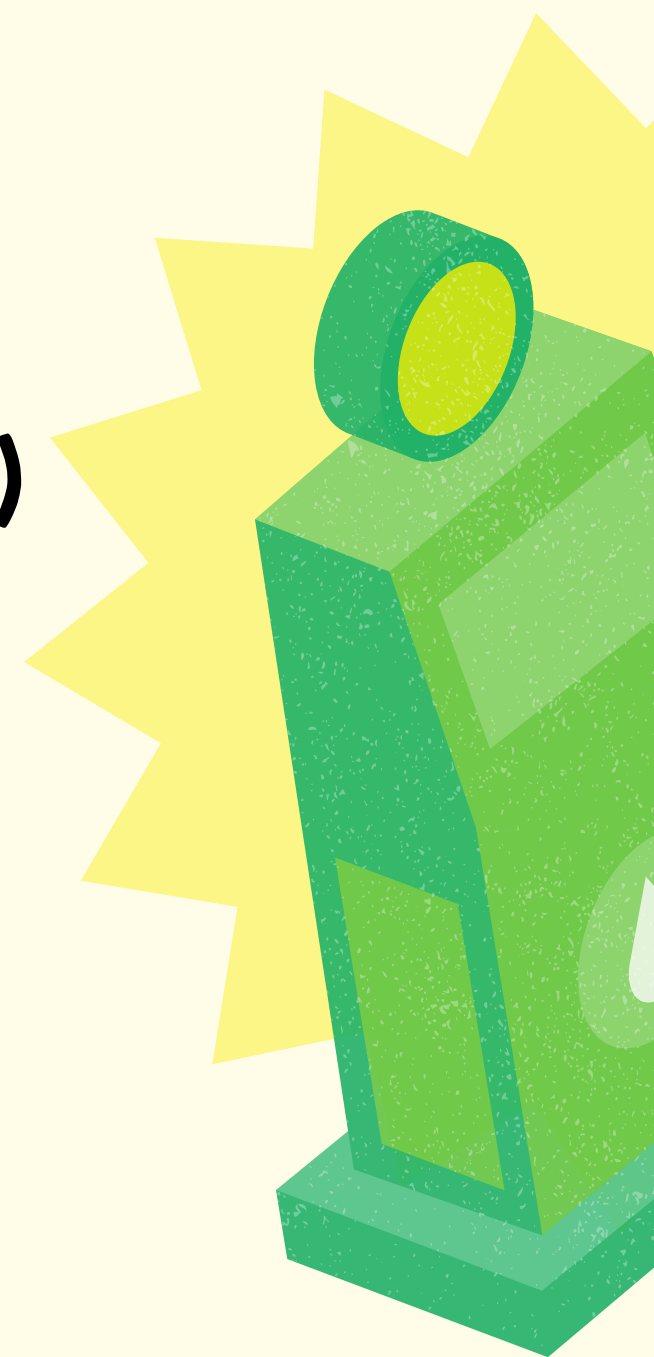




**IEE0005 - PRODUÇÃO E CONSUMO DE
COMBUSTÍVEIS E O MEIO AMBIENTE (2025.1)**

BIODIESEL DE ALGAS

Paulo Victor Zanotto (11807699)
Evandro Uehara Viaro (4364056)



