

VII SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE COGUMELOS NO BRASIL
VII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MUSHROOMS IN BRAZIL
VI SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE COGUMELOS COMESTÍVEIS
VI NATIONAL SYMPOSIUM ON EDIBLE MUSHROOMS

{ 12 A 15 DE OUTUBRO. HOTEL TROPICAL - MANAUS, AM }



Potencial integração entre a fabricação de etanol celulósico e a cadeia produtiva de cogumelos no Brasil

Félix Gonçalves de Siqueira¹, Bruno dos Santos Alves Ferreira Brasil¹, César Heraclides Behling Miranda¹, Eustáquio Souza Dias²

¹ Laboratório de Processos Bioquímicos, Embrapa Agroenergia, Brasília-DF.

² Laboratório de Cogumelos Comestíveis, Departamento de Biologia, Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

Introdução

A maior parte do etanol é produzida a partir de matérias-primas renováveis, que são essencialmente fonte de carboidratos na forma de açúcares (cana-de-açúcar, beterraba, sorgo-sacarino, frutas diversas), amidos (milho, trigo, mandioca, batata-doce) e lignocelulósicos (constituintes estruturais de todos os vegetais). As tecnologias de produção de etanol de sacarose (cana-de-açúcar) e amido (milho) são chamadas de primeira geração e os processos de produção de biocombustíveis a partir de materiais lignocelulósicos são chamados de segunda geração. Os processos para etanol de primeira geração estão em um avançado grau de maturidade comercial, enquanto que os de segunda geração ainda precisam de aperfeiçoamentos para se tornar competitivos.

A bioconversão de resíduos lignocelulósicos para bioetanol é mais complicada do que a de resíduos à base de amido, por exemplo. Implica em quatro processos: i) pré-tratamento (físico, químico, biológico ou conjunto); ii) des-polimerização (sacarificação) de celulose e hemicelulose em monômeros de açúcares solúveis (hexoses e pentoses) por hidrólise; iii) conversão dos açúcares monoméricos por fermentação; e iv) separação e purificação do produtos.

A desconstrução dos constituintes da parede celular vegetal pode ser feita por microrganismos tais como fungos e bactérias. Fungos são capazes de produzir enzimas celulolíticas extracelulares, enquanto que algumas bactérias e fungos anaeróbios produzem enzimas celulolíticas em um complexo chamado celulosoma. Enzimas celulolíticas ou celulasas, tais como endoglucanases, exoglucanases e β -glicosidases produzidas por fungos filamentosos hidrolisam de forma sinérgica os componentes da celulose. Os fungos filamentosos também produzem hemicelulasas e ligninasas que auxiliam na desconstrução de hemicelulose e lignina, respectivamente, que também fazem parte da parede celular dos vegetais.

No cultivo de cogumelos, como por exemplo, o *Agaricus bisporus* (*champignon de Paris*), são utilizadas biomassas vegetais provenientes de resíduos agroindustriais (palha de arroz, palha de trigo, cama de frango, capim e muitos outros), o que resulta em acúmulo de quantidades substanciais de composto pós-cultivo de cogumelos (*Spent Mushroom Substrate* – SMS).

O que fazer com o SMS já é uma preocupação nas crescentes indústrias de produção de cogumelos dos Estados Unidos, Canadá, Europa e países asiáticos, pois é um passivo ambiental. A solução óbvia é a busca de mecanismos para explorar possíveis aplicações para o SMS, visando à geração de produtos de maior valor agregado. Uma dessas aplicações seria a produção de complexos enzimáticos degradadores dos componentes estruturais lignocelulósicos, pela extração de enzimas tais como lacases, peroxidases, pectinases, celulasas (beta-glicosidases, endo e exoglucanases) e hemicelulasas (xilanasas e mananasas). A produção de etanol de segunda geração também tem sido considerada em várias pesquisas, pela vantagem que o SMS apresenta por já ter sofrido

um pré-tratamento biológico e conter enzimas provenientes dos microrganismos presentes nas diferentes etapas do cultivo dos cogumelos.

