

Aqui tem Química: Supermercado. Parte III: Carboidratos

There is Chemistry Here: Supermarket. Part III: Carbohydrates

Luana da Silva Magalhães Forezi,^a  Patrícia Garcia Ferreira,^b David Rodrigues da Rocha,^a 
Fernando de Carvalho da Silva,^a  Vitor Francisco Ferreira^{b,*} 

^aUniversidade Federal Fluminense, Instituto de Química, Departamento de Química Orgânica, CEP 24020-141, Niterói-RJ, Brasil.

^bUniversidade Federal Fluminense, Faculdade de Farmácia, Departamento de Tecnologia Farmacêutica e Programa de Pós-Graduação em Ciências Aplicadas a Produtos para a Saúde, CEP 24241-000, Niterói-RJ, Brasil.

*E-mail: vitorferreira@id.uff.br

Recebido em: 8 de Maio de 2021

Aceito em: 13 de Outubro de 2021

Publicado online: 18 de Fevereiro de 2022

This article documented general aspects of the manufacture, composition, consumption and applications of carbohydrates in supermarkets. Carbohydrates have been known to mankind since prehistoric times and represent a family of abundant and easily accessible polyfunctional natural compounds. They can be manipulated by chemical, enzymatic or microbiological pathways. Its chemical value lies in its simple structures with the presence of several hydroxyl groups and well-established chirality. They are compounds abundant in nature and essential as foods for humanity acting as sweeteners added to processed foods and beverages. They are ideal as starting materials in the synthesis of several new compounds and complex natural products with multiple chiral centers. The renewable and interdisciplinary nature of carbohydrates is very relevant for the development of new polymeric and pharmaceutical products. The importance of this compost family could not fail to be present in many products sold in supermarkets available to the consuming public. Most are present as non-caloric sweeteners, food and energy sources, but they are also used as additives that give different properties to food formulations. This article aims to show the participation of carbohydrates in products that are sold in supermarkets and the context of their production and chemical properties.

Keywords: Sugar; saccharose; glucose; fructose; cellulose; syrup.

1. Introdução

*O branco açúcar que adoçará meu café
nesta manhã de Ipanema
não foi produzido por mim
nem surgiu dentro do açucareiro por milagre.
Vejo-o puro e afável ao paladar
como beijo de moça, água
na pele, flor que se dissolve na boca.
Ferreira Gullar (2007)*

Os supermercados possuem uma grande variedade de produtos químicos que são usados em formulações alimentícias e em outros setores industriais, como os óleos, gorduras, corantes, ceras, etc. Os carboidratos, os óleos e as gorduras representam conjuntamente a maioria das substâncias usadas nos produtos alimentares e fazem parte da composição dos tecidos animais e vegetais.

Os carboidratos, também denominados de hidratos de carbonos, sacarídeos ou açúcares, são as biomoléculas mais abundantes na natureza e a maioria dos representantes desta classe apresentam fórmula geral $(CH_2O)_n$, embora existam outras substâncias com outros átomos em sua estrutura como N, S e P. Os carboidratos são classificados como uma classe de substâncias que apresentam grupos funcionais aldeído ou cetona em uma cadeia poli-hidroxilada. Essas biomoléculas são usadas para a construção de vários componentes estruturais das plantas, como celulose e lignina, sistemas de informações, como glicoproteínas, e também são usados na biossíntese de outros componentes importantes para as células, como proteínas, gorduras e outros carboidratos. Anualmente, são convertidos mais de 100 bilhões de m³ de CO₂ e H₂O em celulose, lignocelulose e diversos outros produtos.¹

A definição da IUPAC nesse termo genérico inclui monossacarídeos, oligossacarídeos e polissacarídeos, assim como substâncias derivadas dos monossacarídeos por redução do grupo carbonílico e oxidação de uma ou mais hidroxilas. Atualmente, o termo é muito mais amplo e inclui também substâncias oxidadas ou reduzidas, que tiveram a hidroxila substituída por hidrogênio, amina, tiol e outros heteroátomos.²

É importante destacar que as funções dos carboidratos vão além das funções energéticas, eles fazem parte das membranas celulares e do DNA, que é a biomolécula que carrega as informações genéticas. Carboidratos poliméricos mais complexos, ligados covalentemente a proteínas e lipídios (glicoconjugados), agem como sinais que determinam uma localização intracelular ou o destino de um metabólito. Não menos importante são as funções como matéria-prima em química orgânica sintética e processos industriais,³ onde são usados em diversas reações químicas na síntese de novas moléculas bioativas, adoçantes e fármacos que estão disponíveis no mercado farmacêutico.^{4,5}

Na natureza, os carboidratos existem principalmente como polissacarídeos, incluindo quitina, quitosana, celulose, amido e a maioria dos monossacarídeos, sendo a D-Glicose a hexose mais representativa.⁶ Os carboidratos primários são biossintetizados pelas plantas no processo de fotossíntese, no qual a energia solar e o dióxido de carbono são captados e convertidos em carboidratos pelas células fotossintetizantes. A fotossíntese, ou ciclo de Calvin, é um processo físico-químico fundamental que abastece e propuliona toda vida na Terra por meio de duas reações, uma delas leva à produção de matéria orgânica, como proteínas, gorduras e lignina, e a outra ao armazenamento de energia química.⁷ A energia solar útil por mol de glicose é de 728 Kcal, que corresponde a absorção de 48 mol de quantum de luz.^{8,9} Estima-se que até 10¹³ toneladas de biomassa são produzidas a cada ano pela fotossíntese.¹⁰ Os animais não podem sintetizar carboidratos a partir de substratos simples não energéticos e precisam obtê-los através da alimentação. Existe ainda o processo chamado de gliconeogênese que envolve a síntese da D-glicose a partir de precursores não glicosídicos, como as gorduras. O outro processo de síntese endógena de D-glicose é a glicogenólise do glicogênio armazenado no fígado e músculos, mas este é apenas um processo de reversão.

Os carboidratos apresentam funções energéticas, que vão suprir as células, e funções estruturais, como a celulose que é um importante componente da parede celular da célula vegetal, e a quitina que faz parte do exoesqueleto presente nos artrópodes. Apesar do papel principal dos carboidratos, que é fornecer energia, e de estarem relacionados diversas

funções na bioquímica dos seres vivos, esta classe de substâncias tem sido largamente estudada também pelos químicos orgânicos, pois são abundantes, baratos, apresentam elevada pureza enantiomérica e são substâncias oriundas de tecnologia renovável. A alta produção mundial dos carboidratos nivela seus preços com os de algumas outras substâncias sintéticas industriais, mas não é surpresa que estes não sejam utilizados regularmente como matéria-prima na indústria química em geral, para a produção de substâncias da Química Fina.

Alguns carboidratos são comercializados sob a forma *in natura*, como a sacarose, D-glicose, D-frutose, amido, e outros que estão embutidos em alguma formulação alimentícia, como pães, bolos e geleias. Os alimentos ricos em carboidratos são fontes fundamentais de energia primária. Os carboidratos são encontrados em todo alimento de origem vegetal. Alguns alimentos apresentam uma concentração maior de carboidratos quando comparados a outros. Entre os alimentos ricos em carboidratos podemos citar o milho, arroz, mandioca, batata e inhame. Não podemos nos esquecer também dos pães, massas e doces. Vale salientar que alimentos derivados do leite também apresentam carboidratos, bem como o mel. Na Tabela 1 estão apresentados alguns exemplos de carboidrato e sua origem principal.¹¹

Quando ingeridos na dieta diária, os carboidratos fornecem energia para todas as atividades e funções metabólicas das células sendo três quartos da ingestão calórica dos humanos, enquanto gorduras e óleos fornecem 9 cal/g. Nem todas as áreas do corpo humano consome a mesma quantidade de energia; o cérebro consome 19%, o baço e o fígado juntos consomem cerca de 27% da energia produzida pela queima dos carboidratos. Assim, a dieta de baixo teor de carboidrato (*low carb*) torna-se até perigosa pois todas as nossas funções dependem dessas biomoléculas, o diferencial está na quantidade e na qualidade do que se ingere.

É compreensível que os consumidores não entendam a riquíssima química dos carboidratos, com grande potencial em todas as áreas industriais. A química dos carboidratos é relativamente mais difícil, pois existem inúmeros centros estereogênicos em suas estruturas e um alto grau

Tabela 1. Principais carboidratos naturais contidos nos produtos dos supermercados

Carboidrato	Produto
D-Glicose	Frutas e mel*
Sacarose	Açúcar cristal/refinado e suco de plantas em geral
Xilose	Espiga de milho cereais
Galactose	Presente no guaraná e agar
Frutose	Frutas, mel, alcachofras, frutanos (plantas) ¹²⁹
Celulose	Papel e cosméticos
Amido	Pães, farinhas, feijões, arroz, batata, milho, inhame, mandioca
Quitina	Animais marinhos (camarões, siri), algas verdes

* O mel é uma mistura composta principalmente de D-glicose, D-frutose e o dissacarídeo sacarose

de polaridade. Mesmo sendo compostos de preço bem acessível, ainda é pouco usado nas aulas experimentais de química orgânica.

2. Um Pouco da História dos Carboidratos

Apesar dos carboidratos terem sido utilizados por milênios pela humanidade, apenas no final século XVIII que sua química ganhou força com publicações de trabalhos de diversos pesquisadores renomados, como o químico alemão Hermann Emil Louis Fischer (Prêmio Nobel - 1902). Essa classe de compostos orgânicos teve um impacto substancial no entendimento da estereoquímica e de sua importância nas funções biológicas.

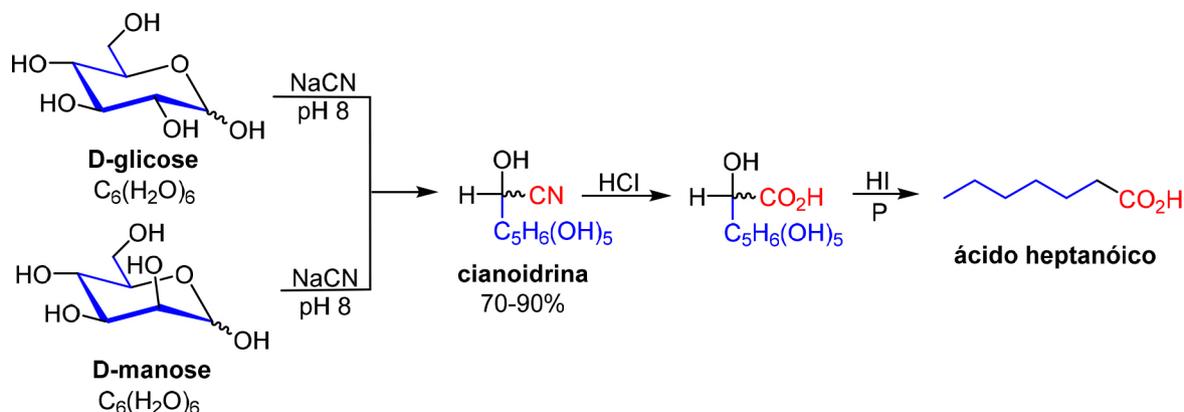
A síntese total da glicose (Fischer, 1895) e a síntese da ureia (Friedrich Wöhler, 1828) foram os trabalhos mais marcantes para a Síntese Orgânica. A palavra carboidrato foi cunhada em 1843 por Jean Baptiste Andre Dumas (1800-1884) que determinou a fórmula mínima CH_2O para a molécula da D-glicose, cuja fórmula molecular é $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, que também pode ser escrita como se fosse um hidrato do carbono do tipo $\text{C}_6(\text{H}_2\text{O})_6$ e, desta fórmula, resultou o nome carboidrato, ou seja, hidrato do carbono.

Em 1866, Friedrich August Kekulé von Stradonitz (1829-1896) propôs o nome dextrose para a glicose, pois era dextrorrotatória. Coube ao químico alemão Heinrich Kiliani (1855-1945) através de uma adição de cianeto a função aldeído (reação de Kiliani), formar uma cianoidrina, que foi facilmente hidrolisada a ácido carboxílico. Em seguida, realizou a hidrogenólise das hidroxilas da cadeia e demonstrou que a D-glicose e a D-manose produziam o ácido heptanóico, demonstrando que ambos possuíam seis átomos de carbono em sua cadeia, uma hexose. Foi por este método que ele determinou que a D-glicose e a D-manose tinham cadeias lineares e que as funções aldeído estavam na extremidade (Esquema 1). Fischer aproveitou a sequência de Kiliani e expandiu a ideia mostrando que uma aldose de cinco átomos de carbono poderia ser transformada em um par de cianoidrinas epiméricas. Esta nova metodologia ficou conhecida como sequência de Kiliani-Fischer que

foi fundamental para a determinação vários carboidratos, inclusive a elucidação da estereoquímica da D-glicose.¹²

3. Classificação dos Carboidratos

Devido à alta complexidade e versatilidade dos carboidratos existem várias classificações para essa família de biomoléculas, normalmente baseadas em função de parâmetros estruturais. Os carboidratos podem ser divididos em três classes em função do número de unidades monoméricas - monossacarídeos, oligossacarídeos e polissacarídeos (Figura 1). Os monossacarídeos são os carboidratos mais simples, contendo de 3 a 8 átomos de carbonos em sua cadeia, como a D-glicose, D-frutose, D-ribose, D-galactose e D-manose. São carboidratos constituídos por aldoses, que possuem o grupo aldeído na cadeia, e cetoses, que possuem o grupo funcional cetona. De acordo com o número de carbonos, os monossacarídeos são classificados em trioses (3C), tetroses (4C), pentoses (5C), hexoses (6C) e heptoses (7C). Os oligossacarídeos são pequenas cadeias de monossacarídeos ligados entre si por ligações glicosídicas. Dissacarídeos são aqueles que possuem duas unidades de monossacarídeos, como a sacarose (D-glicose + D-frutose) e a maltose (D-glicose + D-glicose); trissacarídeos são formados por três unidades de monossacarídeos, como a rafinose (D-galactose + D-glicose + D-frutose). Os polissacarídeos, por sua vez, são formados por longas cadeias contendo centenas ou milhares de monossacarídeos, sendo os maiores representantes da família dos carboidratos na natureza. Essas moléculas orgânicas possuem alto peso molecular e são importantes nos processos metabólicos para manutenção da vida. Eles são classificados como homopolissacarídeos, quando formados apenas por um tipo de monossacarídeos, e heteropolissacarídeos, quando formados por dois ou mais tipos de monossacarídeos. Podemos destacar como representantes a celulose e a amido, ambos polímeros da D-glicose, diferindo apenas na configuração de uma das ligações glicosídicas. Essa diferença é fundamental, pois nosso organismo só tem a enzima glicosidase para quebrar a ligação glicosídica C-1 (α).



