

## Potencial e Perspectivas da Utilização de Microalgas para Produção de Biocombustíveis

Bruno dos Santos Alves Figueiredo Brasil<sup>1</sup>  
Patrícia Portela de Medeiros Brunale<sup>2</sup>

### Características gerais

O termo “microalgas” é utilizado para designar organismos eucarióticos fotossintéticos microscópicos, geralmente com dimensões entre 1 e 10  $\mu\text{m}$ . Estes organismos estão distribuídos em diversos filos/divisões de protistas, sendo os principais Chlorophyta (algas verdes), Rhodophyta (algas vermelhas), Glaucocystophyta, Euglenophyta, Chlorarachniophyta, Heterokonta, Haptophyta, Cryptophyta e Alveolata (BHATTACHARYA; MEDLIN, 1998; LARKUM et al., 2012). Neste texto, trataremos também das cianobactérias. Elas são procariotas e, portanto, não são consideradas algas, agrupando-se em um clado monofilético dentro do domínio Eubacteria. Contudo, compartilham várias características com as microalgas, uma vez que, evolutivamente, deram origem aos cloroplastos das algas e plantas terrestres (BHATTACHARYA; MEDLIN, 1998; LARKUM et al., 2012). Tanto as cianobactérias quanto as espécies dos grupos

Chlorophyta e Heterokonta – principalmente – apresentam potencial para produção de biomassa para biocombustíveis (LARKUM et al., 2012).

O cultivo comercial de microalgas para a produção de ração animal e suplementos alimentares humanos é praticado desde a década de 1960, sendo a maior parte da produção realizada na China, Índia, Estados Unidos e Japão. As principais espécies cultivadas são *Chlorella vulgaris* e *Arthrospira (Spirulina) platensis*, utilizadas como nutracêuticos para alimentação humana, além de *Dunaliella salina* e *Haematococcus pluvialis*, utilizadas para produção de carotenóides de alto valor, respectivamente,  $\beta$ -caroteno e astaxantina (SPOLAORE et al., 2006; BENEMANN, 2011). A espécie *Cryptothecodinium cohnii* e os gêneros *Shizochytrium* e *Ulchennia* são utilizados, em menor escala, para produção de ácidos graxos poli-insaturados (PUFAs), por exemplo, do tipo ômega-3 ( $\omega$ -3) (SPOLAORE et al., 2006).

<sup>1</sup> Biólogo, Doutor em Microbiologia, Pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF, [bruno.brasil@embrapa.br](mailto:bruno.brasil@embrapa.br)

<sup>2</sup> Química, Especialista em Bioenergia, Analista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF, [patricia.brunale@embrapa.br](mailto:patricia.brunale@embrapa.br)

## Produção de biocombustíveis a partir de microalgas

O potencial das microalgas para produção de biocombustíveis é conhecido desde o trabalho pioneiro de Burlew (1953) "*Algal Culture from Laboratory to Pilot Plant*", o qual lançou os fundamentos da tecnologia de cultivo de microalgas em larga escala e deu início a projetos de pesquisa colaborativos na área (BENEMANN, 2011). Após a crise do petróleo nos anos de 1970, o governo americano investiu, entre 1978 e 1996, em um programa de pesquisa sobre o potencial das microalgas para produção de biocombustíveis. Investimento semelhante foi realizado pelo governo japonês entre 1990 e 2000. Ambos os programas concluíram que a produção de microalgas é tecnicamente viável, porém são necessários aperfeiçoamentos tecnológicos importantes para que se atinja a alta produtividade requerida (WALTZ, 2009). Na última década, o interesse na produção de energia a partir de algas ressurgiu e vultosos investimentos, tanto públicos como privados, estão sendo realizados. Consórcios de pesquisa e diversas *start-ups*, principalmente nos Estados Unidos, China e Europa, buscam aperfeiçoar os sistemas de cultivo de biomassa, com várias plantas comerciais em processo de instalação ou que já deram início às atividades (WALTZ, 2009; CHISTI; YAN, 2011).