INTRODUÇÃO

Fonte: JAGDISH. 2024

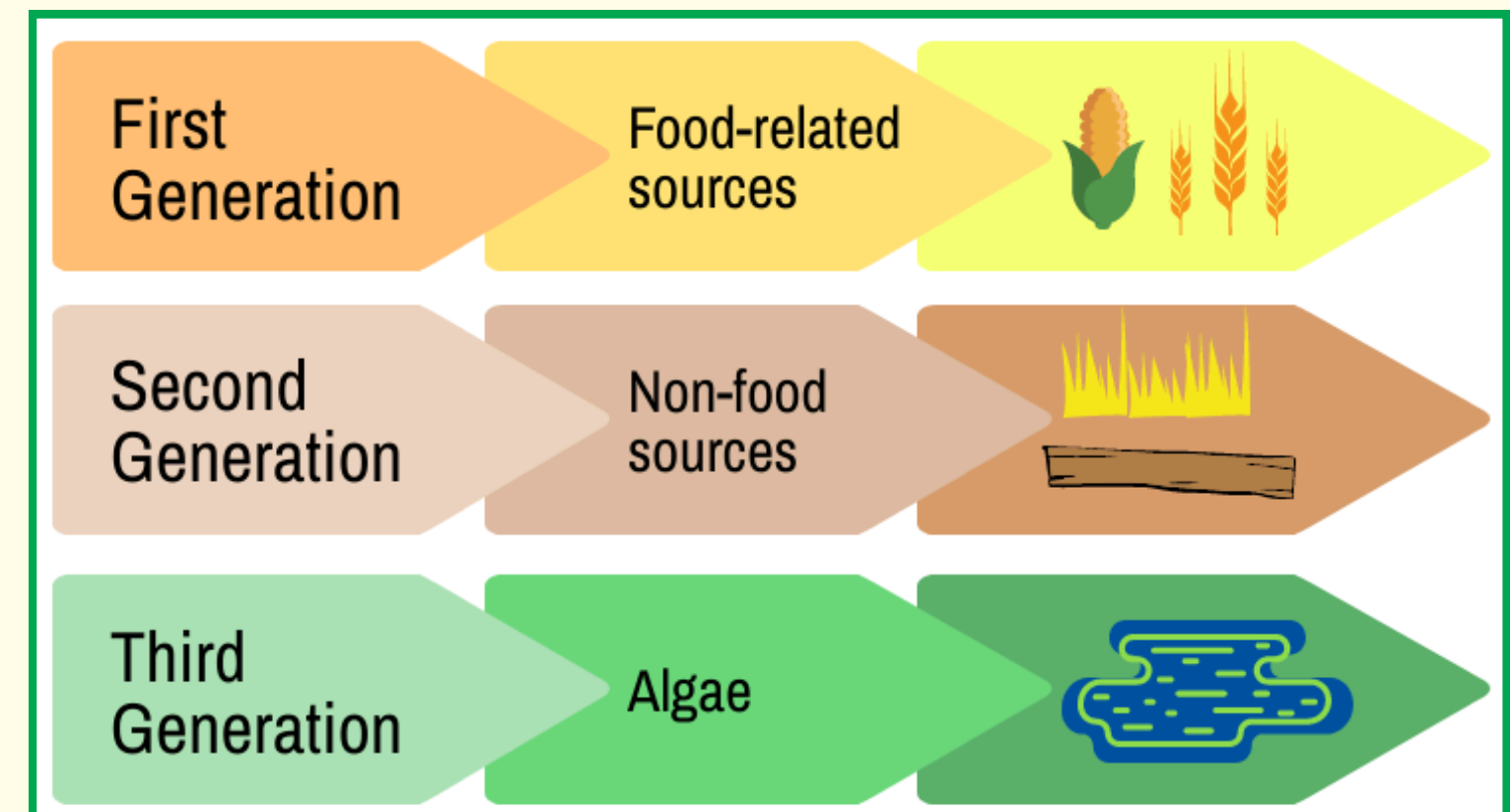
- Necessidade **substituição** combustíveis fósseis
→ redução da emissão dos **gases efeito estufa**.
- Alternativa: produção de **biocombustíveis**:
 - **Transesterificação** de óleos (biodiesel) e **fermentação** de açúcares (etanol);
- Originários principalmente de plantas **alimentícias ou têxteis**:
 - Milho, cana-de-açúcar, soja, beterraba, algodão, dendê e outros;



Fonte: TIKANNEN, A. 2025

INTRODUÇÃO

- Problema: competição entre **alimento e combustível** ('Food vs Fuel');
- Novo foco: biocombustíveis **2ª geração (2G)**
 - Plantas não alimentícias e resíduos orgânicos (ex: etanol lignocelulósico);
 - Processos termoquímicos (pirólise e gaseificação).
- Futuro: biocombustíveis de **3ª geração (3G)**
 - Redução **uso de terra**, aumento de produtividade por fungos, bactérias e **algas**.



Fonte: LET'S TALK SCIENCE. 2019.