Esquema 1. Sequência reacional de Kiliani

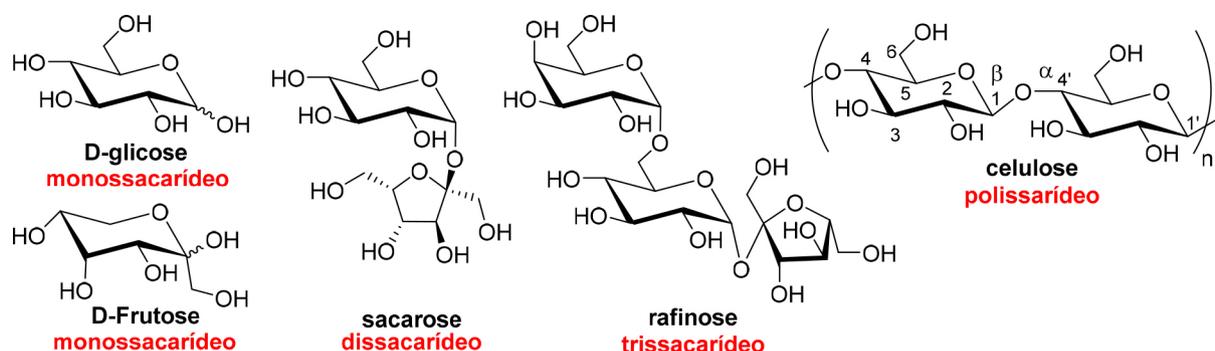


Figura 1. Classificação dos carboidratos

4. Considerações Econômicas

A D-glicose, D-sacarose, amido e celulose, são os carboidratos mais abundantes na natureza e, portanto, economicamente atrativos para uso em alimentos, cosméticos e como matéria-prima na indústria de química fina por fatores como: i) vasta disponibilidade; ii) baixo custo; iii) substâncias enantiomericamente puras com configuração absoluta conhecida; iv) substâncias oriundas de tecnologia renovável; v) possibilidade de derivatizações e manipulações seletivas das hidroxilas por métodos químicos ou bioquímicos.¹³

Em termos de volume de produção industrial mundial, os carboidratos ficam apenas atrás dos óleos vegetais. Cerca de 95% da biomassa produzida na natureza é formada de carboidratos, totalizando aproximadamente 200 bilhões de toneladas. Apesar desta enorme quantidade de matéria orgânica biossintetizada, apenas 3% são utilizadas pelo homem para alimentação e transformações químicas. Como as matérias-primas fósseis vão diminuir no futuro e seus resíduos vão aumentar a pressão no meio ambiente, a produção de combustível e produtos químicos por plantas e algas vai ser a única alternativa viável para obtenção desses materiais. No caso dos carboidratos, a utilização industrial, excluindo a alimentação, tem baixa percentagem de uso sendo restrito a alguns monossacarídeos e dissacarídeos de baixo peso molecular.^{14,15,16}

Os carboidratos comestíveis são componentes importantes na dieta, contribuindo não apenas por quantidades que ocorrem naturalmente em muitas frutas, vegetais e nozes, mas também como adoçantes adicionados aos alimentos e bebidas processadas. Dentre os participantes dessa grande família de compostos naturais se destacam quatro produtos que tem o atrativo de serem adoçantes nutritivos que contribuem muito para a palatabilidade e o sabor dos alimentos disponíveis para consumo da população - sacarose, D-glicose, D-frutose e mistura de D-glicose e D-frutose em diversas proporções que como qualquer ingrediente calórico é preciso tomar cuidado para tomá-los com moderação. Doçura é uma propriedade intrínseca de algumas substâncias e que têm muita importância do ponto de vista econômico.

Considerando o valor 100 para a doçura relativa da sacarose, a D-glicose é menos doce com um valor de 67 e a D-frutose é mais doce com valor de 117, mas é preciso cuidado com a doçura relativa da D-frutose que depende das características físicas e químicas das soluções.¹⁷

5. Amido

O amido é um homopolissacarídeo de grande importância nutricional e industrial, produzido pelas plantas verdes e serve como reservatório de energia. Pelo fato de ser tão rico em carboidratos, fonte de energia para o organismo, o amido é um excelente alimento. É o mais comum carboidrato na alimentação humana e é encontrado em grande quantidade de alimentos, sendo sua presença abundante em cereais, como arroz, milho e trigo, e em tubérculos, como batata e mandioca.¹⁸

O amido é constituído por duas cadeias de polissacarídeos, a amilose e a amilopectina (Figura 2), que diferem no encadeamento das unidades da D-glicose. Na amilose a cadeia é linear com ligações $\alpha(1,4')$ e na amilopectina há uma ramificação na hidroxila de C6 com uma ligação $\alpha(1,6')$. Entretanto, as ligações $\alpha(1,4')$ continuam no polímero ramificado como $\alpha(1,6')$ ¹⁹ e a composição entre esses dois polissacarídeos varia de acordo com a planta. O amido da batata difere basicamente do amido da mandioca (aipim ou macaxeira) na relação entre a amilose e amilopectina. Os humanos possuem enzimas α -amilases na saliva e no intestino que quebram as ligações $\alpha(1,4')$ e $\alpha(1,6')$ em unidades de D-glicose que é transformada em energia e outros produtos do metabolismo.

Os humanos e seus ancestrais sempre comeram alimentos ricos em amido derivados de sementes, raízes e tubérculos e, já na era das civilizações egípcias, as fitas de papiro eram coladas com um adesivo de amido feito de trigo. Atualmente, o amido é usado nos alimentos para alterar, controlar a textura, aparência, umidade, consistência e estabilidade do produto. Também está presente em todos os alimentos de origem vegetal e algas com abundância variável nas folhas verdes dos vegetais, raízes, caules, sementes ou frutas. É comercializado nos supermercados na forma *in natura* de amido e fécula de amido.

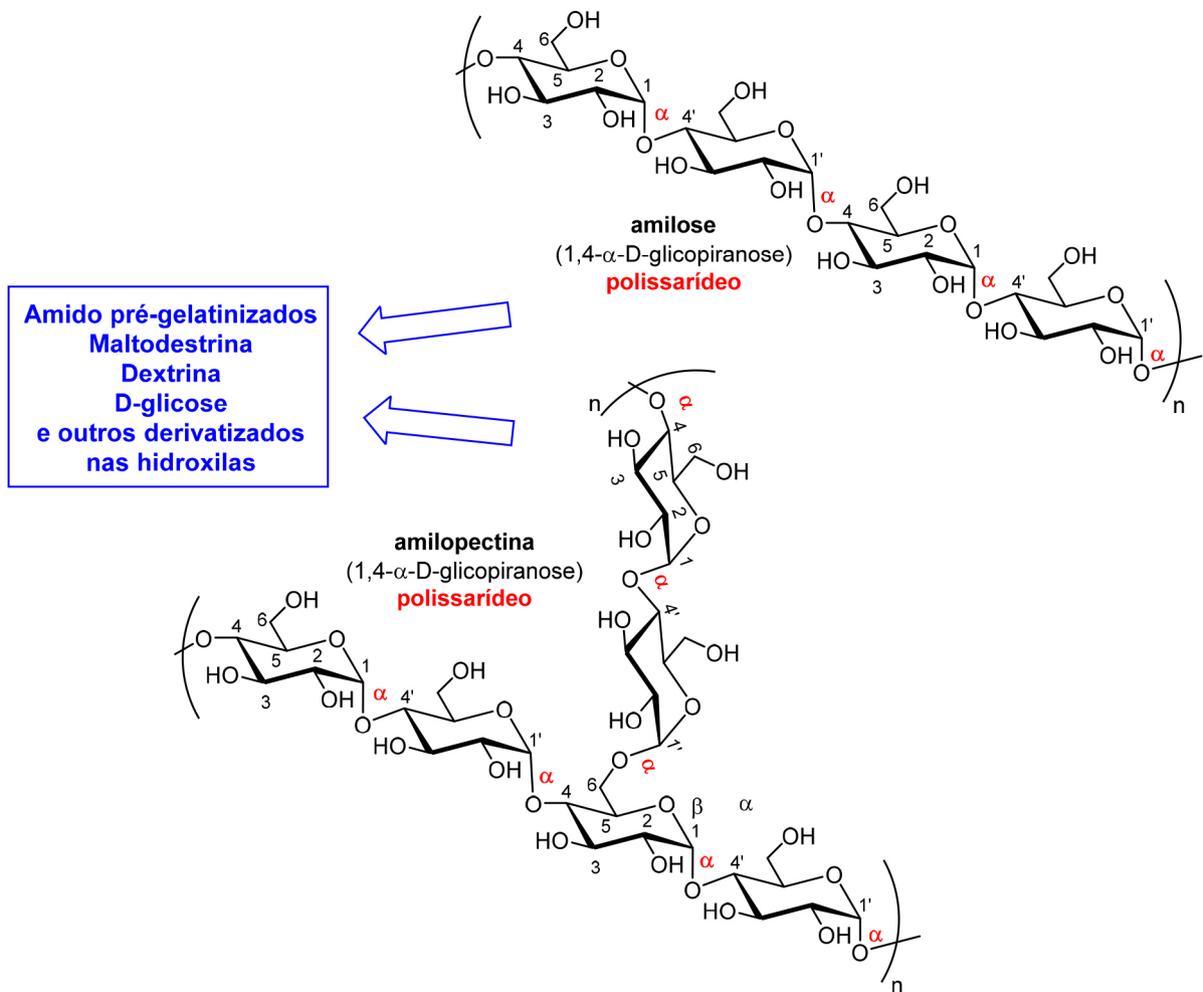


Figura 2. Polissacarídeos que constituem o amido

O desempenho e a qualidade do amido podem ser melhorados dependendo do tipo de processamento do amido e, desta forma, serem introduzidos em produtos congelados, instantâneos, desidratados, encapsulados, refeições prontas e maior vida útil nas prateleiras. Também pode ser utilizado como espessante em sopas, caldos e diversos molhos de carne, queijos processados, requeijão, molhos tomate e salada, embutidos de carne, cereais pré-cozidos, pastas, massas e biscoitos. Além das indústrias de papéis, colas, adesivos, aglutinantes de revestimento e produtos têxteis.

O amido e a amilopectina podem ser modificados por ação química, térmica, termoquímica ou enzimática. Os amidos pré-gelificados são modificados por ação térmica e unidade para serem gelatinizados instantaneamente quando em contato com a água ou leite, quentes ou frios, para serem digeridos mais facilmente. A maioria dos amidos ingeridos pelo homem são submetidos a tratamentos com calor e umidade, resultando no rompimento e gelatinização da estrutura do grânulo nativo. Jovens animais em cativeiro também podem ser tratados com farinha pré-gelatinizada de milho na alimentação com bons resultados.²⁰ Esses tipos de amido pré-gelatinizado de milho são encontrados nos supermercados em produtos como fubá de milho

instantâneo, amido de milho (maizena), curau, milharina, pamonha, flocos de milho, mistura para bolos de milho, leite em pó e sorvetes.

O avanço no conhecimento das enzimas permitiu um controle preciso dos produtos e das condições de hidrólise do amido transformando-o em xarope de alta pureza da D-glicose. Dois produtos importantes são produzidos para a indústria alimentícia, a maltodextrina e a dextrina. Estes carboidratos são produzidos a partir hidrólise parcial do amido, por um processo químico ou enzimático, mas também a partir do arroz, batata, mandioca e trigo. Essa mistura de oligômeros da D-glicose tem sabor adocicado e pode agregar água e se tornar viscoso sendo muito útil para formulações de bebidas energéticas, molhos, produtos lácteos, embutidos, refrigerantes, pães e balas de goma.

No início de 1900, foi descoberto na China uma variedade genética de milho que só produz amilopectina, e atualmente é cultivada em diversos países, sendo conhecida como amido de milho ceroso (*waxy*), que tem propriedades diferentes e muito úteis. Entretanto, por apresentar uma produção inferior seu preço é mais elevado. O amido de milho *waxy* modificado também pode ser usado na fabricação de molhos e maionese.

6. Celulose

A celulose, componente básico dos tecidos vegetais, que dá rigidez e firmeza às plantas e é **útil** por suas numerosas aplicações, é um polissacarídeo de cadeia linear, constituída por unidades monoméricas de β -D-glicopiranosose unidas por ligação éter do tipo $\beta(1,4')$. É a molécula orgânica mais abundante do planeta e consiste em 50% da composição da madeira.

A natureza produz a celulose através de árvores, plantas, animais, fungos, algas e bactérias, sendo a fibra vegetal a principal fonte, onde a celulose atua como um elemento estrutural, dando força à madeira e a outras plantas. Pode existir em uma forma pura nos pelos das sementes do algodão onde o teor de celulose é superior a 90% em peso. As cadeias de celulose apresentam uma tendência muito elevada de auto-organização e por isso é muito útil na indústria têxtil. Os processos mais comuns de isolamento da celulose da madeira são o kraft (sulfato) e o processo sulfito, em que celulose é liberada da lignina resultando em polpas de várias resistências e purezas de fibra. A produção de celulose em 2019 no Brasil foi de 19,691 milhões de toneladas com exportações de 14,726 milhões de toneladas.^{21,22}

A não utilização da celulose na indústria de alimentos está relacionada a sua estrutura química, uma vez que a ligação $\beta(1,4')$ não pode ser hidrolisada em nosso sistema digestivo e nem de muitos outros animais. Entretanto, cupins conseguem digerir a celulose rapidamente, pois têm no seu intestino bactérias simbióticas que secretam a enzima celulase que faz a hidrólise da ligação $\beta(1,4')$ e liberaram a D-glicose. Alguns mamíferos ruminantes também conseguem fazer a digestão da celulose.

Nos supermercados a maioria da celulose *in natura* é encontrada em papel toalha, papel higiênico, filtro para café, lenços, fraldas, absorventes íntimos, panos, toalhas, algodão hidrofílico, cotonetes, produtos têxteis de algodão, cadernos, agendas e embalagens. As fraldas e absorventes íntimos utilizam hidrogéis à base de celulose com ou sem ligações cruzadas covalentes e são capazes de absorver, reter e liberar soluções aquosas de forma reversível. As fraldas descartáveis mais modernas, que contêm o polímero poliácrlato de sódio, são mais eficientes na retenção de água que as fraldas de pano convencionais, constituídas de fibras de celulose, decorrente das interações dipolo-dipolo mais fortes entre o poliácrlato e a água, em relação às ligações de hidrogênio entre a celulose e as moléculas de água.

As hidroxilas da celulose podem ser derivatizadas empregando diversas reações químicas, tornando-se produtos de grande interesse industrial. A esterificação com acetila, propionila, isopropionila e butirila, combinadas com diferentes graus de substituição, produzem matérias-primas para fibras têxteis, filme fotográfico, filtros para hemodiálise, revestimentos isolantes, massa termoplástica, seda, folhas e rayon (acetato de celulose). Outros grupos

importantes de derivados da celulose são os éteres, como carboximetilcelulose, metilcelulose, etilcelulose, hidroxietilcelulose, hidroxipropilcelulose e éteres mistos.^{23,24}

Sob a forma modificada e purificada de celulose microcristalina (INS 466, na lista de aditivos alimentares como E-460), esta pode ser usada em formulações alimentícias, cosméticos e medicamentos. É um ingrediente multifuncional capaz de estabilizar diversos sistemas alimentícios, pois age como fibra insolúvel estabilizante, agente de textura e cremosidade. Está presente em bebidas vegetais, proteicas, creme de leite, leite de coco, recheio de biscoitos, sorvete e molho de salada. Na **área** farmacêutica e de cosméticos pode ser usado como excipiente em formulações de cápsulas, comprimidos, cremes e géis.

7. A Sacarose e a Sucroquímica

Conhecida desde o ano 200 a.C., a sacarose (1-O-(β -D-frutofuranosil)- α -D-glicopiranosose) é o mais abundante de todos os carboidratos de baixo peso molecular, encontrada em grande quantidade na cana-de-açúcar, frutas e na beterraba. É vulgarmente conhecida como açúcar ou açúcar de mesa e confundida com outros carboidratos por causa da sua doçura.^{25,26,27} Um carboidrato de baixo custo, elevado teor de pureza (99,7%) e comercializado em supermercados é um grande estímulo aos pesquisadores a utilizarem como substrato na síntese de materiais especiais. Esse ramo da química é tão importante que passou a ser conhecido por sucroquímica que envolve o ramo da ciência e da tecnologia cujo objetivo é acrescentar ao mercado novas utilizações da sacarose e seus derivados.