O renovado interesse na utilização de microalgas como matéria-prima para produção de biocombustíveis é fomentado pelo aumento do preço dos combustíveis fósseis nos últimos anos e pelas várias vantagens que apresentam sobre as fontes tradicionais, como: (1) As microalgas podem ser cultivadas em meio salino simples, inclusive em água salobra; (2) são eficientes fixadoras de CO<sub>2</sub>, apresentando maior eficiência fotossintética que os vegetais superiores; (3) o cultivo pode ser realizado em condições não adequadas para a produção de culturas convencionais (em solos degradados ou em regiões desérticas, por exemplo); (4) o CO<sub>2</sub> e os nutrientes necessários para cultivo, especialmente nitrogênio e fósforo, podem ser obtidos de efluentes líquidos industriais; (5) a produção ocorre ao longo de todo o ano; (6) algumas espécies apresentam capacidade de acumular alto teor de óleo, podendo chegar a 70% de seu peso seco (estima-se ser possível produzir mais de 50.000 L de óleo por hectare.ano<sup>-1</sup>); (7) crescimento rápido – algumas

espécies chegam a dobrar a biomassa em 3,5 h na fase de crescimento exponencial (SHEEHAN et al., 1998; CHISTI, 2008; WALTZ, 2009; XU et al., 2011).

As microalgas podem ser empregadas na geração de diversos biocombustíveis, como biodiesel, gasolina, bioquerosene, etanol e biogás. Dentre as etapas do processo de produção, uma das mais desafiadoras consiste na recuperação da biomassa (NORSKER et al., 2011). Esta etapa, que representa entre 20 e 30% dos custos de produção, geralmente envolve um ou mais passos de separação de fases sólido-líquido, tais como floculação, filtração, flutuação ou sedimentação por centrifugação (BRENNAN; OWENDE, 2012). A baixa eficiência de algumas técnicas de separação, baixa densidade de células e o tamanho reduzido de algumas microalgas podem aumentar ainda mais os custos. Portanto, a escolha da tecnologia de colheita adequada e a seleção de linhagens de mais fácil colheita são cruciais para a economia do processo (BRENNAN; OWENDE, 2012; NORSKER et al., 2011). Uma vez recuperada a biomassa algal, sua conversão em biocombustíveis pode ser efetuada por diversos processos normalmente aplicados para obtenção desses produtos a partir de matérias-primas derivadas de plantas terrestres. Basicamente, eles podem ser divididos em processos termoquímicos e bioquímicos. Os principais fatores que influenciam a escolha da rota tecnológica são o tipo e quantidade de biomassa, o tipo e forma final do biocombustível desejado e a economia do processo (STEPHENS et al., 2010; BRENNAN; OWENDE, 2012).

## Sistemas de Cultivo de Microalgas

Microalgas possuem grande diversidade metabólica, sendo que algumas espécies podem ser cultivadas em condições heterotróficas, autotróficas e/ou mixotróficas. Em condições de cultivo heterotrófico, a microalga utiliza, na ausência de luz, uma fonte orgânica de carbono para geração de energia e biomassa. Em um cultivo autotrófico ou fotoautotrófico, as microalgas, por meio de vias fotossintéticas, utilizam a luz como fonte de energia para fixação de CO<sub>2</sub> atmosférico. Já em sistemas de cultivo mixotróficos, as microalgas utilizam simultaneamente uma fonte luminosa e um substrato orgânico como fonte de energia,

bem como CO<sub>2</sub> (SCOTT et al., 2010; CHISTI; YAN, 2011; LARKUM et al., 2012). Cultivos heterotróficos ou mixotróficos são economicamente viáveis apenas para produtos de alto valor. Assim, os sistemas comerciais de produção de biocombustíveis a partir de microalgas que estão sendo implementados atualmente baseiam-se em cultivos autotróficos (SCOTT et al., 2010; GEORGIANNA; MAYFIELD, 2012).

O cultivo autotrófico de microalgas pode ser realizado em: (1) lagos e circuitos (*raceways*) abertos, rasos e mecanicamente agitados, ou (2) fotobiorreatores fechados, que podem ser horizontais, verticais, tubulares ou em sacos plásticos e placas (SCOTT et al., 2010; GEORGIANNA; MAYFIELD, 2012). Sistemas abertos, como lagos e circuitos, possuem produtividade mais baixa e estão diretamente expostos a contaminações por microrganismos e invasão por outras espécies de algas e predadores. Todavia, possuem menor custo de produção e operação, além de poderem ser escalonados para unidades individuais de vários hectares. Os fotobiorreatores são mais produtivos e menos susceptíveis a contaminações, porém possuem maiores custos de instalação bem como grandes desafios operacionais, pois requerem sistemas de resfriamento, troca de gases, prevenção e limpeza de incrustações, entre outros. Além disso, fotobiorreatores não podem ser eficientemente escalonados para unidades individuais com mais de 100 m<sup>3</sup>, devido à rápida acumulação de O<sub>2</sub> no sistema (BENEMANN, 2011; SCOTT et al., 2010; GEORGIANNA; MAYFIELD, 2012). Embora novos e aperfeiçoados modelos de fotobiorreatores estejam sendo construídos, as fortes limitações de escalabilidade desses sistemas fazem com que a grande maioria das plantas comerciais de produção de microalgas atuais utilize sistemas abertos de cultivo (BENEMANN, 2011).