HISTÓRICO

- Descoberta décadas 50 e 60 de **acúmulo de óleo em algas** associado à ausência nutrientes (nitrogênio e fosfato);
- Meier (1955), Oswald e Golueke (1960) propõe uso de algas para **geração de metano**;
- Aquatic Species Program (1978–1996) e Marine Biomass Program (1968–1990) nos EUA para estudo de diversas espécies de algas associada à produção energética;

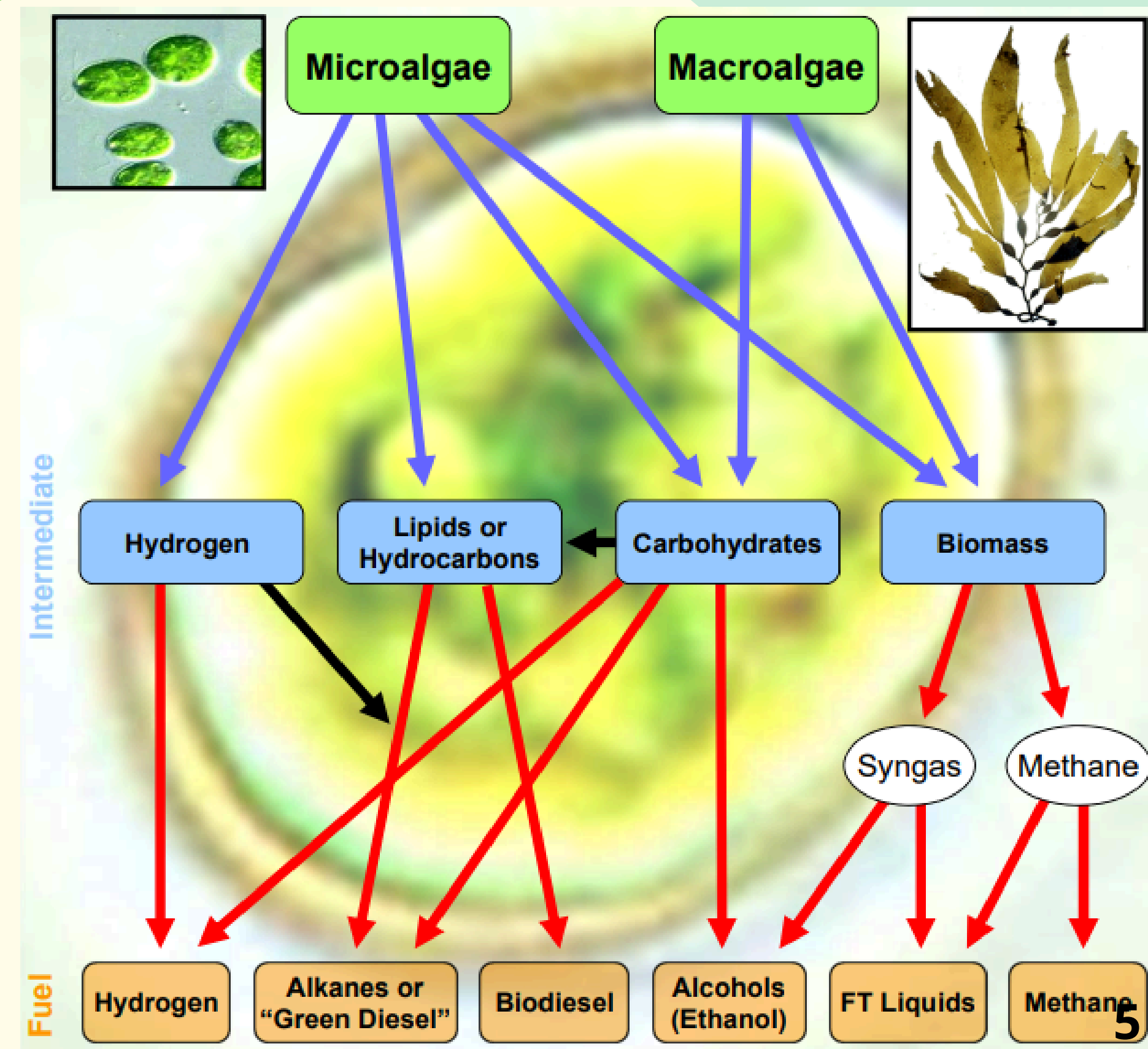