Em relação a sua estrutura química, a sacarose é formada por duas unidades de monossacarídeos, D-glicose e D-frutose, unidas por ligações glicosídicas (1 \rightarrow 2') contendo oito grupos hidroxilas com reatividade variável e dependente das condições reacionais. Cálculos semiempíricos de entalpias de desprotonação fornecem uma escala comparativa para a acidez dos vários grupos hidroxila, sendo que a hidroxila presente em C-2 na D-glicose é a hidroxila mais ácida. De acordo com os dados de entalpia, a ordem de acidez dos grupos hidroxila obedece a seguinte ordem: OH-2G>>OH-3G>OH-3'F> O1'F>>O-6G>>O-6'F.²⁸

O cultivo da cana-de-açúcar (*Sacharum officinarum*) foi introduzido na Martinica durante a década de 1640 por refugiados holandeses de Pernambuco, e a conexão íntima entre a fabricação do açúcar e o trabalho dos escravos africanos foi rapidamente estabelecida.²⁹ As refinarias de açúcar, que são os antigos engenhos, usam a cana-de-açúcar para obter a sacarose. Tais refinarias se estabeleceram no Brasil no século 18, com uso de mão de obra escrava, e continuam até os dias atuais e tornaram a sacarose uma *commodity*.³⁰ Esse dissacarídeo é a substância orgânica cristalina de maior produção mundial. Entretanto, apenas 5% desta quantidade é utilizada pelas indústrias químicas para produção de outras substâncias de maior valor agregado. O Brasil já foi

o maior produtor de sacarose, mas foi ultrapassado pela Índia que atualmente são os maiores produtores mundiais, principalmente para usos alimentares.^{31,32} Na safra 2019-2020 foram produzidas 166,19 milhões de toneladas cúbicas de sacarose no mundo.³³

A sacarose pode ser encontrada em diversos produtos comerciais com aspectos que dependem da sua forma de purificação e que são referenciados como “açúcar” (Figura 3). São eles: i) açúcar refinado granulado - puro, sem corantes, dissolução rápida, granulometria fina e branca excelente, sem umidade ou empedramento e com cristais bem definidos e granulometria homogênea. O açúcar refinado granulado é muito utilizado na indústria, em confeitos, xaropes de excepcional transparência e mistura seca em que são importantes pelo aspecto, escoamento e solubilidade; ii) açúcar cristal - com cristais grandes e transparentes, difíceis de serem dissolvidos em água. Depois do cozimento passa apenas por um refinamento leve, que retira 90% dos sais minerais. Por ser econômico e render bastante, o açúcar cristal aparece com frequência em receitas de bolos e doces; iii) açúcar mascavo ou mascavado ou bruto - açúcar petrificado, de coloração variável entre caramelo e marrom, resultado da cristalização do mel-do-engenho e ainda com grande teor de melaço; iv) açúcar demerara - é o açúcar granulado de coloração amarela, resultante da purgação do açúcar mascavo, e com teor de melaço mais baixo em sua composição, mais utilizado para exportação. Ele é resultado de um processo absolutamente natural em que a cana é colhida verde, ou seja, sem queimada. Passa por um leve refinamento e não recebe aditivos químicos. Seu valor nutricional é semelhante ao mascavo; v) açúcar invertido – é um material obtido da hidrólise da sacarose em meio ácido que produz uma mistura equimolar de D-glicose e D-frutose. A fragilidade da ligação glicosídica $\alpha(1,2')$ entre os dois carboidratos é facilmente rompida com ácidos fracos. Essa mistura não se solidifica, é solúvel em água e fica na forma de um mel incolor.³⁴ Por ter a rotação óptica invertida em relação a sacarose, não é possível separar esses dois carboidratos por métodos convencionais e economicamente atrativos. Mesmo assim é possível utilizar essa mistura em reações químicas e para obtenção de xaropes ricos em D-frutose.³⁵

Outro produto muito popular no Brasil, comumente comercializados em mercados do interior, é a rapadura. É um produto doce e sólido de origem açoriana ou canária,

com sabor e composição semelhantes ao açúcar mascavo, feita a partir da cana-de-açúcar após moagem, fervura do caldo, moldagem e secagem. Da sacarose sólida se produz o caramelo que nos supermercados é comercializado nos produtos em caldas, doces de caramelo e coberturas. Pode ser facilmente produzido em casa pelo aquecimento lento de qualquer sacarose (caramelização). A sacarose começa a fundir e a se decompor pela quebra de algumas moléculas em aldeídos, hidroximetilfurfural (HMF) e polímeros que lhe dão a cor e sabor característicos do caramelo. O nome caramelo é comercialmente muito atrativo, pois denota uma cor de produtos comestíveis e remete a um produto adocicado, mesmo que esse não seja o caramelo mais saudável. Dentre os corantes permitidos como aditivo na indústria de alimentos, o corante caramelo I é um dos mais antigos, sendo usados para se obter cores que vão da amarela-palha à marrom escura até quase negra. Existem os corantes caramelo II, III e IV que são obtidos pelos processos amônia e sulfito. O caramelo IV, corante controverso na literatura, é muito usado em bebidas de cola, caldas, sorvetes, pães, geleias e biscoitos. A cachaça, também comercializada como aguardente, é obtida com a fermentação do caldo de cana seguido de destilação, sendo o terceiro destilado mais consumido no mundo e de grande importância cultural, social e econômica para o Brasil. Por Decreto Federal é a bebida nacional do Brasil, e por Lei Estadual de Minas Gerais, um patrimônio Cultural do Estado. Já o Rum é feito a partir da fermentação do melaço ou melado, seguido de destilação, sendo a cor caramelada decorrente dos produtos coloridos que tem no próprio melaço. O melaço é um líquido resultante da etapa de centrifugação, no processo de fabricação de açúcar, que contém açúcares redutores e parte de sacarose não cristalizada (Figura 4).

Existem muitos produtos que podem ser obtidos a partir da sacarose, empregando diversas transformações químicas, podendo destacar i) modificações nas hidroxilas da sacarose e ii) sacarose como fonte de pequenas moléculas.

i) Modificações nas hidroxilas da Sacarose

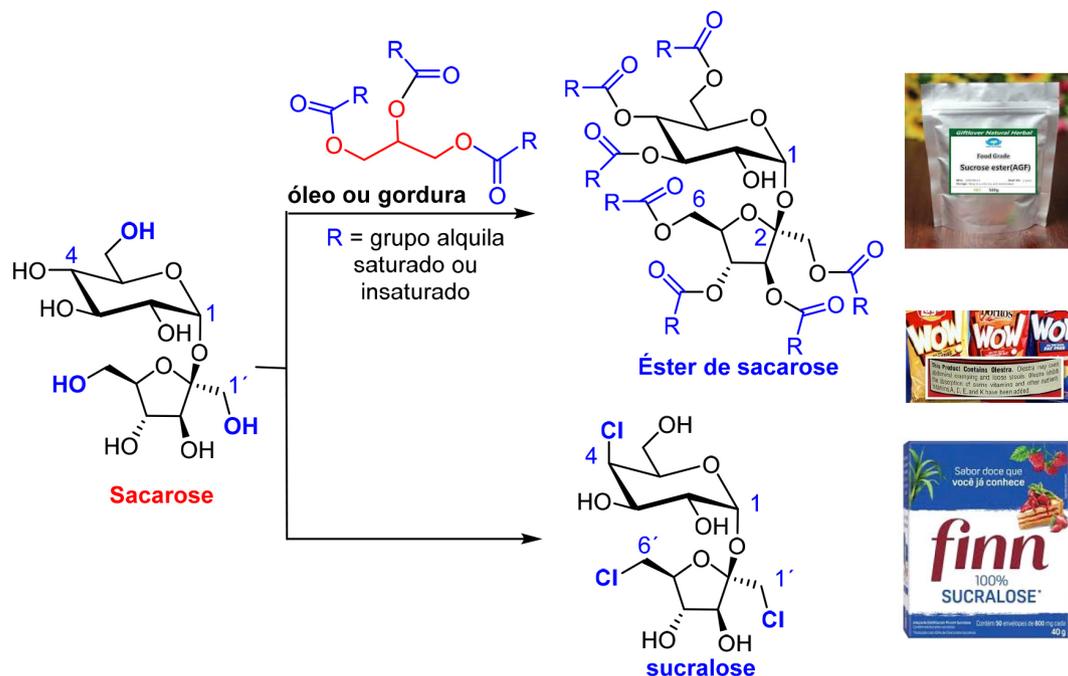
Existem inúmeros derivados da sacarose obtidos apenas por modificações nas hidroxilas da molécula, que se tornaram importantes produtos comercializados nos supermercados, como os ésteres da sacarose e a sucralose (Esquema 2).^{36,37}



Figura 3. Tipos de açúcares encontrados nos supermercados



Figura 4. Outros produtos comerciais obtidos a partir da sacarose



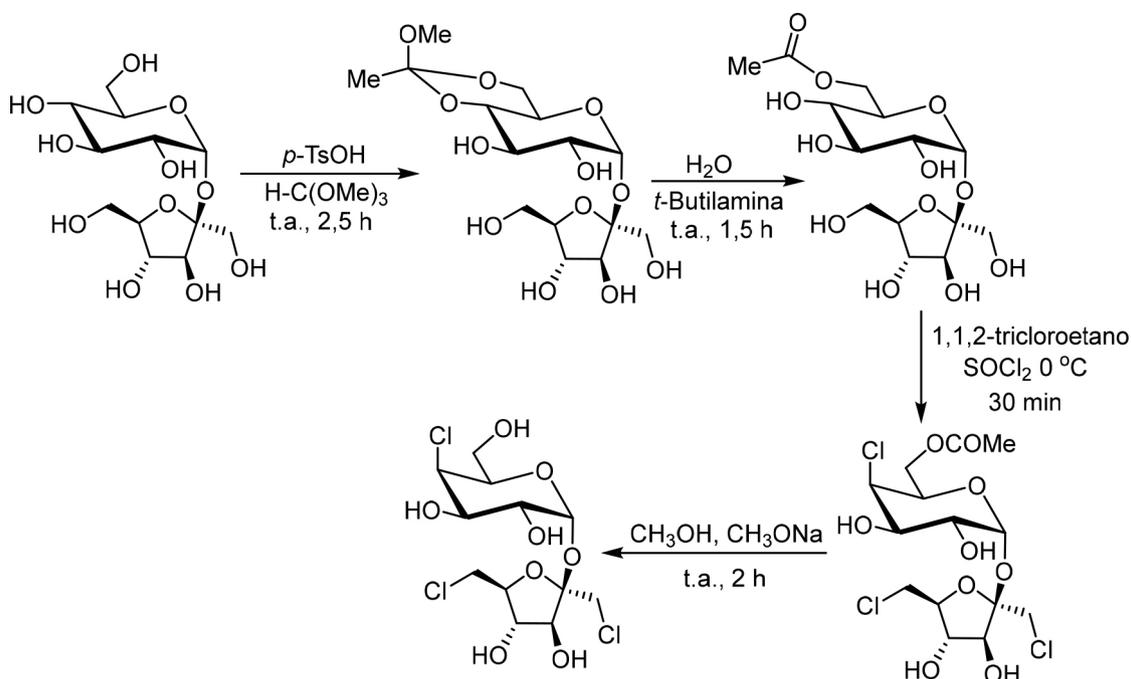
Esquema 2. Derivados da sacarose com modificações nas hidroxilas

Os ésteres são obtidos por reação de esterificação direta ou transesterificação com gorduras, **óleos** comestíveis ou ainda outros carboidratos, podendo reagir em todas as oito hidroxilas ou de forma parcial.³⁸ Sua classificação internacional é INS 473 subdivida em dois grupos: INS 473a (Tipo I, altamente esterificado) e INS 473b (Tipo II com menor grau de esterificação), além de misturas. Estes compostos são tensoativos não iônicos, atóxicos, compatíveis com a pele e podem ser utilizados em alimentos. Estima-se que o mercado de **ésteres** de sacarose em 2025 chegará no valor de US\$ 106 milhões.³⁹ A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) incluiu os ésteres graxos da sacarose (INS 473) na subcategoria 14.2 do Anexo I da Resolução - RDC nº 239, de 26 de julho de 2018, como aditivo alimentar na função emulsificante, com limite máximo de uso de 7 gramas por 100 gramas para comprimidos, gomas, drágeas, tabletes, cápsulas, cápsulas gelatinosas, pastilhas e formas mastigáveis e sozinho ou em combinação com os aditivos oligoésteres de sacarose tipo I e tipo II, INS 473a e b.⁴⁰

As longas cadeias presentes nos ésteres graxos da sacarose atuam como uma extremidade lipofílica da

molécula e as hidroxilas livres como a extremidade hidrofílica. Esta propriedade anfílica confere a estas substâncias um excelente balanço hidrofílico-lipofílico (HLB), tendo a capacidade de interagir com água e óleo simultaneamente. Dependendo do valor de HLB, que varia de 1 a 16, e quanto maior for esse valor mais conteúdo de monoésteres existem na molécula. Alguns podem ser usados como emulsificantes de água em óleo (A/O) e outros como emulsionantes de óleo em água (O/A),⁴¹ sendo que os valores de HLB de monoésteres está entre 10 ~ 16 (bom emulsificante O/A), os diésteres entre de 7 ~ 10 (bom agente umectante) e os triésteres são de 3 ~ 7 (bom emulsificante A/O). Esses emulsificantes são atóxicos, biodegradáveis, ambientalmente recomendáveis, apresentam alto desempenho e excepcional suavidade em produtos cosméticos para a pele e os olhos. É uma alternativa aos polietilenoglicóis (PEG) que não são produtos sintético com baixa biodegradabilidade.

Os alimentos mais comuns em que são usados ésteres graxos de sacarose são bebidas, geleia, barras de cereais, leite, panificação, condimentos, laticínios, confeitaria,



Esquema 3. Rota sintética utilizada para a síntese da sucralose

cereais, maioneses e sorvetes. As funções mais importantes são estabilizar a emulsão impedindo a separação do óleo, evitar a cristalização do açúcar, oxidação das gorduras, não produzir produtos da reação de Maillard,⁴² formar glóbulos de gordura menores, prevenir precipitação, interagir com proteínas para prevenir a floculação proteica, interagir com as proteínas da farinha resultando em aumento de volume, reduzir a viscosidade da massa de chocolate, melhorar a retenção de água em embutidos e presuntos, aprimorar a percepção de sabor e a estabilidade, evitar a separação de óleos e gorduras de produtos embutido com alto teor de gordura e emoliente para cremes dermatológicos. Com essa variedade de aplicações incluindo em produtos farmacêuticos e de higiene pessoal, o mercado global de ésteres de ácidos graxos deve se expandir nos próximos anos.^{43,44}

Ésteres graxos de sacarose podem ser sintetizados por métodos químicos e por conversões microbianas ou enzimáticas. O método químico ocorre pela esterificação direta de sacarose com um ácido graxo, ou pela reação de transesterificação de sacarose com um éster de ácido graxo, empregando catalisadores básicos, como KHPO_4 , Na_2HPO_4 e Li_2CO_3 . A síntese industrial de sucroésteres envolve o método químico e apresenta um custo mais baixo, porém utiliza condições anóxicas, alta temperatura e pressão reduzida. Geralmente são menos seletivos e produzem uma mistura de ésteres cuja purificação do produto é complicada com geração de resíduos e solventes tóxicos, tipicamente DMF e DMSO, difíceis de serem removidos. Existem muitas outras condições reacionais para a preparação industrial desses compostos, como reações sem solvente e reações

sob catálise enzimática, que são mais regioseletivas, porém apresentam custos elevados.^{45,46,47,48, 49}

Os ésteres graxos mono, di- e tri-substituídos da sacarose são muito pouco hidrolisados pelas lipases intestinal, sendo pouco absorvidos pelo organismo. Aqueles com maior grau de substituição (SPE = sucrose polyester) são muito grandes para serem absorvidas adequadamente pelo trato intestinal e então transformados em gordura corporal e, portanto, não fornece nutrição ou energia. Quando usado como um aditivo alimentar, ficam com sabor gorduroso,* mas não são absorvidos pelo corpo humano. Nesta classe de ésteres de sacarose se destaca o produto comercial Olestra (Procter & Gamble, Brasil) que é uma gordura artificial não calórica cujo objetivo é proporcionar uma maior palatabilidade sem ganho calórico.⁵⁰ Os fabricantes de produtos alimentícios que utilizam o Olestra® precisavam informar nos rótulos dos produtos os efeitos colaterais causados pela gordura artificial. Atualmente, essa exigência foi banida pela FDA, pois comprovou-se que os sintomas gastrointestinais não são piores do que a de uma gordura normal.^{51, 52,53}

A sucralose ou 1,6-dicloro-1,6-didesoxi-β-D-frutofuranosil-4-cloro-4-desoxi-α-D-galactopiranosídeo⁵⁴ é um adoçante não nutritivo utilizado em uma ampla variedade de alimentos e bebidas, aprovado em mais de 100 países. A sucralose pode ser comercializada sob a forma granulada ou em solução, com ou sem outro edulcorante sinérgico, sendo muito segura para uso em alimentos. A cloração seletiva das posições C-4, C-1' e C-6' da sacarose, com inversão da posição C-4 na unidade da D-glicose, torna a sucralose 600 vezes mais doce do que a sacarose (Esquema 3).^{55,56,57} As modificações nas duas hidroxilas aumentam estabilidade

*Estudos revelam que nossas papilas gustativas conseguem identificar um sexto sabor, o gorduroso.

da ligação glicosídica da sacarose, sem comprometer a qualidade do sabor, a solubilidade em água e não deixando nenhum sabor residual desagradável.^{58,59} Apesar da maior estabilidade da ligação glicosídica, essa substância não está isenta de decomposição térmica formando hidrocarbonetos policíclicos aromáticos clorados, compostos potencialmente tóxicos, como relatado no recente estudo que aponta os riscos do uso do adoçante sucralose, especificamente, quando usado em alimentos e sobremesas quentes, como chás, cafés, bolos e tortas.⁶⁰

ii) Sacarose como fonte de pequenas moléculas

Moléculas pequenas que são produzidas a partir da sacarose, são comumente encontradas nos supermercados em diversos produtos, como o etanol, ácido acético, ácido glutâmico, ácido láctico e ácido cítrico (Figura 5).