## Modelos de produção de biocombustíveis a partir de microalgas

O sucesso de sistemas de produção de biocombustíveis a partir de microalgas dependerá de seus custos econômicos, energéticos e ambientais. Assim, há um consenso de que a biomassa algal

produzida deve ser aproveitada dentro de um sistema de biorrefinarias (BENEMANN, 2011; SCOTT et al., 2010; STEPHENS et al., 2010; SINGH; OLSEN, 2011; GEORGIANNA; MAYFIELD, 2012). Ou seja, a biomassa de microalgas deve ser utilizada não somente para a produção de biodiesel a partir dos lipídeos e outros biocombustíveis, como bioquerosene e bioetanol, mas também para a produção de vários coprodutos de maior valor, como biopolímeros, carotenóides e ácidos graxos. De fato, os coprodutos algais são responsáveis por manter os sistemas produtivos existentes economicamente viáveis. Por outro lado, a partir de estudos de modelagem econômica, Stephens e colaboradores (2010) calculam que, à medida que o sistema ganha escala e produtividade, os coprodutos gerados diminuem sua importância relativa na geração de receita em relação aos biocombustíveis. Em qualquer situação, a biomassa residual pode ainda ser aproveitada como fertilizante ou para produção de biogás. O aproveitamento de coprodutos gerados no próprio sistema, como a utilização do biogás na geração de eletricidade e a reintrodução da biomassa residual nos tanques como fertilizantes, também são vistos como incrementos importantes para a viabilidade econômica do processo. Alternativamente, resíduos municipais ou da agroindústria podem ser utilizados como fontes de nutrientes para o cultivo das algas, assim como emissões de CO<sub>2</sub> de plantas industriais podem ser aproveitadas para acelerar o crescimento algal (BENEMANN, 2011; SCOTT et al., 2010; STEPHENS et al., 2010; SINGH; OLSEN, 2011; GEORGIANNA; MAYFIELD, 2012).

Em linha com os modelos conceituais supracitados, sistemas de produção baseados em diversas estratégias vêm sendo desenvolvidos e implementados (CHISTI; YAN, 2011). A empresa americana *Sapphire Energy*, por exemplo, produz óleo cru a partir de microalgas cultivadas em sistemas fotoautotróficos abertos. De forma semelhante ao petróleo, tal óleo pode ser refinado pelos processos tradicionais para a produção de diversos biocombustíveis líquidos ([www.sapphireenergy.com](http://www.sapphireenergy.com)). De maneira semelhante, a empresa *Aurora Algae* cultiva microalgas marinhas geneticamente modificadas em sistemas fotoautotróficos abertos, visando à produção de biodiesel e ração para aquicultura ([www.aurorainc.com](http://www.aurorainc.com)). Em contraposição, um sistema de

cultivo heterotrófico de microalgas geneticamente modificadas é utilizado pela americana *Solazyme* para produzir biocombustíveis e óleos de alto valor agregado ([www.solazyme.com](http://www.solazyme.com)). Utilizando ainda outra abordagem, a *startup* americana *Algenol Biofuels* comercializa um sistema que utiliza cultivos autotróficos de cianobactérias geneticamente modificadas para serem capazes de fermentar açúcares intracelularmente e produzirem etanol por via direta (ALGENOL BIOFUELS, 2014).