Nesta revisão objetiva-se discutir a possibilidade do aumento da produção de cogumelos comestíveis no Brasil por meio da integração com a cadeia produtiva de etanol celulósico, a partir de biomassas como o bagaço e palha de cana-de-açúcar e/ou outros resíduos lignocelulósicos gerados nas proximidades das principais regiões sucroenergéticas brasileiras.

Produção de etanol celulósico

A pressão por alternativas ao uso de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás) fez ressurgir nos últimos anos o interesse por fontes alternativas de energia. Estas incluem o uso de biomassa, energia solar, eólica, hidrelétrica, geotérmica, etc. Dentre essas, a biomassa tem sido extensivamente estudada, pois pode ser usada para produzir combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, energia elétrica, bio-óleo e produtos químicos diversos. Por esse motivo, a maioria dos países desenvolvidos ou em desenvolvimento, como o Brasil, está mobilizando grandes investimentos para que a biomassa lignocelulósica tenha participação significativa na matriz energética (SANTOS et al., 2013).

A biomassa lignocelulósica pode ser obtida de vegetais lenhosos ou não lenhosos, de resíduos orgânicos, como também de biofluidos (CORTEZ et al., 2008), constituindo-se na maior fonte de carboidratos do mundo. Os produtos obtidos dependem tanto da biomassa utilizada quanto da tecnologia de processamento. A parede celular vegetal (Fig. 1) tem como constituintes básicos os polissacáridos celulose, hemicelulose e lignina, os quais configuram a estrutura física do vegetal e proporcionam estruturação rígida e pouco reativa – daí sua recalcitrância e proteção física contra ações do clima e microrganismos e organismos antagonistas. Aplicando-se o conceito de biorefinaria (KUBICEK, 2013), a partir da celulose poderiam ser obtidos etanol, ácido lático e acetona, por exemplo; espessantes, adesivos e xilose (xilitol e furfural) poderiam ser obtidos da hemicelulose, enquanto da lignina, que é um polímero fenólico, poderiam ser obtidos adesivos e combustíveis sólidos (SIQUEIRA & FERREIRA-FILHO, 2010; SANTOS et al., 2013; KUBICEK, 2013).

A produção de etanol celulósico tem como princípio a desconstrução desses constituintes da parede celular para obtenção de monômeros dos açúcares e sua posterior fermentação (SIQUEIRA & FERREIRA FILHO, 2010). Atualmente, as tecnologias para obtenção de etanol celulósico abrangem quatro processos (Fig. 2): 1) pré-tratamento, que visa alterar ou remover a lignina e as hemiceluloses, aumentar a área superficial e diminuir o grau de polimerização e cristalinidade da celulose, ou seja, desconstrução parcial da biomassa; 2) hidrólise, que é a desconstrução total do arcabouço da parede celular vegetal, para obtenção de açúcares da celulose e hemicelulose; 3) fermentação, que é a conversão dos açúcares a etanol, pela ação de leveduras; e, 4) destilação, com separação/fracionamento dos substratos fermentados e obtenção dos produtos desejados.