O etanol é o principal produto obtido a partir da cana-de-açúcar por fermentação biológica do caldo de cana rico em sacarose, mas também pode ser obtido de outras fontes de carboidrato, como álcool de cereal. O principal uso do etanol é como combustível e representa um grande mercado que tende a se tornar cada vez mais importante em nações que não são autossuficientes em combustíveis, mas que têm capacidade de produzir sacarose. Este composto pode ser adquirido *in natura* nos supermercados em diversas concentrações com água e, também, em muitas bebidas alcoólicas como a cerveja, vinho e bebidas destiladas, bem como na indústria de perfumaria.

O vinagre é um produto obtido a partir da fermentação alcoólica da sacarose pelo fungo *Saccharomyces cerevisiae* e posterior oxidação com organismos mistos do gênero *Acetobacter* levando ao produto com aproximadamente 4% de ácido acético. Outras fontes de carboidratos podem ser utilizadas, como os sucos de frutas e xaropes contendo amiláceos hidrolisados. Quando sua origem é de frutas

recebe o nome da fruta (vinagre de maçã, vinagre de uva, vinagre de coco) e quando vem dos derivados da cana recebe o nome de vinagre de álcool. O vinagre também tem utilidade em produtos de limpeza para a remover gordura de superfícies, sendo um ingrediente comum nos limpadores comerciais.

Outro produto obtido a partir da sacarose que também é comercializado nos supermercados é o ácido glutâmico, que está presente em diversos alimentos, como ovo, leite, queijo, carne, aspargo, agrião e alface. É um aminoácido não essencial, importante para o bom funcionamento do cérebro, além de ser fundamental para originar outras substâncias essenciais para o organismo, como a prolina e o ácido gama-aminobutírico (GABA). O ácido glutâmico é produzido pela Ajinomoto para uso na indústria alimentícia e no Brasil é produzido através da fermentação do caldo da cana-de-açúcar. É comercializado por diversas empresas sob a forma do sal monossódico contendo aproximadamente 78% de ácido glutâmico livre e 21% de sódio. O sal glutamato, que traz o sabor umami, é encontrado em sopas enlatadas, tabletes realçadores de sabor (Sazon, caldos Maggi, sopas instantâneas), pipoca de micro-ondas, molho shoyu, biscoitos, carnes, saladas, refeições congeladas, em rações de animais, entre outros.

O ácido láctico é um produto que se forma durante a fermentação de alguns alimentos como queijos, iogurtes, alimentos fermentados de soja, vegetais em conserva, cervejas e vinhos, porém pode ser produzido sinteticamente.^{61,62} Sua produção pode ser realizada pela fermentação da sacarose, de açúcar invertido e hidrolisado de amido por diversos organismos, como *Escherichia Coli*, *Lactobacillus* spp. ou fungos como *Rhizopus* spp.⁶³ Atualmente, a produção de ácido láctico está em ascensão, uma vez que ele é utilizado no preparo de um polímero biodegradável chamado poliácido láctico (PLA).⁶⁴ Um

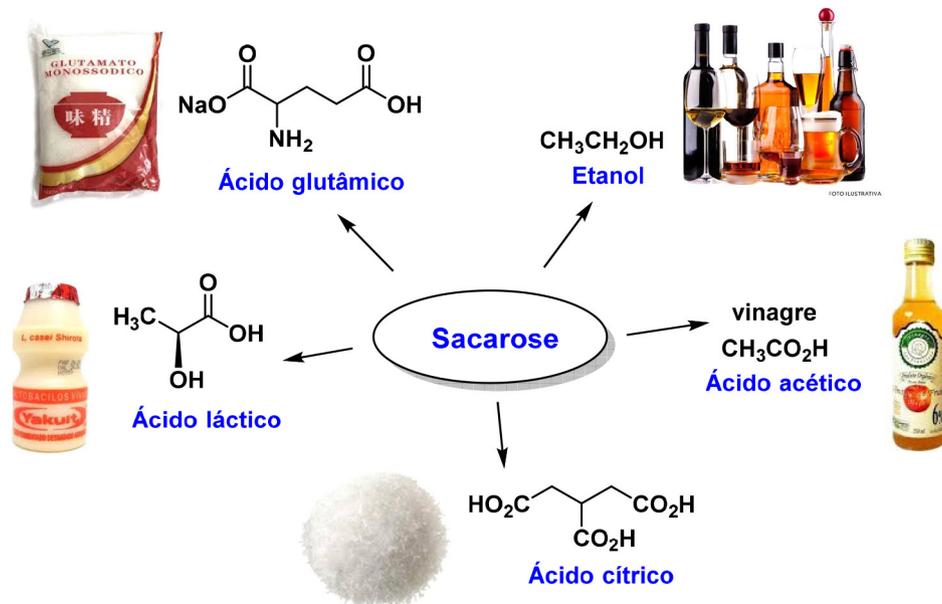


Figura 5. Produtos obtidos por transformação da sacarose

produto comercializado nos supermercados que contém ácido láctico é o leite fermentado com lactobacilos vivos (Yakult, Brasil; Nestlé, Brasil; Batavo, Brasil, entre outros).

O ácido cítrico é um composto orgânico que pode ser obtido industrialmente pela fermentação de sacarose, glicose, melão ou amido de milho hidrolisado com *Aspergillus niger*.⁶⁵ Trata-se de um ácido tri-carboxílico, ocorrendo em quantidades razoáveis em uma grande variedade de frutas cítricas, como limão, laranja, caju, framboesa e acerola.^{66,67} *In natura* é usado em baixas concentrações nas emulsões apresentando funções como antioxidante, flavorizante, sequestrante, acidulante (INS 330) e conservante natural, conferindo um sabor ácido e refrescante em alimentos e bebidas.⁶⁸ Também apresentam aplicações na área de cosméticos, em cremes esfoliantes, que elimina células mortas e previne o envelhecimento precoce da pele. O ácido cítrico é produzido numa escala mundial de milhões de toneladas e com perspectivas de crescimento anual constante no consumo e na produção.

8. D-Glicose: O Monossacarídeo da Vida

A D-glicose é o monossacarídeo da vida, pois desempenha um papel central na regulação do metabolismo humano e fonte primária de energia para organismos vivos, podendo ser consumida de duas formas, como D-glicose livre nas frutas, vegetais, mel e sucos naturais e ligada entre si em polímeros, como no amido em alimentos integrais, amidos purificados, dextrinas, maltose, maltodextrinas e xaropes de milho normais. Além disso, está presente em diversos dissacarídeos ligado a outros açúcares, como ocorre na sacarose, que está ligada à frutose. Em 2018, Silva e colaboradores publicaram um artigo mostrando aspectos históricos e mecânicos sobre a obtenção da D-glicose.⁶⁹

Em solução aquosa, a D-glicose apresenta quatro estruturas cíclicas além da forma aldeídica acíclica que estão em equilíbrio entre si pelo fenômeno denominado mutarrotção (Figura 6). As duas estruturas com os anéis

heterocíclicos furânico e pirânico podem se apresentar sob a forma de dois estereoisômeros (epímeros) devido ao novo centro quiral gerado no carbono hemiacetalico. A forma β -D-glicopiranoose é a mais abundante em solução e todos os grupos estão na posição equatorial do anel. A forma acíclica da D-glicose existe em traços em solução com a função aldeído livre, e apesar disso essa função pode ser reduzida ou oxidada. Se reduzida leva ao sorbitol e se oxidada leva ao ácido glucônico, que por ciclização produz a gluconolactona, compostos de grande relevância comercial.

A D-glicose é o componente básico das duas biomassas mais importantes: celulose e amido, que são empregadas como fontes renováveis e abundantes.⁷⁰ Essas matérias-primas são naturalmente candidatas para a produção comercial da D-glicose, sendo o amido o melhor candidato por ser facilmente hidrolisado por reações em meio ácido, reações enzimáticas e reações com micro-organismos.

Todas as células necessitam basicamente de três exigências fundamentais: poder redutor (NAPH), energia (ATP) e matéria-prima carbônica (CO₂). A partir destes componentes, as células podem biossintetizar uma diversidade enorme de substâncias, inicialmente passando por duas substâncias muito simples: ácido acético e ácido chiquímico. As pessoas obtêm D-glicose para energia (ATP) através dos alimentos, predominantemente alimentos ricos em amido de diversas fontes, e após ser ingerida é facilmente transportada e utilizada por todas as células do corpo.

Industrialmente, xaropes de D-glicose em altas concentrações podem ser produzidos por hidrólises do amido de frutas, milho, trigo, arroz, diversas batatas, mandioca, cenoura, inhame e cereais. A partir desses xaropes pode-se obter a D-glicose cristalina pura. Os xaropes e a D-glicose cristalina são produtos usados como nutrientes em uma variedade de aplicações alimentares e nesse caso, funcionam como aditivos e materiais calóricos. Uma aplicação bem conhecida e comercializada nos supermercados é a solução concentrada sob a forma de um produto que imita o mel. A maior utilização não alimentar da glicose é como matéria-prima extremamente abundante

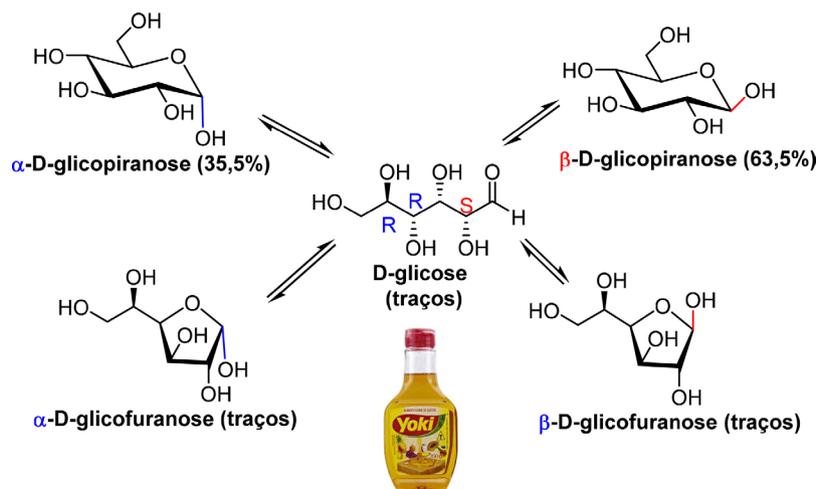


Figura 6. As estruturas da D-glicose em solução aquosa. Imagem do produto: alimento à base de Glicose (Yoki, Brasil)

para a produção de etanol por fermentação de levedura. Entretanto, ressalta-se que este carboidrato é o que mais tem aplicações como blocos de construção em síntese orgânica, decorrente de suas características estruturais.⁷¹

9. D-Frutose: O Monossacarídeo mais Doce

A D-frutose é um monossacarídeo da família das cetoses e apresenta a mesma fórmula molecular da D-glicose ($C_6H_{12}O_6$). Esses carboidratos podem ser interconvertidos entre si através de um intermediário enediol. A D-frutose cristalina anidra existe somente na forma β -D-frutopiranosídica, porém em solução aquosa pode existir em cinco formas tautoméricas, as quais se interconvertem na forma de acetona acíclica (Figura 7). A forma β -D-frutopiranosídica é a mais encontrada em solução aquosa, estando as duas formas furanosídicas também presentes em quantidades importantes. As outras duas formas tautoméricas restantes estão presentes em pequenas quantidades.⁷² Em 2016, foi sugerido por Flood e colaboradores⁷³ que a primeira fase de mutarrotação da D-frutose depois da dissolução dos cristais de β -D-frutopiranosose em água ocorre predominantemente uma interconversão β -piranosose- β -furanose e a mutarrotação subsequente envolve principalmente a interconversão α - β para as duas formas cíclicas.

Considerando alguns aspectos econômicos, a D-frutose tem vantagens sobre a sacarose. A doçura é superior em cerca de 200%, causa menos incremento na glicose plasmática e na resposta à insulina e seu uso tem sido defendido na dieta de diabéticos.⁷⁴ A D-frutose é um açúcar natural comumente encontrado no mel e nas frutas sempre associada à D-glicose e a sacarose em menor quantidade.