## Seleção e melhoramento de microalgas

O isolamento e seleção de cepas de microalgas adequadas é um importante pré-requisito para o sucesso do cultivo. Embora as microalgas possuam uma enorme diversidade e potenciais recursos genéticos de ordens de magnitude maiores que os de animais e plantas terrestres, esses foram pouco explorados até o momento (MUTANDA et al., 2011; KAUR et al., 2012; LIM et al., 2012; NASCIMENTO et al., 2012). Portanto, um processo de seleção e domesticação semelhante ao que foi efetuado com cultivos de plantas terrestres ainda deve ser realizado (LIM et al., 2012). Cepas que possuam características de interesse devem ser prospectadas e selecionadas, pois são fundamentais para produção de óleo em quantidades e qualidades necessárias para a produção de biocombustíveis. Desse modo, a cepa de microalga utilizada deve apresentar grande produção basal de ácidos graxos ou acumulá-los em grandes quantidades frente a estímulos ambientais. Deve também possuir características que facilitem as etapas de colheita e extração, como capacidade de biofloculação, maior tamanho celular, alcançar grandes densidades celulares em cultivo ou secretar lipídeos para meio circundante. A capacidade de crescer em condições extremas, como alta salinidade e pH alcalinos ou ácidos, também é desejável, pois permite a elaboração de meios de cultivos menos propícios a contaminações. Além disso, é importante que as microalgas possuam altas taxas de crescimento e adaptabilidade às mudanças climáticas a que um sistema de cultivo aberto está submetido. Neste caso, linhagens nativas provavelmente se

adaptariam melhor às condições climáticas locais, provendo níveis de produtividade melhores e mais estáveis (LARKUM et al., 2012; STEPHENSON et al., 2011; LIM et al., 2012; GEORGIANNA; MAYFIELD, 2012).

O melhoramento de microalgas é um campo que passou a ser explorado recentemente. Embora o melhoramento clássico seja dificultado pela ausência de um ciclo sexuado em várias espécies, o melhoramento genético, por meio de mutagênese ou tecnologias de DNA recombinante, parece promissor (LARKUM et al., 2012; GEORGIANNA; MAYFIELD, 2012). Por exemplo, a empresa Aurora Biofuels desenvolveu linhagens de algas com elevada expressão de enzimas envolvidas na síntese de triglicerídeos, como a Acetil-coenzima A carboxílica. A *Solazyme* utiliza RNAs interferentes e antisense para regular a expressão de genes envolvidos na captura de luz (Ex: *Lhca2* e *Lhcbm4*), biossíntese de clorofila (Ex: Hidroximetilbilano Sintetase) e sinalização celular visando a ganhos de eficiência fotossintética e biomassa. Já a empresa *Synthetic Genomics* modifica genes envolvidos em vias de secreção transmembrana visando à construção de linhagens secretoras de óleo, o que facilitaria a colheita desse produto (WALTZ, 2009). Não obstante, apenas um pequeno número de espécies com potencial para produção de biocombustíveis encontra-se bem caracterizado geneticamente e com protocolos de transformação estabelecidos. A sequência genômica completa e métodos de transformação foram reportados para as espécies *Chlamydomonas reinhardtii* (MERCHANT et al., 2007), *Chlorella variabilis* (Blanc et al., 2010), *Nannochloropsis gaditana* (RADAKOVITS et al., 2012) e *Chlorella protothecoides* (GAO et al., 2014). Estas duas últimas espécies são capazes de produzir altos teores de lipídeos e são vistas como organismos promissores para produção de biocombustíveis. Acredita-se que, com a utilização de tecnologias de sequenciamento de nova geração disponíveis atualmente, o entendimento dos genomas de algas seja rapidamente ampliado, especialmente no que diz respeito a genes envolvidos em respostas metabólicas (RADAKOVITS et al., 2012).

## Conclusão

As microalgas apresentam diversas vantagens teóricas sobre matérias-primas tradicionais usadas para a produção de biocombustíveis, tais como: baixo requerimento de área; possibilidade de utilização de águas residuais para cultivo; produção e colheita contínua ao longo do ano; rápida taxa de crescimento e elevado teor de lipídeos e/ou açúcares. Essas características permitiriam a produção sustentável de biocombustíveis com rendimentos entre 10 e 100 vezes maiores que aqueles obtidos com matérias-primas tradicionais, como cana-de-açúcar e soja (QUIRINO et al., 2014).