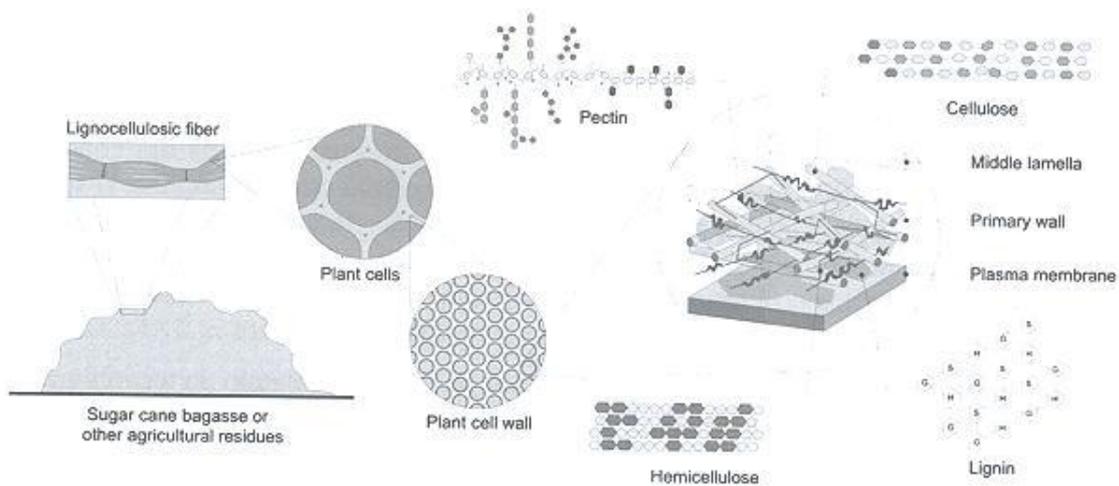


Figura 3. Constituição da parede celular vegetal (resíduo agroindustrial, como exemplo), apresentando celulose, hemicelulose e lignina como principais componentes. *Fonte: Siqueira & Ferreira Filho, 2010.*

O futuro na segunda geração de etanol

Após o uso do caldo da cana na primeira geração, utilizam-se o bagaço e as folhas no processo de hidrólise. Na etapa final, ocorre a fermentação tradicional por leveduras que transformam os açúcares em etanol.



Figura 4. Esquema com processos básicos para obtenção de etanol celulósico ou de segunda geração, tendo como exemplo o bagaço e palha de cana-de-açúcar. *Fonte: Marcos Oliveira, 2012 (Entre açúcares e genes, FAPESP. Site: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/10/11/entre-acucares-e-genes/>, consultado em 7 de Agosto de 2013).*

As três primeiras etapas ainda representam gargalos que precisam ser melhor esclarecidos para que o processo de segunda geração produza etanol a preços comercialmente competitivos com os atuais processos de produção de combustíveis.

Cogumelos: produção e potencial biotecnológico

A produção mundial de cogumelos está crescendo e, em 2008, já ultrapassara três milhões de toneladas anuais, com mercado estimado em US\$ 10 bilhões, sendo o *champignon de Paris* o de maior produção. Globalmente, os cogumelos são negociados principalmente na forma processada. Mais recentemente os mercados Europeu e Norte Americano têm dado preferência a cogumelos frescos, cujos principais países exportadores são Holanda, Polônia, Irlanda e Bélgica. A China é o maior exportador de conservas de cogumelos com participação em 41,8% do mercado, seguida pelos Países Baixos (25,1%) e Espanha (7,4%). Os principais países importadores de cogumelos em

conservação a Alemanha, EUA e França, e de cogumelos frescos o Reino Unido, Alemanha, EUA e França (HARSH & JOSHI, 2008).

O cultivo de cogumelos está em franca expansão no Brasil, graças à descoberta de suas propriedades medicinais e culinárias pelo povo brasileiro e da melhoria das condições econômicas (DIAS, 2010). No entanto Vilela (2003) citado por Vargas (2011) relatou naquele período que os dados oficiais sobre a produção de cogumelos no Brasil são poucos e defasados, tendo o Estado de São Paulo como exceção por ser o maior produtor de cogumelos do País e o que apresenta dados oficiais (Instituto de Economia Agrícola – www.iea.sp.gov.br/out/index.php) sobre este agronegócio.

De acordo com Dias (2010) ainda há necessidade de desenvolvimento de tecnologias de cultivo de cogumelos apropriadas às condições brasileiras. Durante muitos anos, a tecnologia de cultivo de cogumelos utilizada no Brasil foi uma adaptação daquela utilizada nos países tradicionalmente produtores, desconsiderando-se as diferentes condições climáticas e disponibilidade de matérias-primas. Para que se possa melhor aproveitar o potencial brasileiro para o cultivo de cogumelos, é essencial o desenvolvimento de tecnologias de cultivo apropriadas, tanto para a agricultura familiar quanto para escala industrial.