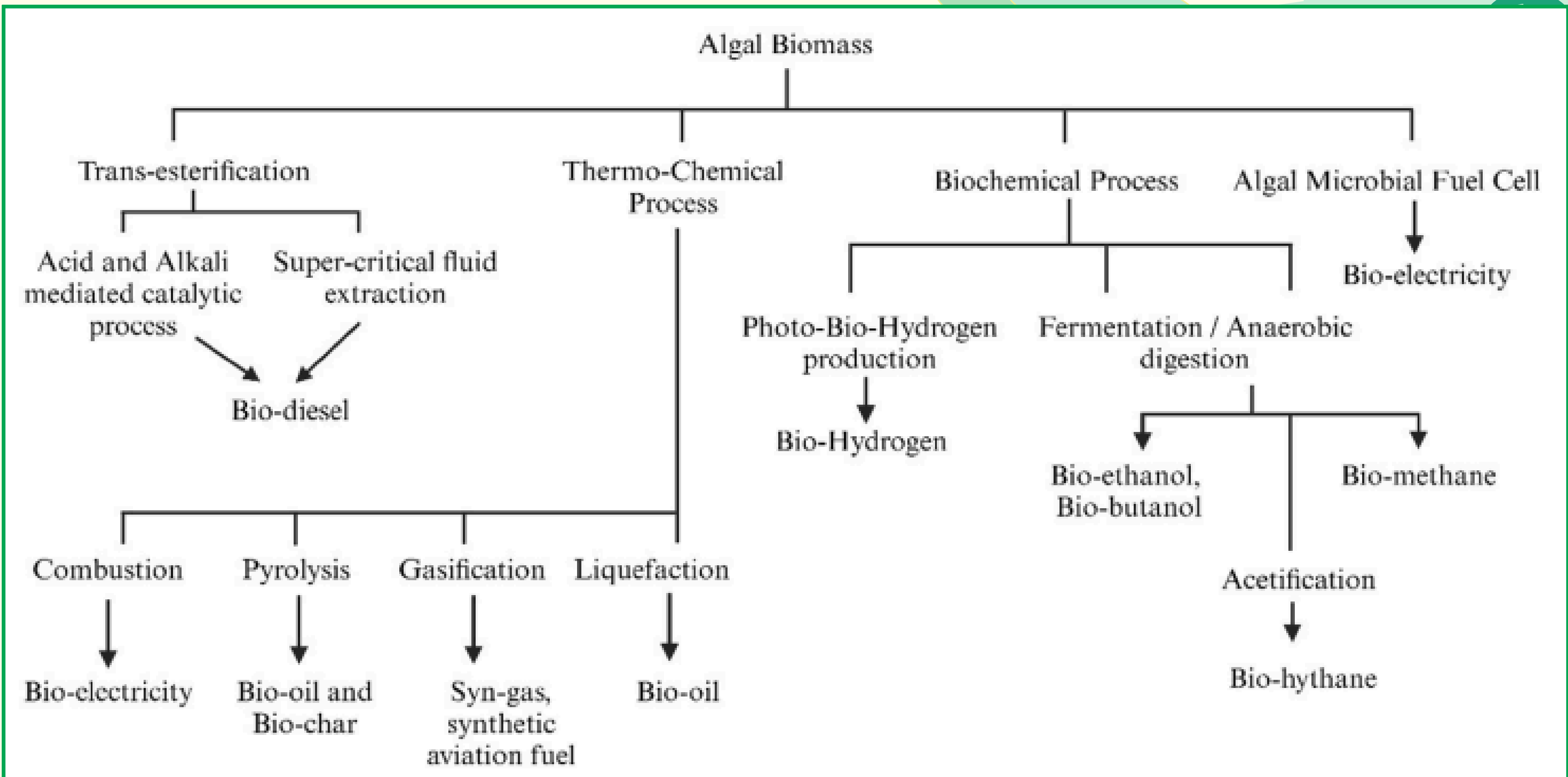
Fonte: Michael Macor/AP.2023

COMBUSTÍVEIS DE ALGAS

- Variedade grande de espécies possíveis de estudo;
- Diversos produtos combustíveis podem ser obtidos por processos metabólicos:
 - Alcóois, Hidrogênio, Metano e Biodiesel;
- Outras rotas são destinadas a processos térmicos da biomassa (comumente resíduos de microalgas ou macroalgas);