No entanto, no contexto atual, o principal desafio para o estabelecimento e exploração de microalgas ainda é determinar sistemas práticos de cultivo em larga escala e métodos de produção de combustíveis a partir da biomassa algal capazes de competir economicamente com combustíveis fósseis ou biocombustíveis tradicionais. Para tanto, são necessárias melhorias significativas no conhecimento do potencial existente na biodiversidade, visando a seleção e melhoramento de cepas algais de alto rendimento, bem como estabelecimento de protocolos otimizados de crescimento, colheita e processamento de óleos e outros produtos úteis. Nesse sentido, devem ser envidados esforços na estruturação de sistemas de produção de biomassa algal em um contexto de biorrefinaria, aproveitando-se os ácidos graxos e açúcares como intermediários para produção de biocombustíveis, mas também as frações ricas em carotenoides e proteínas para produção de outros bioprodutos, como cosméticos e ração animal. A expectativa é que no médio/longo prazo o cultivo de microalgas em larga escala se torne uma realidade comercial e sejam a matéria-prima de escolha para a produção da terceira geração de biocombustíveis.

## Referências

- ALGENOL BIOFUELS. Disponível em: <<http://www.algenol.com>> Acesso em: 10 nov. 2014.
- AURORA ALGAE. Disponível em: <<http://www.aurorainc.com/>> Acesso em: 10 nov. 2014.
- BENEMANN, J. R. Microalgae biomass and biofuels economics. In: INTERNATIONAL MICROALGAE AND BIOFUELS WORKSHOP, 2010, Fortaleza. **Brazilian network on green chemistry: proceedings**. Fortaleza: Edições UFC, 2011. p 49-80.
- BHATTACHARYA, D.; MEDLIN, L. Algal phylogeny and the origin of land plants. **Plant Physiology**, Rockville, v. 116, n. 1, p. 9-15, 1998.
- BLANC, G.; DUNCAN, G.; AGARKOVA, I.; BORODOVSKY, M.; GURNON, J.; KUO, A.; LINDQUIST, E.; LUCAS, S.; PANGILINAN, J.; POLLE, J.; SALAMOV, A.; TERRY, A.; YAMADA, T.; DUNIGAN, D. D.; GRIGORIEV, I. V.; CLAVERIE, J.; VAN ETTEN, J. L. The *Chlorella variabilis* NC64A genome reveals adaptation to photosymbiosis, coevolution with viruses, and cryptic sex. **The Plant Cell**, Rockville, v. 22, n. 9, p. 2943-2955, 2010.
- BRENAN, L.; OWENDE, P. Biofuels from microalgae: towards meeting advanced fuel standards. In: LEE, J. W. (Ed.). New York: Springer, 2012. Cap. 24, p. 553-599.
- CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. **Trends in Biotechnology**, London, v. 26, n. 3, p. 126-131, 2008.
- CHISTI, Y.; YAN, J. Energy from algae: current status and future trends in algal biofuels – a status report. **Applied Energy**, London, v. 88, n. 10, p. 3277-3279, 2011.
- GAO, C.; WANG, Y.; SHEN, Y.; YAN, D.; HE, X.; DAI, J.; WU, Q. Oil accumulation mechanisms of the oleaginous microalga *Chlorella protothecoides* revealed through its genome, transcriptomes, and proteomes. **BMC Genomics**, London, v. 15, artigo 582, 2014.
- GEORGIANNA, D. R.; MAYFIELD, S. P. Exploiting diversity and synthetic biology for the production of algal biofuels. **Nature**, London, v. 448, n. 7411, p. 329-335, 2012.
- KAUR, S.; SARKAR, M.; SRIVASTAVA, R. B.; GOGOI, H. K.; KALITA, M. C. Fatty acid profiling and molecular characterization of some freshwater microalgae from India with potential for biodiesel production. **New Biotechnology**, Amsterdam, v. 29, n. 3, p. 332-344, 2012.
- LARKUM, A. W.; ROSS, I. L.; KRUSE, O.; HANKAMER, B. Selection, breeding and engineering of microalgae for bioenergy and biofuel production. **Trends Biotechnology**, London, v. 30, n. 4, p. 198-205, 2012.
- LIM, D. K.; GARG, S.; TIMMINS, M.; ZHANG, E. S.; THOMAS-HALL, S. R.; SCHUHMAN, H.; LI, Y.; SCHENK, P. M. Isolation and evaluation of oil-producing microalgae from subtropical coastal and brackish waters. **PLoS One**, San Francisco, v. 7, n. 7, artigo: e40751, 2012.