Composto pós-cultivo da produção de cogumelos (*Spent Mushroom Substrate* - SMS)

Os cogumelos (basidiomicetos) têm sido cultivados comercialmente basicamente para a alimentação, mas as suas capacidades fermentativas e alta tolerância a etanol têm despertado interesse em pesquisas que buscam a consolidação de bioprocessos na conversão de biomassas em produtos comerciais (SCHUSTER & CHINN, 2013). Uma das estratégias que vem sendo estudada é o uso do SMS em função das ações microbianas (fungos, bactérias e actinomicetos) sobre a compostagem (fase inicial do processo, cultivo de *A. bisporus*, por exemplo) e colonização da biomassa vegetal. Parte da biomassa é consumida pelos microrganismos e cogumelos cultivados, no entanto o SMS ainda contém quantidades significativas de celulose e hemicelulose, podendo a depender do processo/fungo escolhidos, reduzir e transformar também a estrutura da lignina.

Na China, por exemplo, estima-se que são gerados cerca de 2 milhões de toneladas SMS a cada ano (QIAO et al., 2011). A maior parte do SMS é queimado para gerar energia elétrica, o que produz um passivo ambiental significativo. Além disso, a falta de estratégias de uso sustentável tem restringido o desenvolvimento da indústria de cogumelos no mundo (FINNEY et al., 2009). Phan & Sabaratnam (2012) descrevem que o SMS poderá ser utilizado na produção de enzimas, biorremediação, alimentação animal e geração de bioenergia. No Brasil, o SMS tem sido apontado como um excelente suplemento na composição da ração de frangos (SANTOS et al., 2005; MACHADO et al., 2007; AZEVEDO et al., 2009).

Mais recentemente, os fungos que degradam a madeira (*white-rot fungi*) têm sido investigados por sua capacidade de ajudar no processamento de biomassa para a produção de biocombustíveis (CANAM et al., 2013). Uma abordagem muito promissora usando palha de arroz como matéria-prima consiste no tratamento biológico com *Pleurotus ostreatus* (cogumelo ostra) seguido por AFEX (*ammonia fiber expansion*) (BALAN et al., 2008), o que permite redução significativa na severidade do pré-tratamento químico e promove melhoria nos rendimentos de glicose (hidrólise enzimática). Uma enorme variedade de abordagens para o pré-tratamento biológico tem sido relatada como bem sucedidas em diversos substratos lignocelulósicos (CANAM et

al., 2013). O SMS pode ser designado como uma matéria-prima lignocelulósica fornecedora de açúcares redutores para produção de biocombustíveis e outros biomateriais de valor agregado (WHITE et al, 2008; KAPARAJU et al, 2009).

Esta combinação de uso do pré-tratamento biológico conjugado com métodos físicos ou químicos como alternativa potencial para minizar o impacto causado por inibidores enzimáticos ou leveduriformes, é muito interessante. Os cogumelos possuem um arsenal enzimático que inclui celulases, hemicelulases e principalmente ligninases, que auxiliariam no afrouxamento da estrutura recalcitrante da parede celular vegetal RAVIKUMAR et al., 2013).

Perspectivas de integração da cadeia produtiva de cogumelos e a geração de agroenergia (base-bioetanol) no Brasil.

O setor sucroenergético brasileiro gera diversos subprodutos sólidos e líquidos, tais como melaço, vinhaça, bagaço e folhas da cana-de-açúcar. Estes subprodutos são gerados em quantidades cada vez maiores, devido à expansão dos canaviais e à instalação de novas unidades produtoras de biocombustíveis. Seria muito interessante se estes pudessem migrar das anotações de despesas para receitas na contabilidade do setor sucroenergético. Para tal, faz-se necessária a exploração do potencial desses subprodutos.