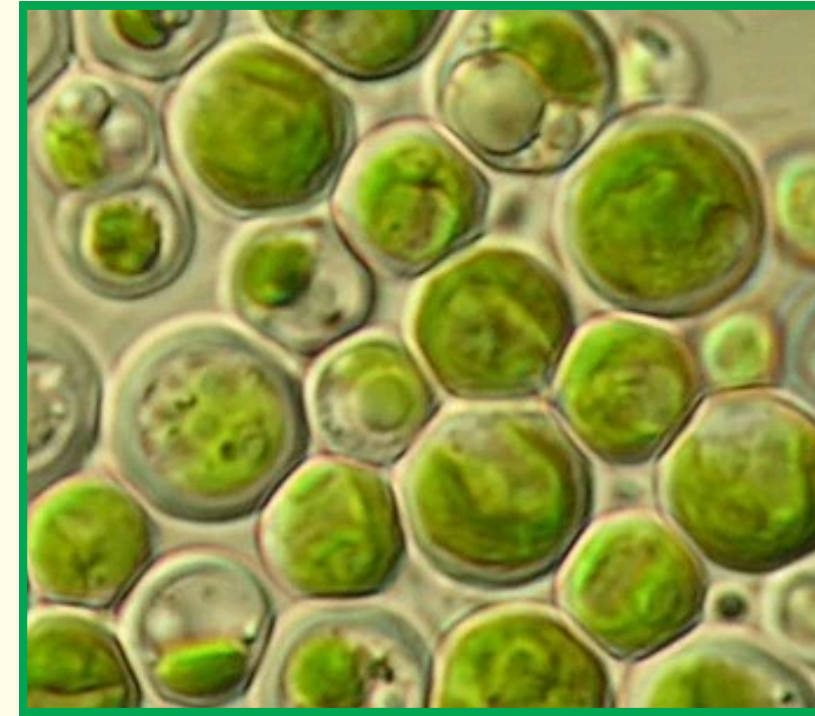
Fonte: Al Darzins. 2009





COMBUSTÍVEIS DE ALGAS

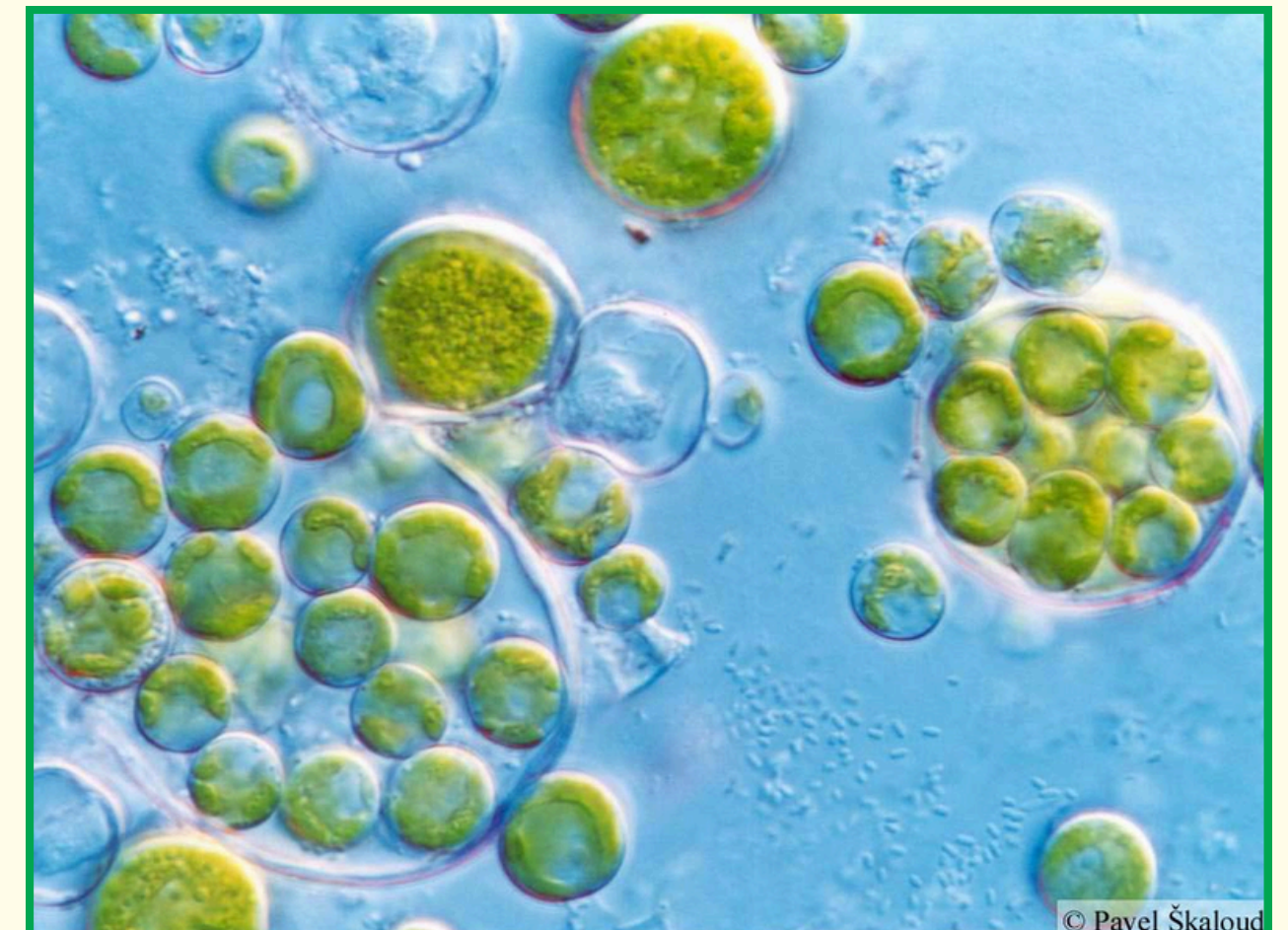
- Produtoras de **triglicerídeos**:
 - Nannochloropsis, Chlorella vulgaris, Skeletonema costatum, Neochloris oleoabundans, Scenedesmus;
- Produtoras de **alcóóis**:
 - Porphyridium cruentum, Scenedesmus dimorphus, Neochloris aquatica;
- Produtoras **hidrogênio e/ou metano**:
 - Gelidium amansii, Chlamydomonas reinhardtii, Scenedesmus, Arthrospira)



Chlorella vulgaris



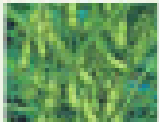
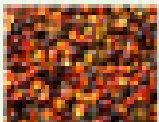
Scenedesmus dimorphus



Dictyochloropsis splendida

Fonte: ŠKALLOUD, P. 2008.

COMPARAÇÃO

Oil Source	Biomass (Mt/ha/yr)	Oil Content (% drymass)	Biodiesel (Mt/ha/yr)	Energy Content (boe/1000ha/day)
 Soya	1-2.5	20%	0.2-0.5	3-8
 Rapeseed	3	40%	1.2	22
 Palmoil	19	20%	3.7	63
 Jatropha	7.5-10	30-50%	2.2-5.3	40-100
 Microalgae	140-255	35-65%	50-100	1,150-2,000