MERCHANT, S. S.; PROCHNIK, S. E.; VALLON, O.; HARRIS, E. H.; KARPOWICZ, S. J.; WITMAN, G. B.; TERRY, A.; SALAMOV, A.; FRITZ-LAYLIN, L. K.; MARÉCHAL-DROUARD, L.; MARSHALL, W. F.; QU, L. H.; NELSON, D. R.; SANDERFOOT, A. A.; SPALDING, M. H.; KAPITONOV, V. V.; REN, Q.; FERRIS, P.; LINDQUIST, E.; SHAPIRO, H.; LUCAS, S. M.; GRIMWOOD, J.; SCHMUTZ, J.; CARDOL, P.; CERUTTI, H.; CHANFREAU, G.; CHEN, C. L.; COGNAT, V.; CROFT, M. T.; DENT, R.; DUTCHER, S.; FERNÁNDEZ, E.; FUKUZAWA, H.; GONZÁLEZ-BALLESTER, D.; GONZÁLEZ-HALPHEN, D.; HALLMANN, A.; HANIKENNE, M.; HIPPLER, M.; INWOOD, W.; JABBARI, K.; KALANON, M.; KURAS, R.; LEFEBVRE, P. A.; LEMAIRE, S. D.; LOBANOV, A. V.; LOHR, M.; MANUELL, A.; MEIER, I.; METS, L.; MITTAG, M.; MITTELMEIER, T.; MORONEY, J. V.; MOSELEY, J.; NAPOLI, C.; NEDELCO, A. M.; NIYOGI, K.; NOVOSELOV, S. V.; PAULSEN, I. T.; PAZOUR, G.; PURTON, S.; RAL, J. P.; RIAÑO-PACHÓN, D. M.; RIEKHOF, W.; RYMARQUIS, L.; SCHRODA, M.; STERN, D.; UMEN, J.; WILLOWS, R.; WILSON, N.; ZIMMER, S. L.; ALLMER, J.; BALK, J.; BISOVA, K.; CHEN, C. J.; ELIAS, M.; GENDLER, K.; HAUSER, C.; LAMB, M. R.; LEDFORD, H.; LONG, J. C.; MINAGAWA, J.; PAGE, M. D.; PAN, J.; POOTAKHAM, W.; ROJE, S.; ROSE, A.; STAHLBERG, E.; TERAUCHI, A. M.; YANG, P.; BALL, S.; BOWLER, C.; DIECKMANN, C. L.; GLADYSHEV, V. N.; GREEN, P.; JORGENSEN, R.; MAYFIELD, S.; MUELLER-ROEBER, B.; RAJAMANI, S.; SAYRE, R. T.; BROKSTEIN, P.; DUBCHAK, I.; GOODSTEIN, D.; HORNICK, L.; HUANG, Y. W.; JHAVERI, J.; LUO, Y.; MARTÍNEZ, D.; NGAU, W. C.; OTILLAR, B.; POLIAKOV, A.; PORTER, A.; SZAJKOWSKI, L.; WERNER, G.; ZHOU, K.; GRIGORIEV, I. V.; ROKHSAR, D. S.; GROSSMAN, A. R. The Chlamydomonas genome reveals the evolution of key animal and plant functions. **Science**, Washington, DC, v. 318, n. 5848, p. 245-251, 2007.

MUTANDA, T.; RAMESH, D.; KARTHIKEYAN, S.; KUMARI, S.; ANANDRAJ, A.; BUX, F. Bioprospecting for hyper-lipid producing microalgal strains for sustainable biofuel production. **Bioresource Technology**, Oxon, v. 102, n. 1, p. 57-70, 2011.

NASCIMENTO, I. A.; MARQUES, S. A. I.; CABANELAS, I. T. D.; PEREIRA, S. A.; DRUZIAN, J. I.; SOUZA, C. O. de; VICH, D. V.; CARVALHO, G. C. de; NASCIMENTO, M. A. Screening microalgae strains for biodiesel production: lipid productivity and estimation of fuel quality based on fatty-acids profiles as selective criteria. **Bioenergy Research**, New York, v. 6, n. 1, p. 1-13, 2012.

NORSKER, N. H.; BARBOSA, M. J.; VERMUE, M. H.; WIJFFELS, R. H. Microalgal production--a close look at the economics. **Biotechnology Advances**, Oxford, v. 29, n. 1, p. 24-27, 2011.