Outra importante fonte de D-frutose são os frutanos, que são polímeros da frutose sintetizados a partir da sacarose e se constituem nos principais componentes das suas respectivas reservas energéticas, produzidos por cerca de 15% das espécies de plantas, bactérias e fungos. Esses polímeros podem ser hidrolisados enzimaticamente ou quimicamente para produzir frutose e podem ser utilizados diretamente como adoçantes naturais em substituição a sacarose.⁷⁵

Os frutanos vegetais têm variadas estruturas e cadeias de diferentes tamanhos, variando 2 a 60 unidades.⁷⁶ Os frutanos do tipo inulina são carboidratos de reserva encontrados em alimentos comumente consumidos, como banana, alho, alho-poró, cebola, trigo, alcachofra, aspargo, cevada, tubérculo da dália, assim como na raiz da chicória, de onde são extraídos em escala industrial a partir da extração com água quente das raízes da chicória, seguida de refino e secagem por atomização.⁷⁷ Estruturalmente, são polímeros lineares de β -D-frutofuranose constituídas de resíduos de frutose unidas por unidades β -D-frutosila ($2 \rightarrow 1$) ligadas a uma unidade de sacarose (Figura 8). As enzimas intestinais humanas não são capazes de hidrolisar as ligações β ($2 \rightarrow 1$), fazendo com que esses polímeros cheguem intactos ao cólon, ocorrendo um aumento do volume das fezes e da frequência de evacuações, sendo assim incluídos na categoria de fibras alimentares.⁷⁸ A inulina é amplamente utilizada em alimentos processados como substituto de gordura, açúcar ou para conferir características desejáveis. Também há evidências que a inulina tem o potencial de eliminar espécies reativas de oxigênio que beneficiam as células epiteliais intestinais, melhorando seu ambiente redox.^{79,80} Esses frutanos estão disponíveis comercialmente como ingredientes alimentícios em forma de pó ou xarope, e possuem aplicação na formulação de diferentes tipos de produtos, buscando tanto a sua alegação como alimento

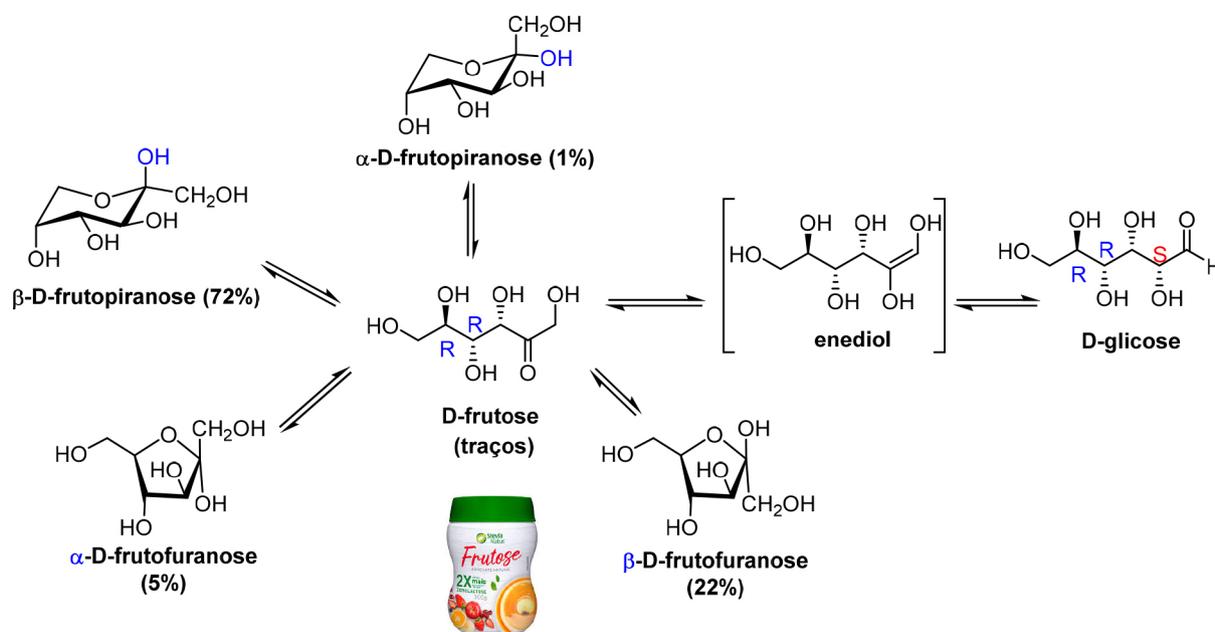


Figura 7. As estruturas da D-frutose em solução aquosa. Imagem do produto: adoçante à base de Frutose (Stevia Natus, Brasil)

funcional, quanto a melhoria de seu valor nutritivo e de suas propriedades sensoriais.

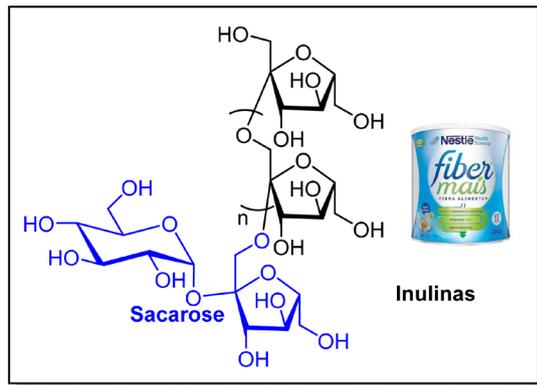


Figura 8. Estrutura da inulina. Imagem do produto: Fibra Alimentar Fiber mais (Nestlé, Brasil)

Para que a indústria baseada em biomassa possa alcançar a produção de uma variedade de matérias-primas para produção de combustíveis, produtos químicos valiosos e energia são necessários que essa biomassa seja convertida nas chamadas moléculas de plataforma, que precisam ter tecnologia de fácil preparação, multiplicidade de processos de transformação e produzidas em larga escala com recursos renováveis.⁸¹

A D-frutose é uma biomassa facilmente desidratada para formar o hidroximetilfurfural (5-HMF) e esse processo é atualmente considerado um dos mais promissores para o futuro de uma química sustentável baseada em biomassas. O 5-HMF é reagente com uma química muito versátil, de baixo custo de produção, sendo ideal para uso em síntese orgânica, com alta reatividade devido a presença de três centros funcionais - aldeído, grupo hidroximetil e um anel

furânico. Ele tem recebido destaque devido ao seu potencial como bloco de construção para gerar matéria-prima para síntese de compostos de química base, polímeros, solventes e combustíveis (Figura 9).^{82,83}

A D-tagatose é um monossacarídeo do tipo ceto-hexose e epímero da D-frutose no carbono C-4 (Figura 10). Sua forma cíclica de D-tagatose consiste principalmente no isômero α -D-tagato-2,6-piranosose (79%) dentre os tautômeros possíveis de serem formados em solução.⁸⁴ Esse carboidrato é um adoçante natural não cariogênico e com baixo índice glicêmico, pois passa pelo organismo sem ser absorvido.⁸⁵ Cerca de 90% mais doce do que a sacarose, a D-tagatose também é um agente umectante e estabilizante em formulações alimentícias, além de apresentar diversas propriedades biológicas,⁸⁶ como potencial para controlar o diabetes tipo 2 e auxiliar no tratamento da obesidade. No entanto, devido ao custo mais elevado esse edulcorante não tem sido usado em muitos produtos no Brasil. A D-tagatose ocorre naturalmente em algumas frutas, como maçãs, laranjas, abacaxis e está aprovado como adoçante pela ANVISA, sendo um adoçante de baixa caloria em alimentos processados e geralmente é misturada a outros adoçantes. Também atua como um aditivo em detergentes, cosméticos e formulações farmacêuticas. Esse monossacarídeo é produzido por biotransformação da D-galactose utilizando a enzima L-arabinose isomerase.^{87,88}

10. Xarope de Milho Rico em Frutose (HFCS)

Os xaropes de milho rico em frutose (HFCS, do inglês *high-fructose corn syrup*), também conhecidos como xarope de glicose-frutose, são adoçantes feitos a partir do amido de milho. Durante o processo, o amido de

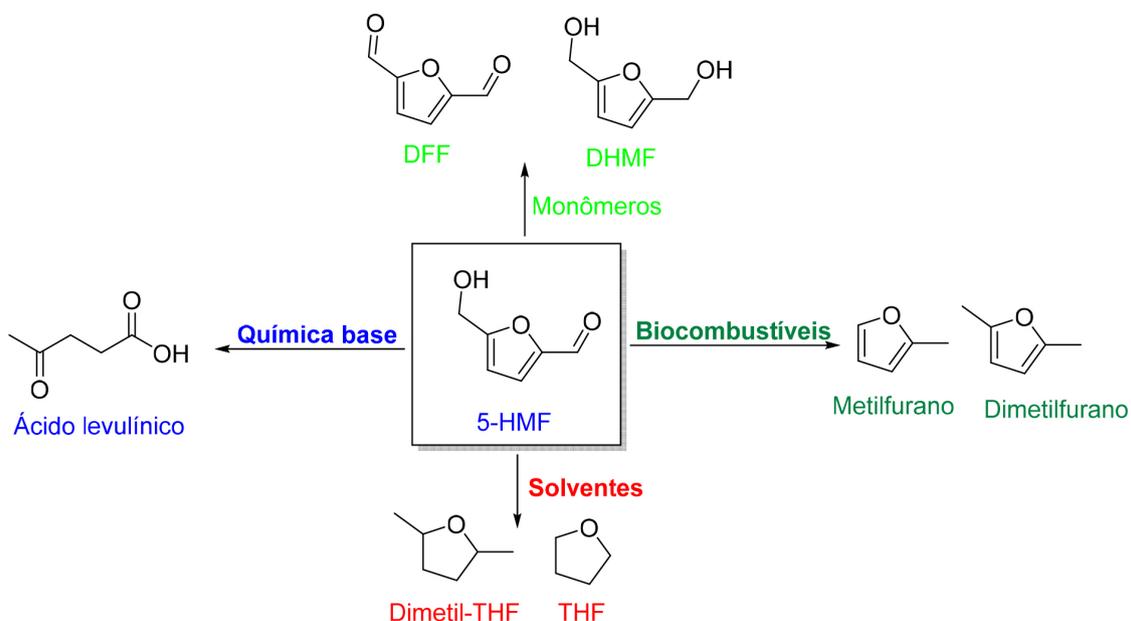


Figura 9. 5-HMF como blocos de construção para formação de compostos de química de base, monômeros (polímeros), solventes e biocombustíveis

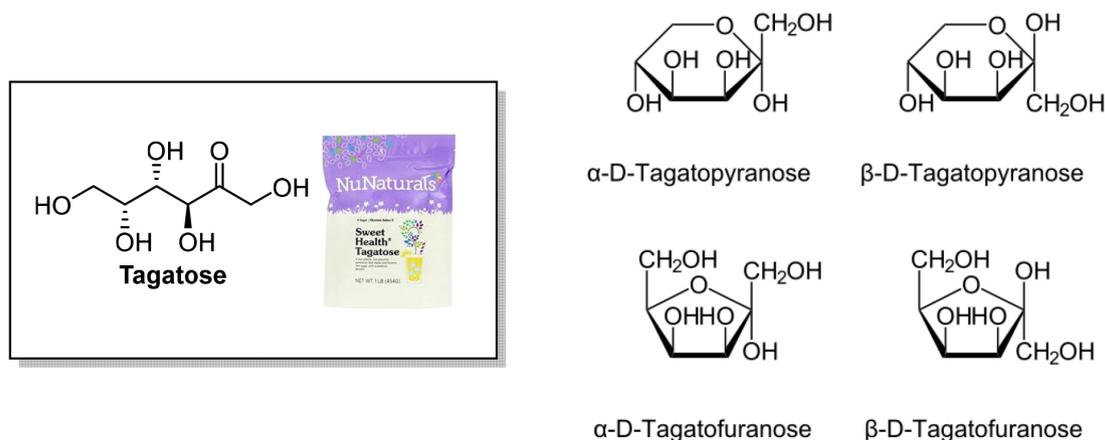


Figura 10. Estruturas possíveis da D-tagatose em solução aquosa. Imagem do produto: Tagatose Doce Saúde (NuNaturals)

milho é hidrolisado em glicose por enzimas específicas, α-amilase e glucoamilase, formando um xarope contendo principalmente glicose, e uma terceira enzima, a glicose isomerase, vai promover a isomerização da D-glicose em pH 7,5-8,2, formando o xarope de milho em frutose.

A concentração de D-frutose no HFCS é variável e existem três principais tipos, o HFCS-42, HFCS-55 e HFCS-90 (Figura 11). Os HFCS-55 e HFCS-90 são produzidos a partir da HFCS-42 e tem uma doçura relativamente inferior, diretamente atribuído ao menor teor de frutose.⁸⁹ Entretanto, o HFCS-90 é aproximadamente 1,7 vezes mais doce do que os outros HFCSs e a sacarose. Tais adoçantes são usados especialmente como substitutos da sacarose em refrigerantes. As principais vantagens estão na rápida dissolução em água e na fácil aromatização, para conferir um sabor doce de frutas a bebidas e alimentos.⁹⁰ É importante não confundir HFCS com xarope de milho com alta concentração D-glicose, D-frutose cristalina (exclusivamente frutose) ou açúcar invertido (D-glicose + D-frutose, na proporção 1:1), que é um xarope no qual a sacarose aquosa foi hidrolisada. Às vezes o HFCS-90 é descrito de forma errônea em alimentos como sendo natural e se refere a ele no rótulo como “frutose” ou “xarope de frutose”.

O HFCS foi comercializado pela primeira vez na década 1970 pela Clinton Corn Processing Company, juntamente com a Agência Japonesa de Ciência e Tecnologia Industrial. Atualmente, nos Estados Unidos, os HFCSs estão entre os adoçantes que mais substituíram a sacarose (açúcar de mesa) na indústria de alimentos e não são diferentes em

composição ou metabolismo de outros adoçantes como açúcar invertido, sacarose, mel e concentrados de suco de frutas. Eles estão presentes em muitas formulações alimentícias processadas e são classificadas como produtos de baixa caloria disponíveis nos supermercados, como bebidas de cola, molhos, temperos, geleias, pudins, iogurtes, biscoitos, pães, doces, bolos, chocolates e xaropes.

Quando os HFCSs foram introduzidos nos produtos alimentício e nas bebidas, acreditava-se que esses produtos teriam grandes vantagens em relação ao custo-benefício. Entretanto, entre as décadas de 1970 e 1990, o consumo de HFCS aumentou mais de 1000% e atualmente é responsável por 40% de todas as calorias adicionadas aos adoçantes, custando de 550 - 650,00 US\$/tonelada métrica.⁹¹ O aumento no uso de HFCSs foi acompanhado por um declínio no uso de sacarose durante o mesmo período, mas estudos posteriores revelaram que em curto prazo os HFCSs podiam causar diabetes tipo 2, aumento do peso corporal e, a longo prazo, aumento da gordura corporal e dos triglicerídeos.^{92,93}

11. Carboidratos e Adoçantes

Muitos produtos alimentícios comercializados nos supermercados recebem diversos aditivos coadjuvantes de tecnologia alimentar, com os corantes emulsionantes/emulsificantes, espessantes, espumantes, estabilizantes e adoçantes/edulcorantes. Com o crescimento da conscientização sobre hábitos alimentares saudáveis, as pessoas têm procurado reduzir a ingestão de alimentos

	D-glicose	D-frutose
Açúcar invertido	50%	50%
HFCS-42	58%	42%
HFCS-55	45%	55%
HFCS-90	10%	90%

Figura 11. Composição dos principais HFCSs. Imagem do produto: cobertura de chocolate (Hersheys)

que contêm ingredientes, cujo consumo excessivo é considerado prejudicial à saúde, dentre eles o açúcar - sacarose. Essa demanda levou a indústria de alimentos a investir em produtos substitutos da sacarose, resultando no desenvolvimento dos adoçantes, que normalmente possuem um poder de adoçar superior à sacarose, sendo necessária menor quantidade para se obter a mesma doçura, com ou sem calorias. Em geral, o uso de adoçantes destina-se a atender pessoas em condições metabólicas e fisiológicas específicas, como os diabéticos e pessoas em tratamento para perda de peso, propiciando sabor doce sem aumentar o aporte de calorias.

O uso de adoçantes ou edulcorantes de baixa caloria triplicou nas últimas décadas, pois a maioria dos consumidores preferem produtos sem açúcar (*low carb*) e baixas calorias (“zero cal”). Os edulcorantes, são substâncias naturais ou artificiais - diferentes dos açúcares - que conferem sabor doce aos alimentos e bebidas industrializadas com o objetivo de substituir total ou parcialmente o açúcar e ao mesmo tempo é isento de calorias. Entre os adoçantes naturais, extraídos de frutas, vegetais ou cereais, estão a glicose, frutose, sacarose, sorbitol, taumatina, xilitol, manitol e glicosídeos, como o esteviosídeo (Stevia). Já os adoçantes artificiais são produzidos em laboratório, como o acesulfame K, aspartame, ciclamato, sacarina e sucralose.⁹⁴

A ANVISA destaca que “os edulcorantes somente devem ser utilizados nos alimentos em que se faz necessária a

substituição parcial ou total do açúcar”, e que o rótulo dos produtos deve conter dizeres como “não contém açúcares”, “sem adição de açúcares” ou “reduzido em açúcares”. Eles são encontrados em milhares de produtos, desde bebidas, sobremesas, bolos, gomas de mascar e cremes dental. A substituição de açúcares nos alimentos mostra a necessidade de alimentos saudáveis cujos fabricantes atraem a atenção do consumidor com alegações nos rótulos como “sem açúcar”, “sem adição de açúcar” e “redução de calorias”. Há uma lista considerável de edulcorantes que são permitidos pela ANVISA, cujo poder adoçante em relação a sacarose já foi determinada (Tabela 2). Entretanto, existem limites máximos estabelecidos pela ANVISA para utilização em produtos e também para IDA destas substâncias, quando adicionadas às preparações culinárias ou bebidas no dia a dia.

