucrochemistry. En: Chandrasekaran, R. (ed.), **Frontiers in carbohydrate research** (pp. 115-127). 2: Proceedings of conference held Purdue University, Indiana, USA, 1-3 May 1990, Barking (United Kingdom): Elsevier Science Publishers Ltd.
- DE WIT, D.; MAAT, L.; KIEBOOM, A.P.G. (1993). Carbohydrates as industrial raw materials. **Industrial Crops and Products** 2(1):1-12.
- FRENZEL, S.; PETERS, S.; ROSE, T.; KUNZ, M. (2009). Industrial Sucrose. Chapter 9.3. En: Rainer Höfer (Ed.), **Sustainable Solutions for Modern Economies** (pp 264-291). Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House.
- GERMANO, M.A.; BOSCOLO, M.; PASTRE, A.; FERTONANI, F.L. (2006). Síntesis de derivados químicos de sacarose empregando DSC (sucroquímica). Associação Brasileira de Análise Térmica e Calorimetria (ABRATEC) y V Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria – VCBRATEC.
- GODSHALL, M.A. (2002). Future directions for the sugar industry. <http://www.spriinc.org/buton10bftpp.html>.
- GUNNINGHAM, N.Y.; SINCLAIR, D. (1997). **A Final Report: Barriers and Motivators to the Adoption of Cleaner Production Practices. Environment Australia**. Canberra: Australian Centre for Environmental Law. The Australian National University. July.
- GUPTA, R.K.; JAMES, K.; SMITH, F.J. (1983). Sucrose Esters and Sucrose Ester/Glyceride Blends as Emulsifiers. **JAOC** 60(4): 862-869.
- GRUBER, H.; GREBER, G. (1990). Reactive sucrose derivatives. **Zuckerindustrie** 115(6):476-483.
- HAYAKAWA, S. (1999). Properties of Sugar Alcohol and its Application. **Technical Journal on Food Chemistry & Chemicals** 15(9):19-24.
- HUGOT, E. (1996). **Handbook of Cane Sugar Engineering** (1166 p.). Sugar Series 7. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publisher.
- HOUGH, L.; RICHARDSON, A.C. (1977). Recent aspects of the chemistry of disaccharides. **Pure & Appl. Chem.** 49:1069-1084.
- HOUGH, L. (1977). Selective substitution of hydroxyl groups in sucrose. En: J.L. Hickson (Ed.), **Sucrochemistry**. Washington DC: ACS Symposium Series ACS, 41:4-21.
- JAROSZ, S.; MACH, M. (2002). Regio- and Stereoselective Transformations of Sucrose at the Terminal Positions. **European Journal of Organic Chemistry** 5:769-780.
- JAMES, C.E.; HOUGH, L.; KHAN, R. (1989). Sucrose and its derivatives, **Prog. Chem. Org. Nat. Prod.** 55:117-184.
- KHAN, R. (1984). Chemistry and new uses of sucrose: how important? **Pure & Appl. Chem.** 56(7): 833-844.
- KHAN, R. (1976). The chemistry of sucrose, **Adv. Carbohydr. Chem. Biochem.** 33:235-294.
- KOLLONITSCH, V. (1970). **Sucrose Chemicals** (256 p.).USA: International Sugar Research Foundation Inc.
- LARRAHONDO, J.E. (2005). La caña de azúcar como planta biofábrica, sus subproductos y coproductos. http://aeta.org.ec/2do%20congreso%20cana/art_fabrica/Larrahondo,%20cana%20planta%20biofabrica.pdf
- LICHTENTHALER, F.W.; PETERS, SC. (2004). Carbohydrates as green raw materials for the chemical industry. **C. R. Chimie** 7:65-90.
- LUBEROFF, B.J. (1997). **An Outsider's View of Sucrochemistry**. Chapter 26, American Chemical Society, ACS Symposium Series, 41:351-363.
- MATHALOUTHY, P.; REISER (1995). **Sucrose, properties and applications** (293 p.). Glasgow UK: Edit. Blackie Academic & professional.