QUIRINO, B. F.; BRASIL, B. S. A. F.; LAVIOLA, B. G.; MENDONÇA, S.; ALMEIDA, J. R. M. Critical analysis of feedstock availability and composition, and new potential resources for biodiesel production in Brazil. In: SILVA, S. S. da; CHANDEL, A. K. (Ed.). **Biofuels in Brazil**. Switzerland Springer, 2014. p. 331-350.

RADAKOVITS, R.; JINKERSON, R. E.; FUERSTENBERG, S. I.; TAE, H.; SETTLAGE, R. E.; BOORE, J. L.; POSEWITZ, M. C. Draft genome sequence and genetic transformation of the oleaginous alga *Nannochloropsis gaditana*. **Nature Communications**, London, v. 3, artigo 686, 2012.

SCOTT, S. A.; DAVEY, M. P.; DENNIS, J. S.; HORST, I.; HOWE, C. J.; LEA-SMITH, D. J.; SMITH, A. G. Biodiesel from algae: challenges and prospects. **Current Opinion in Biotechnology**, London, v. 21, n. 3, p. 277-286, 2010.

SHEEHAN, J.; DUNAHAY, T.; BENEMANN, J.; ROESSLER, P.; WEISSMAN, J. **A look back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: biodiesel from algae**. [Golden]: National Renewable Energy Laboratory, 1998. 328 p. NREL/TP-580-24190.

SINGH, A.; OLSEN, S. I. A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels. **Applied Energy**, Oxon, v. 88, n. 10, p. 3548-3555, 2011.

SOLAZYME. Disponível em: <<http://solazyme.com>>. Acesso em: 10 nov. 2014.

SPOLAORE, P.; JOANNIS-CASSAN, C.; DURAN, E.; ISAMBERT, A. Commercial applications of microalgae. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, Osaka, v. 101, n. 2, p. 87-96, 2006.

STEPHENS, E.; ROSS, I. L.; KING, Z.; MUSSGUG, J. H.; KRUSE, O.; POSTEN, C.; BOROWITZKA, M. A.; HANKAMER, B. An economic and technical evaluation of microalgal biofuels. **Nature Biotechnology**, New York, v. 28, n. 2, p. 126-128, 2010.

STEPHENSON, P. G.; MOORE, C. M.; TERRY, M. J.; ZUBKOV, M. V.; BIBBY, T. S. Improving photosynthesis for algal biofuels: toward a green revolution. **Trends Biotechnology**, London, v. 29, n. 12, p. 615-23, 2011.

WALTZ, E. Biotech's green gold? **Nature Biotechnology**, New York, v. 27, n. 1, p. 15-18, 2009.

WIJFFELS, R. H.; BARBOSA, M. J. An outlook on microalgal biofuels. **Science**, Washington, v. 329, n. 5993, p. 796-799, 2010.

XU, L.; BRILMAN, D. W. F.; WITHAG, J. A.; BREM, G.; KERSTEN, S. Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: energy balance analysis. **Bioresource Technology**, Oxon, v. 102, n. 8, p. 5113-5122, 2011.

## Comunicado Técnico, 09

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:

**Embrapa Agroenergia**

Endereço: *Parque Estação Biológica - PqEB s/n, Brasília, DF*

Fone: (61) 3448-4246

Fax: (61) 3448-1589

[www.embrapa.br/agroenergia](http://www.embrapa.br/agroenergia)

1ª edição 2014



Ministério da  
Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento



## Comitê de publicações

**Presidente:** *Marcia Mitiko Onoyama.*

**Secretária-Executiva:** *Lorena Costa Garcia.*

**Membros:** *Betânia Ferraz Quirino, Diogo Keiji Nakai, Eduardo Fernandes Formighieri, Felipe B. P. Carvalho, João Ricardo M. Almeida, Larissa Andreani Carvalho, Maria Lara Pereira Machado, Sílvia Belém Gonçalves.*

## Expediente

**Supervisão editorial:** *Marcia Mitiko Onoyama.*

**Revisão de texto:** *Bruno dos Santos Alves Figueiredo Brasil.*

**Editoração eletrônica:** *Maria Goreti Braga dos Santos.*

**Normalização bibliográfica:** *Maria Lara Pereira Machado.*