Dentre os edulcorantes aprovados pela ANVISA destacam-se os poliálcoois sorbitol, manitol, xilitol, maltitol, lactitol e isomalt que são amplamente utilizados na indústria de alimentos como adoçantes (edulcorantes) e espessantes. Em produtos alimentícios comerciais, os poliálcoois de açúcar são frequentemente usados no lugar da sacarose.^{95,96} Alguns destes são naturais, com baixo teor calórico, que pode ser medido através da resposta glicêmica relativa (RGR) que é a percentagem glicêmica comparada com D-glicose ingerida oralmente.⁹⁷ Na Tabela 3 estão apresentados os poliálcoois derivados de mono e

Tabela 2. Edulcorantes aprovados no Brasil pela ANVISA

INS	Aditivo	INS	Aditivo
420	Sorbitol	955	Sucralose
421	Manitol	957	Taumatina
950	Acesulfame de potássio	960	Glicosídeos de esteviol
951	Aspartame	961	Neotame
952	Ácido ciclâmico (Ca e K)	965	Maltitol
953	Isomalt (isomaltitol)	966	Lactitol
954	Sacarina (Ca e K)	967	Xilitol

Tabela 3. Polióis derivados de mono e dissacarídeos e seus valores de RGR

Monossacarídeos	RGR
D-Glicose	100
D-Frutose	19
Tagatose	3
Monossacarídeos hidrogenados	
Xilitol	12
Sorbitol	9
Eritritol	~0
Manitol	~0
Dissacarídeos hidrogenados	
Maltitol	45
Isomalt	9
Lactitol	5

dissacarídeos que têm baixo teor calórico, com exceção do poliol maltitol.

O sorbitol é um carboidrato derivado da D-glicose por redução natural do grupo aldeído ou pode ser obtido industrialmente por redução da D-glicose através de uma reação de hidrogenação catalítica (Figura 11). Encontrado naturalmente em diversas frutas, o sorbitol tem seu poder adoçante 60% menor do que o da sacarose, além de não promover a formação de cáries nos dentes. Por produzir uma baixa resposta glicêmica é um adoçante de baixo valor calórico, e é utilizado em condimentos, chicletes sem açúcar, recobrimento de confeitos, creme dental, confecção de bolos, sorvetes, chicletes e adoçantes líquidos (zero-cal), doces, produtos cosméticos e dermatológicos. O sorbitol é a matéria-prima principal para a síntese industrial da vitamina C, que ocorre pelo Processo Reichstein, em cinco etapas.⁹⁸ A própria vitamina C, que é um composto abundante, pode servir de plataforma sintética para outros produtos.⁹⁹

O D-manitol é o poliálcool natural mais abundante na natureza com mesma configuração estereoquímica da D-manose. Em 2017 eram consumidos aproximadamente 150.000 t de manitol, que representa 11% do total de polióis consumidos.¹⁰⁰ Certas plantas, leveduras, algas, líquenes e fungos produzem grandes quantidades de D-manitol e muitas bactérias desenvolveram a capacidade de utilizar essa fonte natural de carbono e energia. Pode ser encontrado em diversos vegetais como beterraba, cebola, aipo, figo, azeitonas, exsudatos de árvores e algas marrons marinhas (10-20% manitol). Algumas plantas produzem secreções açucaradas e secas, produzidas por tecidos vegetais e que se cristaliza sobre o tronco após a picada de insetos. O maná, que origina o nome manose, é uma secreção originada do *Fraxinus ornus*, espécie de freixo da região mediterrânica cultivada desde há séculos na Sicília e Calábria, que contém entre 60 a 90% do manitol.^{101, 102}

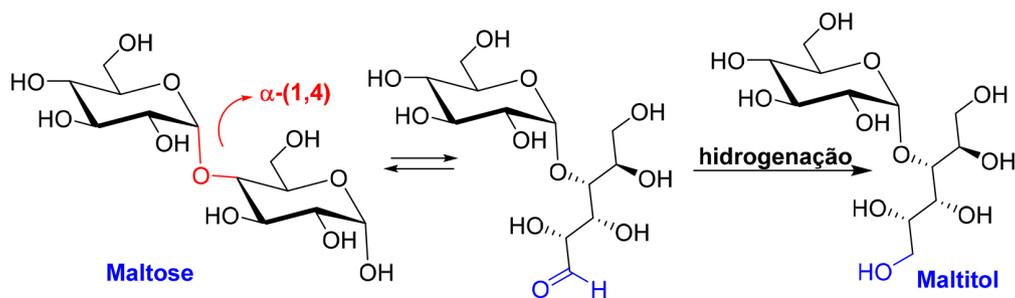
O D-manitol pode ser preparado por hidrogenação catalítica da D-frutose ou açúcar invertido sob alta pressão e por processo fermentativos utilizando diversas fontes como D-glicose, açúcar invertido e glicerol.¹⁰³ Várias bactérias, principalmente bactérias de ácido láctico heterofermentativas, também são capazes de produzir D-manitol quando cultivadas em meios específicos.¹⁰⁴

A resposta glicêmica relativa do D-manitol é nula, e ele pode ser usado em produto *light* ou *diet*, tendo muitas aplicações em diversos setores industriais como os de

alimentos, produtos farmacêuticos, medicina e química.¹⁰⁵ Na indústria alimentícia é um edulcorante com baixo valor calórico, uma vez que é absorvido apenas parcialmente no intestino delgado e a pouca quantidade absorvida não depende da insulina para que seja metabolizada.¹⁰⁶ O manitol é um diurético osmótico usado para terapia de intoxicação, mas também encontra aplicações medicinais como tratamento da hipertensão, em vários tipos de cirurgias e para prevenir insuficiência renal. Por ser uma matéria-prima de baixo custo, é um reagente bastante utilizado para diversos fins comerciais e também em síntese orgânica, na obtenção de análogos de produtos naturais complexos.¹⁰⁷

O xilitol é o poliálcool natural de cinco átomos de carbono com mesma configuração estereoquímica da D-xilose. É o adoçante encontrado nas fibras de muitos vegetais, incluindo milho, framboesa, ameixa, entre outros e também pode ser extraído de alguns tipos de cogumelo. Sua síntese ocorre através da hidrogenação catalítica da xilose e por método fermentativos utilizando leveduras modificadas metabolicamente, *Saccharomyces cerevisiae* ou *Candida*.¹⁰⁸ O xilitol é tão doce quanto a sacarose, porém cerca de 40% menos calórico, não é fermentável e oferece benefícios à saúde dos dentes, pois reduz a incidência de cáries dentárias por inibição do crescimento de *Streptococcus mutans*, agente causador da cárie.^{109,110}

O maltitol é um monossacarídeo-poliol natural, encontrado em pequenas quantidades em algumas frutas e vegetais, folhas de chicória e malte torrado, oriundo da redução do aldeído livre da maltose, ou açúcar de malte de cereais, que é um dissacarídeo redutor contendo duas unidades de D-glicose unidas por uma ligação glicosídica α -(1,4') (Esquema 4). É um substituto útil para a sacarose por ter sabor semelhante, bom índice de doçura, cerca de 90% em relação a sacarose, e menos calorias, 2,1 kcal/g.^{111,112} Do ponto de vista de propriedade para o processamento,¹¹³ é umectante, estabilizador, crioprotetor, redutor do ponto de congelamento, agente de volume para doces sem açúcar, chicletes, chocolates, sorvetes, iogurtes bebíveis, leites com sabor, assados, mousses, bolos, coberturas e cápsulas de gelatina e previne o escurecimento produtos de panificação. Pode ser encontrado nos supermercados em gomas de mascar e doces, misturado com sorbitol e xilitol, para criar uma sensação de resfriamento na boca. Apresenta boa capacidade hidratante para a pele quando usado em formulações farmacêuticas.



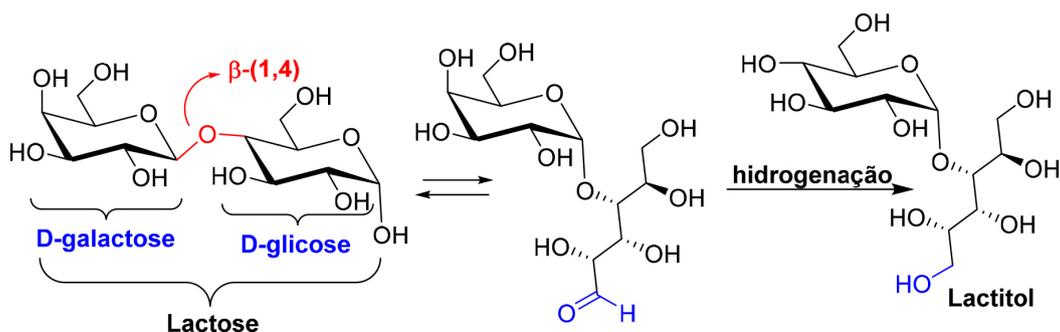
Esquema 4. Hidrogenação da maltose na produção de maltitol

O edulcorante lactitol é um composto sintético, produzido pela redução do grupo aldeído da unidade da D-glicose presente na lactose (Esquema 5),¹¹⁴ um dissacarídeo presente apenas no leite de mamíferos. A lactose é formada por unidades dos monossacarídeo D-galactose e D-glicose unidos por uma ligação glicosídica $\beta(1,4')$ de C-1 da galactose com C-4 da glicose. É muito comum encontrar-se pessoas intolerantes à lactose do leite, uma vez que não possuem a enzima lactase para degradar a lactose. O lactitol elimina o problema da intolerância à lactose. Além de fornecer doçura, o lactitol tem baixo valor calórico e apresenta diversas aplicações na área de alimentos, laticínios e produtos farmacêuticos. O lactitol também é utilizado na formulação de produtos de panificação, chocolate, doces, confeitaria, sobremesa e goma de mascar.¹¹⁵ Também pode ser usado como material de partida em síntese orgânica na preparação de surfactantes, emulsificantes, polímeros¹¹⁶ e hidrogéis;¹¹⁷ é um medicamento aprovado pela ANVISA para o tratamento e prevenção da encefalopatia hepática e tratamento sintomático do êxtase intestinal.¹¹⁸

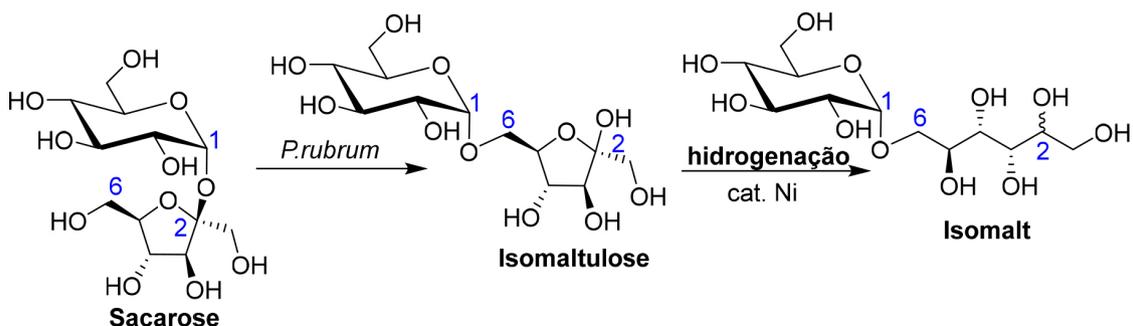
Um adoçante alternativo, pouco calórico, de baixo potencial cariogênico e baixa taxa de fermentação por micro-organismos intestinais é a isomaltulose (O- α -D-glicopiranosil-1-6- β -frutofuranose), também chamada Palatinose® e Lylose®. Esse composto é um isômero da sacarose, porém é menos doce, cerca de 50%, e pode ser consumido por pessoas com diabetes. Sua produção tem aumentado consideravelmente, pois pode produzir o isomalt, também chamado isomalte ou Palatinit® (INS 973), um edulcorante que pode substituir a sacarose, HFC, xarope de D-glicose e D-frutose. A produção do isomalt

ocorre a partir da sacarose em duas etapas reacionais (Esquema 6). Primeiro ocorre a transglicosilação da posição 2 para a posição 6 na unidade D-frutose da sacarose por reação microbiológica com *Protaminobacter rubrum* formando o ceto-dissacarídeo redutor isomaltulose (Palatinose®), seguida de hidrogenação catalítica seletiva em C-2 na isomaltulose formando o isomalt que é uma mistura aproximadamente equimolar de D-glucopiranosil- α -D-manitol e D-glucopiranosil- α -D-sorbitol.^{119,120} O isomalt é o único polioliol produzido a partir da sacarose por redução da unidade D-frutose. A Resolução da Diretoria Colegiada da ANVISA - RDC N° 239, de 26 de julho de 2018 aprova o uso o isomalt como edulcorante, agente de massa, espessante e, adicionalmente, tem baixa resposta glicêmica com redução de calorias. O isomalt tem um sabor doce puro semelhante à sacarose sem qualquer gosto residual sendo útil para a formulação de produtos de panificação sem açúcar.¹²¹ Com essa vasta possibilidades de aplicações existem muitos produtos disponíveis nos supermercados para consumo. O valor do mercado global de isomalt ficou em torno de US \$ 900 milhões em 2020 e há indicação de crescimento para US \$1,6 bilhões em 2030.¹²²

Ao escolher um edulcorante de baixa caloria, deve-se considerar que muitos substitutos do açúcar não são resistentes à altas temperaturas e, além disso, são caros e com baixa disponibilidade. Os adoçantes naturais de baixa caloria podem permitir que as pessoas com diabetes desfrutem de alimentos e bebidas doces sem afetar os níveis de açúcar no sangue, como o xarope de milho com alto teor de frutose que produz um sabor doce comparável ao do açúcar, porém sem calorias comparáveis.¹²³



Esquema 5. Hidrogenação da lactose na obtenção do Lactitol



Esquema 6. Edulcorantes a base de dissacarídeos parcialmente reduzidos

12. Quitina e Quitosana

A quitina é o segundo polissacarídeo natural mais abundante na natureza, ficando atrás apenas da celulose, e tem a vantagem de apresentar taxa de reposição duas vezes superior. Na natureza, a quitina é encontrada na parede celular dos fungos e no exoesqueleto dos artrópodes, e suas funções estão relacionadas com formação de estruturas e proteção. Esse polissacarídeo é constituído por uma longa cadeia de *N*-acetil- β -D-glicosamina (2-acetamido-2-desoxi-D-glicopiranoose), unidas entre si por seus carbonos 1 e 4 em ligações glicosídicas $\beta(1,4')$. Comparando a sua estrutura com a da celulose observa-se a mesma distribuição e arranjos espaciais dos anéis pirâmicos, porém o grupo hidroxila do carbono C-2 foi substituído por um grupo amino acetilado. A quitina também não é digerida pelos animais vertebrados devido a ligação $\beta(1,4')$.¹²⁴ A quitina é uma molécula biodegradável que se degrada com o tempo e, portanto, têm várias aplicações industriais, como fios cirúrgicos e ligantes para tintas e colas. Ela pode inchar na presença de água e se for vigorosamente agitada forma um hidrogel. Mesmo sem ser hidrolisada quando consumida, a quitina é uma excelente fonte de fibra insolúvel para a flora intestinal e auxilia o crescimento de bactérias boas no corpo humano.