O Distrito Federal não figura entre os maiores produtores de cogumelos no Brasil, no entanto se apresenta como um grande centro consumidor, sendo este um dos motivos que levou Vargas (2011) a realizar um estudo sobre cadeia produtiva de cogumelos nesta região. O autor também discorreu sobre o histórico de produção de cogumelos no Brasil, relatando as principais espécies e os tipos de resíduos agroindustriais que podem ser aproveitados. Ainda de acordo com esse autor, o Estado de São Paulo continua a ser o maior produtor de cogumelos, sendo que em 2010 a Região de Mogi das Cruzes (SP) apresentou a maior concentração de fungicultores do Brasil, produzindo cerca de 61,5% dos cogumelos naquele ano.

No entanto, de acordo com os dados do IEA (2013) a Região de Bragança Paulista aumentou a produção de 1.053 para 2.140 toneladas de 2011 para 2012, apresentando um crescimento de 51%. Enquanto que a Região de Sorocaba, no mesmo período, apresentou crescimento de 56%, passando de 745 para 1.708 toneladas de cogumelos (Fig. 3). Enquanto que a região de Mogi das Cruzes vem apresentando decréscimo na produção de cogumelos, como se observa nos dados fornecidos pelo IEA, passando de 848 a 344 toneladas, diminuído cerca de 60% neste período. Uma explicação para isso pode ser a especulação imobiliária nessa Mesorregião que se limita com a Região Metropolitana da Cidade de São Paulo. No entanto esta região não apresenta produção de cana-de-açúcar (Fig. 3). As três regiões (Sorocaba, Bragança Paulista e Mogi das Cruzes) foram responsáveis por 98,8% da produção de cogumelo no Estado de São Paulo no ano de 2012, apresentando uma produção de 3.874 toneladas (IEA, 2013)