- MIRKOV, T.E.; DAMAJ, M.B.; GONZÁLEZ, J.; MOLINA, J.; WHITE, S.G.; NIKOLOV, Z. (2006). Sugarcane as a biofactory for the economic production of low to medium value proteins: reality or wishful thinking? In JM Manners(Ed.), **Tropical Crop Biotechnology Conference** (21 p.). Cairns, Australia: CSIRO.
- PATURAU, J.M. (1989). **By Products of the Cane Sugar Industry**. Sugar series 11, Elsevier pub.
- SCHIWECK, H.; MUNIR, M.; RAPP, K.M.; SCHNEIDER, B.; VOGEL, M. (1991). New developments in the use of sucrose as an industrial bulk chemical. In: Lichtenthaler FW (ed), **Carbohydrates as organic raw materials** (pp 57-94). VCH, Weinheim.
- PETERS, S.; ROSE, T.; MOSER, M. (2010). Sucrose: A Prospering and Sustainable Organic Raw Material. En: Rauter, Amélia P; Vogel, Pierre; Queneau, Yves (Eds.), **Carbohydrates in Sustainable Development I**. Series: Topics in Current Chemistry, 294 1st Edition., XIV, 200 p.
- ŠIMKOVIC, I., ŠURINA, I.; VRIÈAN, M. (2003). Primary reactions of sucrose thermal degradation. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 70(2):493-504.
- STEWART, S. (1973). A research profile of sugar: as a food, as a chemical raw material; Seventh International Sugar Research Symposium. London, England, September 12 and 13, 57 p.
- QUENEAU; JAROSZ, S.; LEWANDOWSKI, B.; FITREMANN, J. (2007). Sucrose chemistry and applications of sucrochemicals, **Adv. Carbohydr. Chem. Biochem.** 61:217-292.
- QUENEAU, Y.; FITREMANN, J.; TROMBOTTO, S. (2004). The chemistry of unprotected sucrose: the selectivity issue. **Comptes Rendus Chimie** 7(2):177-188.
- QUENEAU, Y. (2000). Carbohydrate derivatives in the field of emulsifiers and fragrances: the case of sucrose. Unité Mixte de Sucrochimie CNRS - Béghin-Say (UMR 143) c/o Eridania Béghin-Say, C.E.I., 27 boulevard du 11 novembre 1918, B.P. 2132 69603 Villeurbanne cedex, France.
- VAN NOSTRAND, R. (1990). **Sugar a user's guide to sucrose** (331 p.). New York, USA: Edit. AVI Book.
- VERHART, C. (1994). Some approaches to the innovative chemical use of sucrose and related monosaccharides http://repository.uibn.ru.nl/bitstream/2066/30051/1/30051%20_some_aptot.pdf
- VINIEGRA, G.G. (2007). **La tecnología mexicana al servicio de la industria. Casos de éxito presentados en los seminarios regionales de competitividad 2005-2006**. Foro Consultivo Cien-

- tífico y Tecnológico, A.C. ISBN: 968-9167-03-0, Primera edición: Febrero de 2007, 177 p.
- VLITOS, A.J. (1977). Hopes in a Sucrochemical Future. Chapter 27, ACS Symposium Series, American Chemical Society 41:364-373.
- THOMAS, C.Y. (1987). Azúcar ¿amenaza o desafío? Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, CIID Oficina Regional para América Latina y el Caribe Bogotá, Colombia 149 p.
- WALFORD, S.N. (2006). A survey of value addition in the sugar industry. http://www.sasta.co.za/wpcontent/uploads/Proceedings/2000s/2006_Walford_a%20survey%20of%20value%20addition.pdf
- WERNICKE, A.; BELNIAK, S.; THÉVENET, S.; DESCOTES, G.; BOUCHU, A.; QUENEAU, Y. (1998). Synthesis of sucrose carbonates in aqueous medium. **J. Chem. Soc., Perkin Trans.** 1:1179- 1181.
-