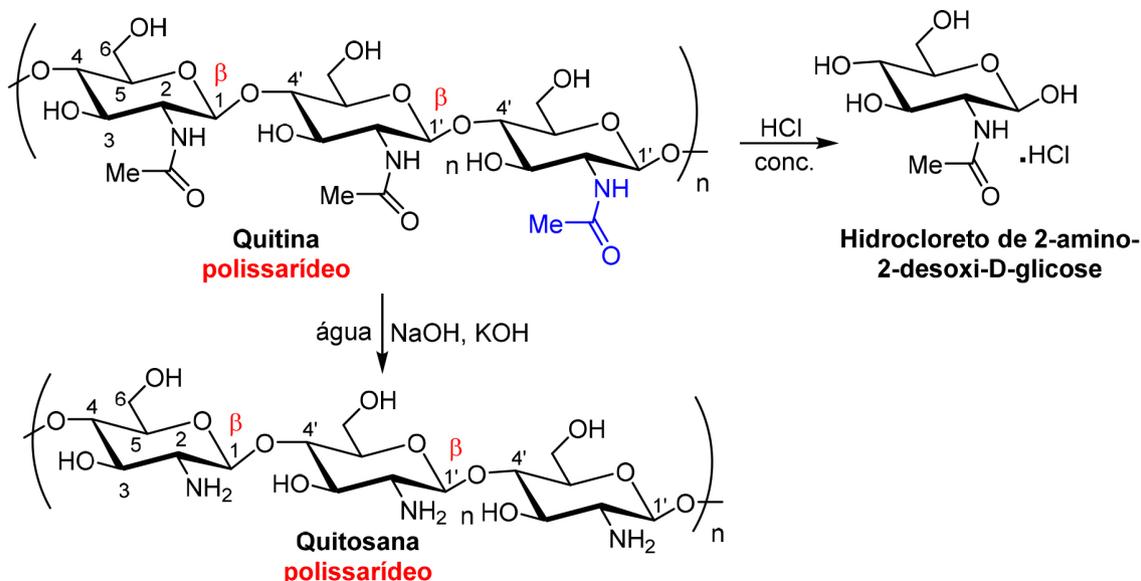
Duas substâncias podem ser obtidas a partir da quitina e apresentam um enorme potencial econômico, o hidrocloreto de 2-amino-2-desoxi-D-glicose e a quitosana (Esquema 7). O primeiro pode ser facilmente hidrolisado com ácidos concentrados, como ácido clorídrico e ácido sulfúrico. Já o outro composto, que é útil para fins industriais humanos, é um biopolímero obtido através da desacetilação da quitina em condições alcalinas.¹²⁵

As principais aplicações da quitosana nas indústrias incluem a recuperação de resíduos de descartes, preservação de alimentos da deterioração microbiana, clarificação de

água, purificação de água e desacidificação de sucos de frutas. A quitosana é um emulsificante capaz de estabilizar emulsões do tipo O/A, pois dificulta a difusão das partículas dispersas e reduz a taxa de agregação das gotas, podendo também ser aplicada como suporte cromatográfico, tratamento de obesidade, removedor de metais, floculante, coagulante, bandagens médicas, queimadura de pele, lentes de contato, umectante para cosméticos, tratamento de papel, papel fotográfico, membranas para osmose reversa, controle de liberação de agroquímicos e estabilizante de cor. As pesquisas indicam que os filmes de quitosana tem ação antimicrobiana e antifúngica, característica importantes para o prolongamento da vida útil de alimentos. Os revestimentos de filme à base de quitosana estendem efetivamente a vida útil de cenouras, tomates, pepinos, bananas, maçãs e, também, peixes e carnes.^{126,127,128}

13. Conclusão

Nos últimos anos, tem havido um interesse crescente no uso de carboidratos calóricos e não-calóricos na preparação de produtos alimentícios devido às suas excelentes propriedades, especialmente as que podem ser exploradas pelas indústrias alimentícias. Esse interesse também surge por causa de seus inúmeros potenciais benefícios para a saúde. Alguns deles são não cariogênicos (não contêm açúcar para os dentes), são pouco glicêmicos (potencialmente úteis no diabetes e doenças cardiovasculares), têm baixo consumo de energia, são pouco insulínemicos, são pouco digestíveis e carboidratos osmóticos (hidratantes do cólon, laxantes e purificadores). Este artigo de difusão científica tem como foco principal alunos, professores e consumidores sobre as características positivas e negativas dos carboidratos que estão presentes nos produtos dos supermercados. Existem poucas informações nos produtos que possam orientar



Esquema 7. Quitina e produtos derivados

os consumidores e ao longo do texto explorou-se várias questões sobre as propriedades físico-químicas, produção, características estruturais e questões relativa aos marcos regulatórios da ANVISA. Os carboidratos são as substâncias questão em maior abundância nos supermercados, seja na forma natural em frutas e vegetais, produtos isolados (sacarose) e em produtos para higiene pessoal e formulações alimentícias.

Referências Bibliográficas

- Sinnott, M. L.; *Carbohydrate Chemistry and Biochemistry: Structure and Mechanism*, RSC Publishing: UK, 2007.
- McNaught, A. D.; Nomenclature of carbohydrates. *Carbohydrate Research* **1997**, 297, 7. [Crossref]
- Ferreira, V. F.; da Silva, F. C.; Ferreira, P. G.; Carboidratos como fonte de compostos para a indústria de química fina. *Química Nova* **2013**, 36, 1514. [Crossref]
- Ferrier, R. J.; Collins, P. M.; *Monosaccharide*, John Wiley: Chichester, 1995.
- David, S.; *The Molecular and Supramolecular Chemistry of Carbohydrate*, Oxford University Press: Oxford, 1997.
- Shintani, T.; Food Industrial Production of Monosaccharides Using Microbial, Enzymatic, and Chemical Methods. *Fermentation* **2019**, 5, 47. [Crossref]
- Stick, R. V.; *The Essential Molecules of Life*, 2a. ed., Elsevier Ltd.: New York, 2009.
- Gottlieb, O. R.; Kaplan, M. A. C.; Borin, M. R. M.; *Biodiversidade -Um Enfoque Químico-Biológico*, Editora UFRJ: Rio de Janeiro, 1996.
- Balandrin, M. F.; Klocke, J. A.; Wurtele, E. V.; Bollinger, W. H.; Natural plant chemicals: sources of industrial and medicinal materials. *Science* **1985**, 228, 1154. [Crossref]
- Whistler, R.; Zysk, J. R.; *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons: New York, 1978.
- BeMiller, J. N.; *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists*, 3a. ed., Elsevier Inc.: UK, 2019.
- Witczak, Z. J. Em *Carbohydrate Synthons in Natural Products Chemistry*; Witczak, Z. J.; Tatsuta, K., eds.; ACS Symposium Series 841: San Francisco, 2003.
- Lichtenthaler, F. W.; Peters, S.; Carbohydrates as green raw materials for the chemical industry. *Comptes Rendus Chimie* **2004**, 7, 65. [Crossref]
- Pinheiro, S.; Ferreira, V. F.; Abordagens em Síntese Assimétrica. *Química Nova* **1998**, 21, 312. [Crossref]
- Ferreira, V. F.; Carboidratos Abundantes em Síntese Orgânica. *Química Nova* **1995**, 18, 267. [Link]
- Ferreira, V. F.; da Rocha, D. R.; da Silva, F. C.; Potencialidades e oportunidades na química da sacarose e outros açúcares; *Química Nova* **2009**, 32, 623. [Crossref]
- Fontvieille, A. M.; Faurion, A.; Helal, I.; Rizkalla, S. W.; Falgon, S.; Letanoux, M.; Tchobroutsky, G.; Slama, G.; Relative Sweetness of Fructose Compared with Sucrose in Healthy and Diabetic Subjects. *Diabetes Care* **1989**, 12, 481. [Crossref]
- Schwartz, D.; Whistler, R. L.; Em *Starch, Third Edition Chemistry and Technology*; BeMiller, J. N.; Whistler, R. L., eds.; Academic Press: Amsterdam, 2009.
- Pérez, S.; Bertoft, E.; The molecular structure of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: a comprehensive review. *Starch* **2010**, 62, 389. [Crossref]
- Moreira, I.; de Oliveira, G. C.; Furlan, A. C.; Patricio, V. M. I.; Junior, M. M.; Utilização da Farinha Pré-gelatinizada de Milho na Alimentação de Leitões na Fase de Creche. Digestibilidade e Desempenho. *Revista Brasileira de Zootecnia* **2001**, 30, 440. [Crossref]
- Jedvert, K.; Heinze, T.; Cellulose modification and shaping – a review. *Journal of Polymer Engineering* **2017**, 37, 845. [Crossref]
- Diário do Comércio. Disponível em: <<https://diariodocomercio.com.br/economia/producao-de-celulose-no-brasil-tem-queda-de-72-e-atinge-16-mi-de-toneladas>>. Acesso em: 22 fevereiro 2020.
- Hubbe, M. A.; Ayoub, A.; Daystar, J. S.; Venditti, R. A.; Pawlak, J. J.; Enhanced Absorbent Products Incorporating Cellulose and Its Derivatives: A Review. *BioResources* **2013**, 8, 6556. [Link]
- Lizundia, E.; Costa, C. M.; Alves, R.; Lanceros-Méndez, S.; Cellulose and its derivatives for lithium ion battery separators: A review on the processing methods and properties. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* **2020**, 1, 100001. [Crossref]
- Ferreira, V. F.; Paiva, L. M. C.; Esteves, A. M. L.; A New Process to Obtaining Inverted Sugar Using Carbon Dioxide. *Starch* **1986**, 38, 173. [Crossref]
- Ferreira, V. F.; Nakamura, T.; Nakamura, L. M. K.; Paiva, L. M. C.; Ferreira, C. M.; Novos Métodos de Hidrólise da Sacarose. *Revista de Química Industrial* **1989**, 668, 13. [Crossref]
- Strong, L. A. G.; *The Story of Sugar*, Academic Press: Londres, 1954.
- Houdier, S.; Pérez, S.; Assessing Sucrose Hydroxyl Acidities Through Semiempirical Calculations. *Journal of Carbohydrate Chemistry* **1995**, 14, 1117. [Crossref]
- Tomich, D. W.; *Slavery in the Circuit of Sugar, Second Edition*, Suny Press: New York, 2016.
- Rodrigues, J. A. R.; Do engenho à biorrefinaria. A usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis. *Química Nova* **2011**, 34, 1242. [Crossref]
- Lee, C. K.; *Sucrochemistry*, ACS Symposium Series, 1977.
- Khan, R.; Chemistry and New Uses of Sucrose: How Important? *Pure and Applied Chemistry* **1984**, 56, 833. [Link]
- Total sugar production worldwide from 2009/2010 to 2019/2020 (in million metric tons). Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/249679/total-production-of-sugar-worldwide/>>. Acesso em: 23 abril 2021.
- Snyder, C. H.; *The Extraordinary Chemistry of Ordinary Things*; 2a. ed., John Wiley & Sons: USA, 1995.
- Ferreira, V. F.; Silva, F. C., Perrone, C. C.; Sacarose no Laboratório de Química Orgânica de Graduação. *Química Nova* **2001**, 24, 905. [Crossref]
- Szűts, A.; Szabó-Révész, P.; Sucrose esters as natural surfactants in drug delivery systems-A mini-review. *International Journal of Pharmaceutics* **2012**, 433, 1. [Crossref]

37. Teng, Y.; Stewart, S. G.; Hai, Y.-W.; Li, X.; Banwell, M. G.; Lan, P.; Sucrose fatty acid esters: synthesis, emulsifying capacities, biological activities and structure-property profiles. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **2020**, *4*, 1. [Crossref]
38. Boscolo, M.; Sucroquímica: Síntese e Potencialidades de Aplicações de Alguns Derivados Químicos da Sacarose. *Química Nova* **2003**, *26*, 906-912. [Crossref]
39. Sucrose Esters Market worth \$106 million by 2025. Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/sucrose-esters.asp>>. Acesso em: 14 março 2021.
40. Sítio da ANVISA. Disponível em: <<https://www.gov.br/anvisa/pt-br/composicao/diretoria-colegiada/reunioes-da-diretoria/votos/2020/rop-10.2020/item-2-4-1-voto54-2020-dire1.pdf>>. Acesso em: 23 abril 2021.
41. Sítio Mitsubishi Chemicals. 2019. Sucrose fatty acid ester “Ryoto™ Sugar Ester”. Disponível em: <https://www.m-chemical.co.jp/en/products/departments/group/mfc/product/1201443_7739.html>. Acesso em: 14 março 2021.
42. Chuyen, N. V.; Em *Process-Induced Chemical Changes in Food*; Shahidi, F.; Ho, C. T.; van Chuyen, N., eds.; Springer: Boston, 1998, cap. 18. [Crossref]
43. Sítio Transparency Market Research. Disponível em: <<https://www.transparencymarketresearch.com/pressrelease/fatty-acid-esters-market.htm>>. Acesso em: 23 abril 2021.
44. Marshall, D. L.; Bullerman, L. B.; Antimicrobial Activity of Sucrose Fatty Acid Ester Emulsifiers. *Journal of Food Science* **1986**, *51*, 468. [Crossref]
45. Chang, S. W.; Shaw, J. F.; Biocatalysis for the production of carbohydrate esters. *New Biotechnology* **2009**, *26*, 109. [Crossref]
46. Franssen, M. C. R.; Steunenberg, P.; Scott, E. L.; Zuilhof, H.; Sanders, J. P. M.; Immobilised enzymes in biorenewables production. *Chemical Society Reviews* **2013**, *42*, 6491. [Crossref]
47. Cruces, M. A.; Plou, F. J.; Ferrer, M.; Bernabé, M.; Ballesteros, A.; Improved synthesis of sucrose fatty acid monoesters. *Journal of the American Oil Chemists' Society* **2001**, *78*, 541. [Crossref]
48. Plat, T.; Linhardt, R. J.; Syntheses and applications of sucrose-based esters. *Journal of Surfactants and Detergents* **2001**, *4*, 415. [Crossref]
49. Molinier, V.; Wisniewski, K.; Bouchu, A.; Fitremann, J.; Queneau, Y.; Transesterification of Sucrose in Organic Medium: Study of Acyl Group Migrations. *Journal of Carbohydrate Chemistry* **2003**, *22*, 657. [Crossref]
50. Olestra - Fat Substitute Approved by FDA in January 1996. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/17244157.pdf>> acessada em 15/03/2021>. Acesso em: 23 abril 2021.
51. Gordon, D.; Does olestra stand a fat chance? *Gastroenterology* **1998**, *115*, 3. [Crossref]
52. Thomson A. B.; Hunt, R. H.; Zorich, N. L.; Review article: olestra and its gastrointestinal safety. *Alimentary Pharmacology and Therapeutics* **1998**, *12*, 1185. [Crossref]
53. Bimal, C.; Guonong, Z.; Olestra: A Solution to Food Fat? *Food Reviews International* **2006**, *22*, 245. [Crossref]
54. AlDeeb, O. A. A.; Mahgoub, H.; Foda, N. H.; Em *Profiles of Drug Substances, Excipients, and Related Methodology*, Elsevier Inc., 2013, cap.10. [Crossref]
55. Jones, J. D.; Hacking, A. J.; Cheetham, P. S.; Biological method for protection of 6-position of sucrose and its use in synthesis of disaccharide high-intensity sweetener. *Journal of Biotechnology and Bioengineering* **1992**, *39*, 203. [Crossref]
56. Bennett, C.; Dordick, J. S.; Hacking, A. J.; Cheetham, P. S.; Biocatalytic synthesis of disaccharide high-intensity sweetener sucralose via a tetrachlororaffinose intermediate. *Journal of Biotechnology and Bioengineering* **1992**, *39*, 211. [Crossref]
57. Luo, Y.; Xu, L.; Sun, X.; Synthesis of Strong Sweetener Sucralose. *Modern Applied Science* **2008**, *2*, 1913. [Link]
58. Schiffman, S. S.; Rother, K. I.; Sucralose, a synthetic organochlorine sweetener: overview of biological issues. *The Journal of Toxicology and Environmental Health: Part B, Critical Reviews* **2013**, *16*, 399. [Crossref]
59. Goldsmith, L. A.; Merkel, C. M.; Em *Alternative Sweeteners*; Nabors L. O., ed.; 4a. ed., CRC Press: Boca Raton, 2012.
60. de Oliveira, D.; de Menezes, M.; Catharino, R.; Thermal degradation of sucralose: a combination of analytical methods to determine stability and chlorinated byproducts. *Scientific Reports* **2015**, *5*, 9598. [Crossref]
61. Datta, R.; Tsai, S. P.; Bonsignore, P.; Moon, S. H.; Frank, J. R.; Technological and economic potential of poly (lactic acid) and lactic acid derivatives. *FEMS Microbiology Reviews* **1995**, *16*, 221. [Crossref]
62. Ameen, S. M.; Caruso, G.; *Lactic Acid in the Food Industry*, Springer: Palermo, 2017. [Crossref]
63. Carr, F. J.; Chill, D.; Maida, N.; The lactic acid bacteria: a literature survey. *Critical Reviews in Microbiology* **2002**, *28*, 281. [Crossref]
64. John, R. P.; Nampoothiri, K. M.; Pandey, A.; Fermentative production of lactic acid from biomass: an overview on process developments and future perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology* **2007**, *74*, 524. [Crossref]
65. Grewal, H. S.; Kalra, K. L.; Fungal production of citric acid. *Biotechnology Advances* **1995**, *13*, 209. [Crossref]
66. Aplicações do ácido cítrico na indústria de alimentos. *Food Ingredients Brasil* **2014**, *30*, 43. [Link]
67. Apelblat, A.; *Citric Acid*, Springer International Publishing: New York, 2014. [Crossref]
68. Soccol, C. R.; Vandenberghe, L. P. S.; Rodrigues, C.; Pandey, A.; New Perspectives for Citric Acid Production and Application. *Food Technology and Biotechnology* **2006**, *44*, 141. [Link]
69. Silva, R. O.; Freitas Filho, J. R.; Freitas, J. C. R.; D-Glicose, uma Biomolécula Fascinante: História, Propriedades, Produção e Aplicação. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 875. [Crossref]
70. Stick, R. V.; *Carbohydrates, The Sweet Molecules of Life*, Academic Press: New York, 2001.
71. Boons, G.-J.; Hale, K. J.; *Organic synthesis with carbohydrates*. Sheffield Academic Press: UK, 2000.
72. Cockman; Kubler, M. D. G.; Oswald, A. S.; Wilson, L.; *Carbohydrate Chemistry and Biochemistry*, vol 6, 1987.
73. Flood, A. E.; Johns, M. R.; White, E. T.; Mutarotation of D-fructose in aqueous-ethanolic solutions and its influence on crystallisation. *Carbohydrate Research* **1996**, *288*, 45. [Crossref]
74. White J. S.; Em *Alternative Sweeteners*; Nabors, L. O., ed.; 4a. ed., CRC Press: Boca Raton, 2012.