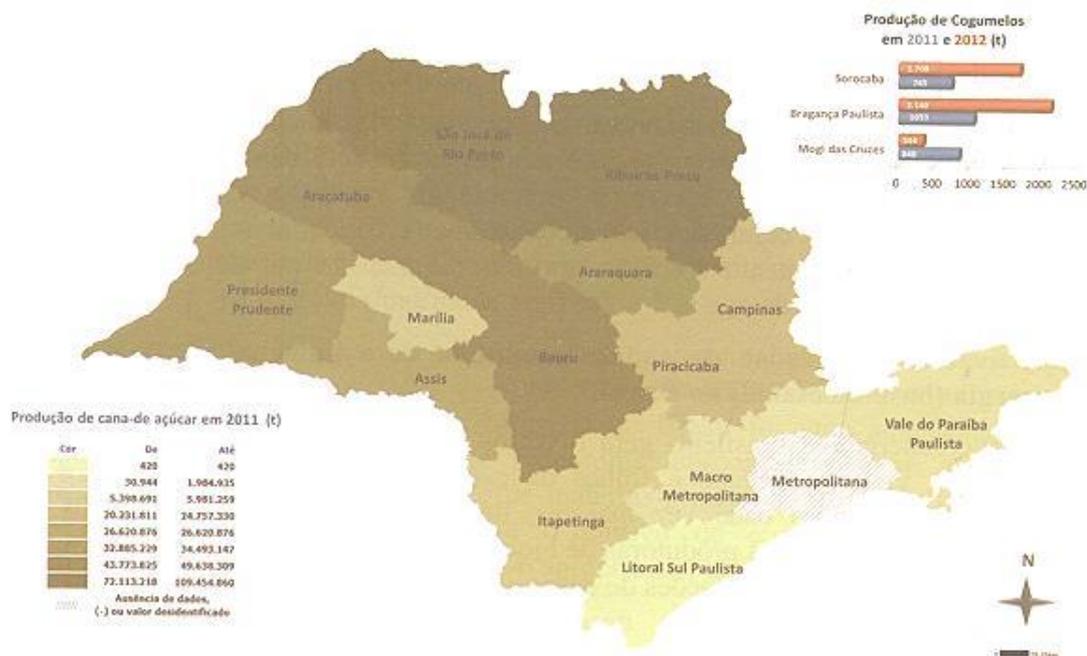


Figura 5. Mapa ilustrativo das Mesorregiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo com a sobreposição das principais Regiões produtoras de cogumelo do Estado. *Fonte: IEA - Instituto de Economia Agrícola, (www.iea.sp.gov.br/out/index.php consultado em 08 de Agosto de 2013).*

O mapa da produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo mostra que a maior parte deste cultivo encontra-se principalmente nas Mesorregiões de Ribeirão Preto, São José do Rio Preto e Bauru (Fig. 3). As regiões de Sorocaba e Bragança Paulista apresentaram em 2011 produções de 420 toneladas de cana-de-açúcar (Fig. 3). Estas regiões são circunvizinhas das regiões de Piracicaba e Bauru, que produziram entre 20 e 109 milhões de toneladas desta cultura. De acordo com Santos et al. (2013) cerca de 25% de cana-de-açúcar industrializada no Brasil se transforma em bagaço (50% de umidade), estimando por exemplo, que na safra de 2007/2008 a produção de bagaço no Brasil pode ter alcançado 135 milhões de toneladas. Também relatou que na safra 2009/2010 a estimativa de palha produzida no Brasil foi de 139,7 toneladas. A vinhaça, que também é um dos subprodutos do setor, também é gerada em grande quantidade (na ordem de 10 a 15 litros por litro de etanol produzido).

O uso de bagaço, palha e vinhaça na produção de composto para cultivo de cogumelos nos arredores das usinas sucroenergéticas, nas Mesorregiões Paulistas (Fig. 3), como exemplo, poderá fortalecer a integração de dois setores, gerando benefícios mútuos (Fig. 4). A fungicultura se beneficiaria da possibilidade de usar as matérias-primas básicas para formulação dos substratos, enquanto que a usina ou empresa integradora (biorefinaria) faria usufruto do SMS, a biomassa lignocelulósica pré-tratada biologicamente (Fig. 4). Assim o SMS, produzido à base de bagaço e palha de cana, suplementado com vinhaça, serviria de base para produção de xarope de açúcares fermentescíveis, na usina, como também de fonte de produção de enzimas microbianas, como lacases, celulasas e hemicelulasas, produzidas pelos cogumelos e comunidade microbiana presente na biomassa vegetal nas diferentes fases de cultivo.

Conclusão

O modelo proposto na figura 4 já é realidade nos Estados Unidos, Canadá e Europa, bem como vem sendo discutido por pesquisadores da Ásia, que buscam cadeias produtivas como a do arroz para consolidar esta estratégia. Isto seria possível também no Brasil, considerando-se o sistema arroteiro no Rio Grande do Sul. Dada a diversidade de produção de biomassa do Brasil, seria possível difundir o cultivo de vários gêneros de cogumelos, apropriados para as diferentes regiões. Entretanto, pela facilidade de aproveitamento de um sistema já bem estabelecido, a integração do setor sucroenergético e da fungicultura representaria vantagens competitivas para ambos os setores.