75. Aidoo, R. P.; Afoakwa, E. O.; Dewettinck, K.; Optimization of inulin and polydextrose mixtures as sucrose replacers during sugar-free chocolate manufacture - rheological, microstructure and physical quality characteristics. *Journal of Food Engineering* **2014**, *126*, 35. [[Crossref](#)]
76. Flamm, G.; Glinsmann, W.; Kritchevsky, D.; Prosky, L.; Roberfroid, M.; Inulin and oligofructose as dietary fiber: a review of the evidence. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **2001**, *41*, 353. [[Crossref](#)]
77. Apolinario, A. C.; Damasceno, B. P. L.; Beltrao, N. E. M.; Pessoa, A.; Converti, A.; da Silva, J. A.; Inulin-type fructans: a review on different aspects of biochemical and pharmaceutical technology. *Carbohydrate Polymer* **2014**, *101*, 368. [[Crossref](#)]
78. Shoaib, M.; Shehzad, A.; Omar, M.; Rakha, A.; Raza, H.; Sharif, H. R.; Ansari, S. A.; Niazi, S.; Inulin: Properties, health benefits and food applications. *Carbohydrate Polymers* **2016**, *147*, 444. [[Crossref](#)]
79. Franco-Robles, E.; López, M. G.; Implication of Fructans in Health: Immunomodulatory and Antioxidant Mechanisms. *The Scientific World Journal* **2015**, *1*. [[Crossref](#)]
80. Verspreet, J.; Dornez, E.; Van den Ende, W.; Delcour, J. A.; Courtin, C. M.; Cereal grain fructans: Structure, variability and potential health effects. *Trends in Food Science & Technology* **2015**, *43*, 32. [[Crossref](#)]
81. Serrano-Ruiz, J. C.; Luque, R.; Sepúlveda-Escribano, A.; Transformations of biomass-derived platform molecules: from high added-value chemicals to fuels via aqueous-phase processing. *Chemical Society Reviews* **2011**, *40*, 5266. [[Crossref](#)]
82. Galkin, K. I.; Ananikov, V. P.; When Will 5-Hydroxymethylfurfural, the Sleeping Giant” of Sustainable Chemistry, Awaken? *ChemSusChem* **2019**, *12*, 2976. [[Crossref](#)]
83. Rosatella, A. A.; Simeonov, S. P.; Frade, R. F. M.; Afonso, C. A. M.; 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) as a building block platform: Biological properties, synthesis and synthetic applications. *Green Chemistry* **2011**, *13*, 754. [[Crossref](#)]
84. Köpper, S.; Freimund, S.; The composition of keto aldoses in aqueous solution as determined by NMR spectroscopy. *Helvetica Chimica Acta* **2003**, *86*, 827. [[Crossref](#)]
85. Lærke, H. N.; Jensen, B. B.; D-Tagatose has low small intestinal digestibility but high large intestinal fermentability in pigs. *The Journal of Nutrition* **1999**, *129*, 1002. [[Crossref](#)]
86. Roy, S.; Chikkerur, J.; Roy, S. C.; Dhali, A.; Kolte, A. P.; Sridhar, M.; Samanta, A. K.; Tagatose as a Potential Nutraceutical: Production, Properties, Biological Roles, and Applications. *Journal of Food Science* **2018**, *83*, 2699. [[Crossref](#)]
87. Oh, D.-K.; Tagatose: properties, applications, and biotechnological processes. *Applied Microbiology and Biotechnology* **2007**, *76*, 1. [[Crossref](#)]
88. Cheetham, P. S. J.; Wootton, A. N.; Bioconversion of d-galactose into D-tagatose. *Enzyme and Microbial Technology* **1993**, *15*, 105. [[Crossref](#)]
89. White, J. S.; Em *Fructose, High Fructose Corn Syrup, Sucrose and Health*; Rippe, J. M., ed.; Springer Science: New York, 2014. [[Crossref](#)]
90. White, J. S.; Straight talk about high-fructose corn syrup: what it is and what it ain't. *The American Journal of Clinical Nutrition* **2008**, *88*, 1716S. [[Crossref](#)]
91. Parker, K.; Salas, M.; Nwosu, V. C.; High fructose corn syrup: Production, uses and public health concerns. *Biotechnology and Molecular Biology Review* **2010**, *5*, 71. [[Crossref](#)]
92. Goran, M. I.; Ulijaszek, S. J.; Ventura, E. E.; High fructose corn syrup and diabetes prevalence: A global perspective. *Global Public Health* **2013**, *8*, 55. [[Crossref](#)]
93. Bocarsly, M. E.; Powell, E. S.; Avena, N. M.; Hoebel, B. G.; High-fructose corn syrup causes characteristics of obesity in rats: Increased body weight, body fat and triglyceride levels. *Pharmacology Biochemistry and Behavior* **2010**, *97*, 101. [[Crossref](#)]
94. Bakal, A. I.; Em *Alternative Sweeteners*; Nabors, L. O., ed.; Marcel Dekker: Basel, 2001.
95. Awuchi, C. G.; Echeta, C. K.; Current developments in sugar alcohols: chemistry, nutrition, and health concerns of sorbitol, xylitol, glycerol, arabitol, inositol, maltitol, and lactitol. *International Journal of Advanced Academic Research* **2019**, *5*, 1. [[Link](#)]
96. Awuchi, C. G.; Sugar Alcohols: Chemistry, Production, Health Concerns & Nutritional Importance of Mannitol, Sorbitol, Xylitol, and Erythritol. *International Journal of Advanced Academic Research* **2017**, *3*, 31. [[Link](#)]
97. Livesey, G.; Em *Sweeteners and Sugar Alternatives in Food Technology*; O'Donnell, K.; Kearsley, M. W., eds.; 2a. ed., John Wiley & Sons, Ltd.: UK, 2012.
98. Reichstein, T.; Grussner, A.; Productive synthesis of l-ascorbic acid, vitamin C. *Helvetica Chimica Acta* **1934**, *17*, 311. [[Crossref](#)]
99. Tripathi, R. P.; Singh, B.; Bisht, S. S.; Pandey, J.; L-Ascorbic Acid in Organic Synthesis: An Overview. *Current Organic Chemistry* **2009**, *13*, 99-122. [[Crossref](#)]
100. Dai, Y.; Meng, Q.; Mu, W.; Zhang, T.; Recent advances in the applications and biotechnological production of mannitol. *Journal of Functional Foods* **2017**, *36*, 404. [[Crossref](#)]
101. Horn, S. J.; Aasen, I. M.; Østgaard, K.; Ethanol production from seaweed extract. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* **2000**, *25*, 249. [[Crossref](#)]
102. Costa, A. F.; *Farmacognosia*, 5a. ed., Fundação Calouste Gulbenkian: Lisboa, 2002.
103. Tomaszewska, L.; Rywińska, A.; Gładkowski, W.; Production of erythritol and mannitol by *Yarrowia lipolytica* yeast in media containing glycerol. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* **2021**, *39*, 1333. [[Crossref](#)]
104. Ortiz, M. E.; Bleckwedel, J.; Raya, R. R.; Mozzi, F.; Biotechnological and in situ food production of polyols by lactic acid bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology* **2013**, *97*, 4713. [[Crossref](#)]
105. Soetaert, W.; Vanhooren, P. T.; Vandamme, E. J.; Em *Carbohydrate Biotechnology Protocols. Methods in Biotechnology™*; Bucke, C., eds., Humana Press, 1999. [[Crossref](#)]
106. Deutscher, J.; Bouraoui, H.; Derkaoui, M.; Joyet, P.; Em: *Mannitol chemistry, uses and potential side effects*; Fubini, P., ed.; Nova Science Publishers, Inc: New York, 2013.
107. de Oliveira, P. S. M.; Ferreira, V. F.; de Souza, M. V. M.; Utilização do D-manitol em síntese orgânica. *Química Nova* **2009**, *32*, 441. [[Crossref](#)]

108. Granström, T. B.; Izumori, K.; Leisola, M.; A rare sugar xylitol. Part II: biotechnological production and future applications of xylitol. *Applied Microbiology and Biotechnology* **2007**, *74*, 273. [[Crossref](#)]
109. Rédua, R. B.; Lorenzoni, B.; Filho, A. V.; Laurente, R. L.; Existe justificativa para o uso do xilitol na prevenção da cárie? Uma revisão de literatura. *Full Dentistry in Science* **2019**, *10*, 128. [[Crossref](#)]
110. Mussatto, S. I.; Roberto, I. C.; Xilitol: edulcorante com efeitos benéficos para a saúde humana. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas* **2002**, *38*, 401. [[Crossref](#)]
111. Oku, T.; Hongo, R.; Nakamura, S.; Suppressive effect of cellulose on osmotic diarrhea caused by maltitol in healthy female subjects. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology* **2008**, *54*, 309. [[Crossref](#)]
112. Respondek, F.; Hilpipre, C.; Chauveau, P.; Cazaubiel, M.; Gendre, D.; Maudet, C.; Wagner, A.; Digestive tolerance and postprandial glycaemic and insulinaemic responses after consumption of dairy desserts containing maltitol and fructo-oligosaccharides in adults. *European Journal of Clinical Nutrition* **2014**, *68*, 575. [[Crossref](#)]
113. Ding, S.; Peng, B.; Li, Y.; Yang, J.; Evaluation of specific volume, texture, thermal features, water mobility, and inhibitory effect of staling in wheat bread affected by maltitol. *Food Chemistry* **2019**, *283*, 123. [[Crossref](#)]
114. Cheng, S.; Martínez-Monteagudo, S. I.; Hydrogenation of lactose for the production of lactitol. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* **2018**, e2275. [[Crossref](#)]
115. Martínez-Monteagudo, S. I.; Enteshari, M.; Metzger, L.; Lactitol: Production, Properties, and Applications. *Trends in Food Science & Technology* **2019**, *83*, 181. [[Crossref](#)]
116. Wilson, M. E.; Hu, M.; Kurth, M. J.; Hsieh, Y.-L.; Krochta, J. M.; Preparation and characterization of lactitol-based poly(ether polyol)s for rigid polyurethane foam. *Journal of Applied Polymer Science* **1996**, *59*, 1759. [[Crossref](#)]
117. Han, J. H.; Krochta, J. M.; Kurth, M. J.; Hsieh, Y.-L.; Lactitol-Based Poly(ether polyol) Hydrogels for Controlled Release Chemical and Drug Delivery Systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **2000**, *48*, 5278. [[Crossref](#)]
118. Sítio Consulta Remédios. Disponível em: <<https://consultaremedios.com.br/lactitol/bula>>. Acesso em: 25 abril 2021.
119. Willibald-Eitle, I.; Schiweck, H.; Em *Advances in Sweeteners*; Grenby, T. H., ed.; Chapman & Hall: London, 1996, cap. 7. [[Link](#)]
120. Schiweck, H.; Munir, M.; Em *Carbohydrates in Industrial Synthesis*; Bartens, D. A., ed.; Springer: Berlin, 1992, cap. 6. [[Crossref](#)]
121. Ghosh, S.; Sudha, M. L.; A review on polyols: new frontiers for health-based bakery products. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* **2012**, *63*, 372. [[Crossref](#)]
122. Sítio Transparency Market Research. Isomalt Market. Disponível em: <<https://www.transparencymarketresearch.com/isomalt-market.html>>. Acesso em: 25 abril 2021.
123. Holly Strawbridge; Artificial sweeteners: sugar-free, but at what cost? Disponível em: <<https://www.health.harvard.edu/blog/artificial-sweeteners-sugar-free-but-at-what-cost-201207165030>>. Acesso em: 25 abril 2021.
124. Khattak, S.; Wahid, F.; Liu, L.-P.; Jia, S.-R.; Chu, L.-Q.; Xie, Y.-Y.; Li, Z.-X.; Zhong, C.; Applications of cellulose and chitin/chitosan derivatives and composites as antibacterial materials: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology* **2019**, *103*, 1989. [[Crossref](#)]
125. Younes, I.; Rinaudo, M.; Chitin and chitosan preparation from marine sources: structure, properties and applications. *Marine Drugs* **2015**, *13*, 1133. [[Crossref](#)]
126. Manigandan, V.; Karthik, R.; Ramachandran, S.; Rajagopal, S.; Em. *Handbook of Food Bioengineering, Biopolymers for Food Design*; Grumezescu, A. M.; Holban, A. M., eds.; Academic Press, 2018, cap. 15. [[Crossref](#)]
127. Mendes, A. A.; de Oliveira, P. C.; de Castro, H. F.; Giordano, R. L. C.; Aplicação de quitosana como suporte para a imobilização de enzimas de interesse industrial. *Química Nova* **2011**, *34*, 831-840. [[Crossref](#)]
128. Kabanov, V. L.; Novinyuk, L. V.; Chitosan Application in Food Technology: A Review of Recent Advances. *Food Systems* **2020**, *3*, 1. [[Crossref](#)]
129. Ritsema, T., Smeeckens, S.; Fructans: beneficial for plants and humans. *Current Opinion in Plant Biology* **2003**, *6*, 223. [[Crossref](#)]