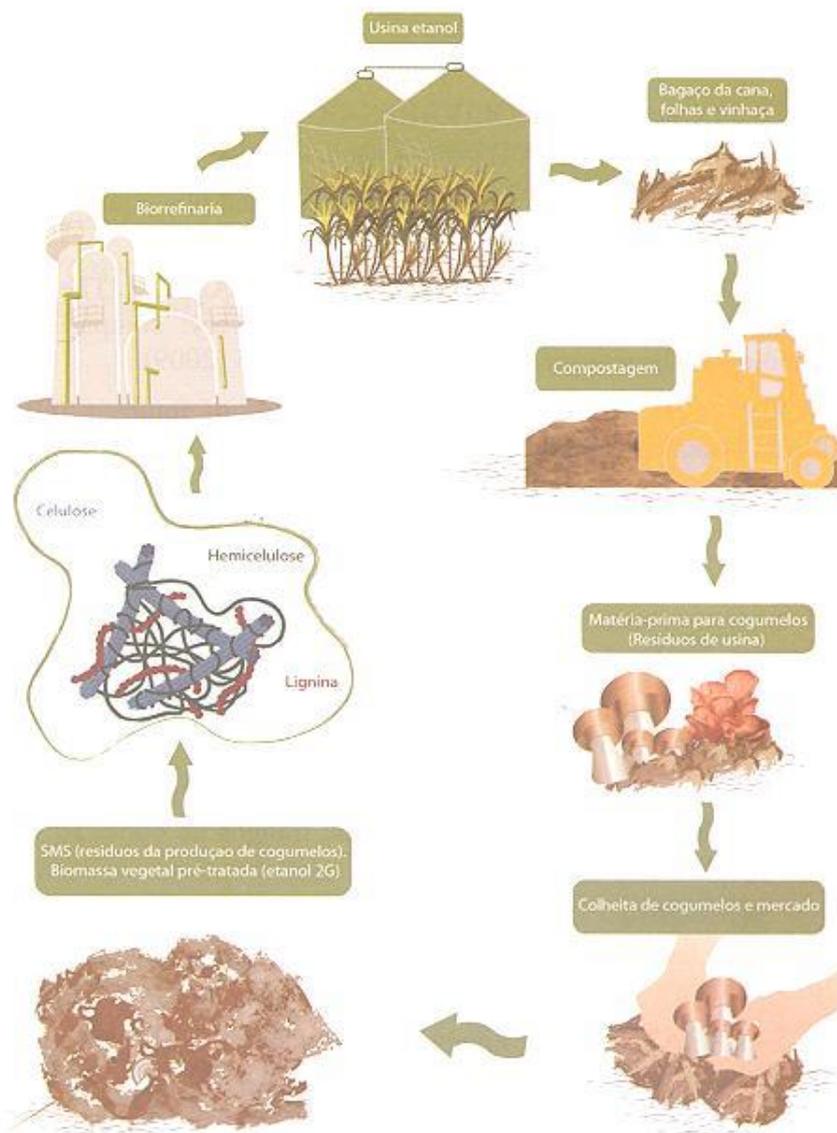


Figura 6. Esquema para uma potencial integração entre a produção de etanol celulósico e a cadeia produtiva de cogumelos. *Ilustrações: Maria Goreti Braga Santos (Embrapa Agroenergia).*

Referências

- AZEVEDO, R.S.; ÁVILA, C.L.S.; DIAS, E.S.; BERTECHINI, A.G.; SCHWAN, R.F. Utilização do composto exaurido de *Pleurotus sajor-caju* em rações de frangos de corte e seus efeitos no desempenho dessas aves. **Acta Scientiarum. Animal Sciences** 31(2):139-144, (2009).
- BALAN, V.; da COSTA-SOUSA, L.; CHUNDAWAT, S.P.S.; VISMEH, R.; JONES, A.D.; DALE, B.E. Mushroom spent straw: A potential substrate for an ethanol-based biorefinery. **J. Ind. Microbiol. Biotechnol.** 35(5):293-301 (2008).
- CANAM, T.; TOWN, J.; IROBA, K.; TABIL, L.; DUMONCEAUX, T. Pretreatment of Lignocellulosic Biomass Using Microorganisms: Approaches, Advantages, and Limitations. In: *Sustainable Degradation of Lignocellulosic Biomass - Techniques, Applications and Commercialization*. (2013).
- CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.E.; OLIVARES-GÓMEZ, E. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, (2008). 733p.
- DIAS, E.S. Mushroom cultivation in Brazil: challenges and potential for growth. *Cienc. Agrotec.* 34, 795-803 (2010).
- FINNEY, K.N.; RYU C.; SHARIFI, V.N.; SWITHENBANK, J. The reuse of spent mushroom compost and coal tailings for energy recovery: comparison of thermal treatment technologies. **Bioresour. Technol.** 100:310-315 (2009).
- HARSH, N.S.K.; JOSHI, K. Mushrooms: the vegetable of future. (2008). Electronic copy available at: <http://ssrn.com/abstract=1474175>
- IEA - Instituto de Economia Agrícola, (www.ica.sp.gov.br/out/index.php consultado em 08 de Agosto de 2013).
- KAPARAJU, P.; SERRANO, M.; THOMSEN, A.B.; KONGJAN, P.; ANGELIDAKI, I. Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept. **Bioresour. Technol.** 100, 2562-2568 (2009).
- KUBICEK, C.P. **Fungi and Lignocellulosic Biomass. Chapter 11: Lignocellulose Biorefinery**. First Edition, John Wiley & Sons, (2013).
- MACHADO, A.M.B.M.; DIAS, E.S.; SANTOS, E.C.; FREITAS, R.T.F. Composto exaurido do cogumelo *Agaricus blazei* na dieta de frangos de corte. **R. Bras. Zootec.** 36(4):1113-1118 (2007) (supl.).
- OLIVEIRA, M. 2012 (Entre açúcares e genes, FAPESP. Site: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/10/11/entre-acucares-e-genes/>, consultado em 7 de Agosto de 2013).
- PHAN, C.W.; SABARATNAM, V. Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes. **Appl. Microbiol. Biot.** 96, 863-873 (2012).
- QIAO, J.J.; ZHANG, Y.F.; SUN, L.F.; LIU W.W.; ZHU H.J.; ZHANG, Z. Production of spent mushroom substrate hydrolysates useful for cultivation of *Lactococcus lactis* by dilute sulfuric acid, cellulase and xylanase treatment. **Bioresour. Technol.** 102, 8046-8051 (2011).
- RAVIKUMAR, R.; RANGANATHAN, B.V.; CHATHOTH, K.N.; GOBIKRISHNAN, S. Innovative and intensified technology for the biological pretreatment of agro waste for ethanol production. **Korean J. Chem. Eng.** 30, 1051-1057 (2013).

SANTOS, EC; TEIXEIRA, AS; FREITAS, RTF; RODRIGUES, PBR; DIAS, ES; MURGAS, LDS. Uso de aditivos promotores de crescimento sobre o desempenho, características de carcaça e bactérias totais do intestino de frangos de corte. **Ciênc. Agrotec.** 29(1):223-231 (2005).

SANTOS, F.; QUEIROZ, J.H.; COLODETTE, J.; SOUZA, C.J.A.; GOMES, F.J.B. Produção de etanol celulósico a partir de cana-de-açúcar. In: **Bioenergia & Biorrefinaria: cana-de-açúcar & espécies florestais**, Editora Universidade Federal de Viçosa, (2013), p. 132-166.

SCHUSTER, B.G.; CHINN, M.S. Consolidated Bioprocessing of Lignocellulosic Feedstocks for Ethanol Fuel Production. **Bioenerg. Res.** 6, 416-435 (2013).

SIQUEIRA, F.G.; FERREIRA-FILHO, E.X. Plant Cell Wall as a Substrate for the Production of Enzymes with Industrial Applications. **Mini-Rev. Org. Chem.** 7, 54-60 (2010).

VARGAS, A.M. **Análise diagnóstica da cadeia produtiva de cogumelos do Distrito Federal**. 2011. xiv, 130 p., il. Dissertação (Mestrado em Agronegócios)-Universidade de Brasília, Brasília, (2011).

WHITE, J.S.; YOHANNAN, B.K.; WALKER, G.M. Bioconversion of brewer's spent grains to bioethanol. **FEMS Yeast Res.** 8, 1175-1184 (2008).