mt = metric tons, ha = hectare, boe = barrel of oil equivalents

Fonte: CELLANA. 2025

Table 3

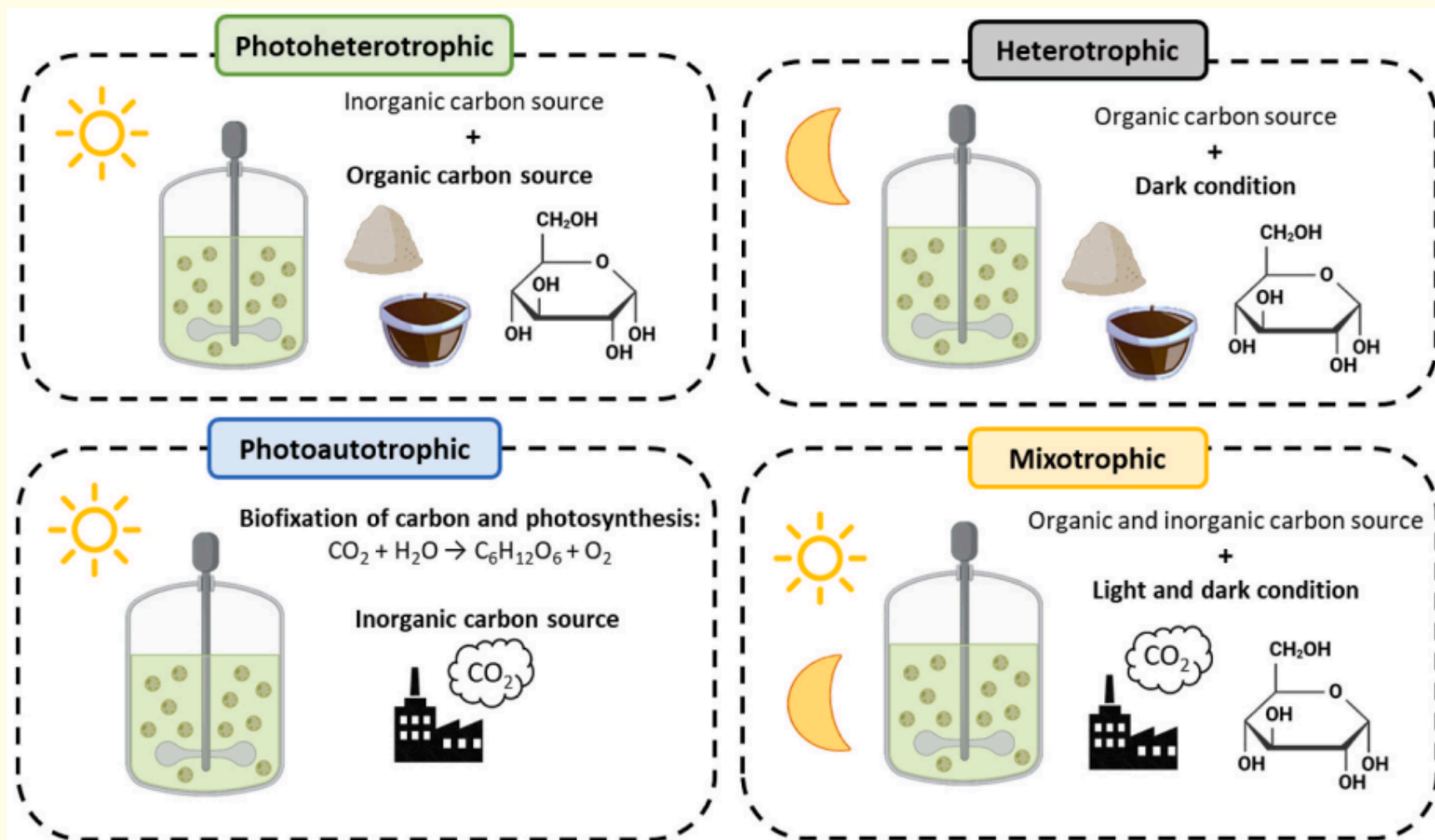
Significance of microalgae over other feedstocks in producing biodiesel. (The data was adapted with permission from Elsevier [55] for comparison purpose).

Plant source	Oil composition by wt. in biomass (%)	Oil productivity (L oil/ha/year)	Land use (m ² year/kg biodiesel)	Biodiesel productivity (kg biodiesel/ha/year)
Corn/Maize (<i>Zea mays</i>)	44	172	66	152
Soybean (<i>Glycine max</i>)	18	636	18	562
Jatropha	28	741	15	656
Canola/Rapeseed	41	974	12	862
Sunflower (<i>Helianthus annuus</i>)	40	1070	11	946
Castor (<i>Ricinus communis</i>)	48	1307	9	1156
Palm oil (<i>Elaeis guineensis</i>)	36	5366	2	4747
Microalgae (low oil content)	30	58,700	0.2	51,927
Microalgae (medium oil content)	50	97,800	0.1	86,515
Microalgae (high oil content)	70	136,900	0.1	121,104

Fonte: KHOO, Kuan Shiong et al. 2023.

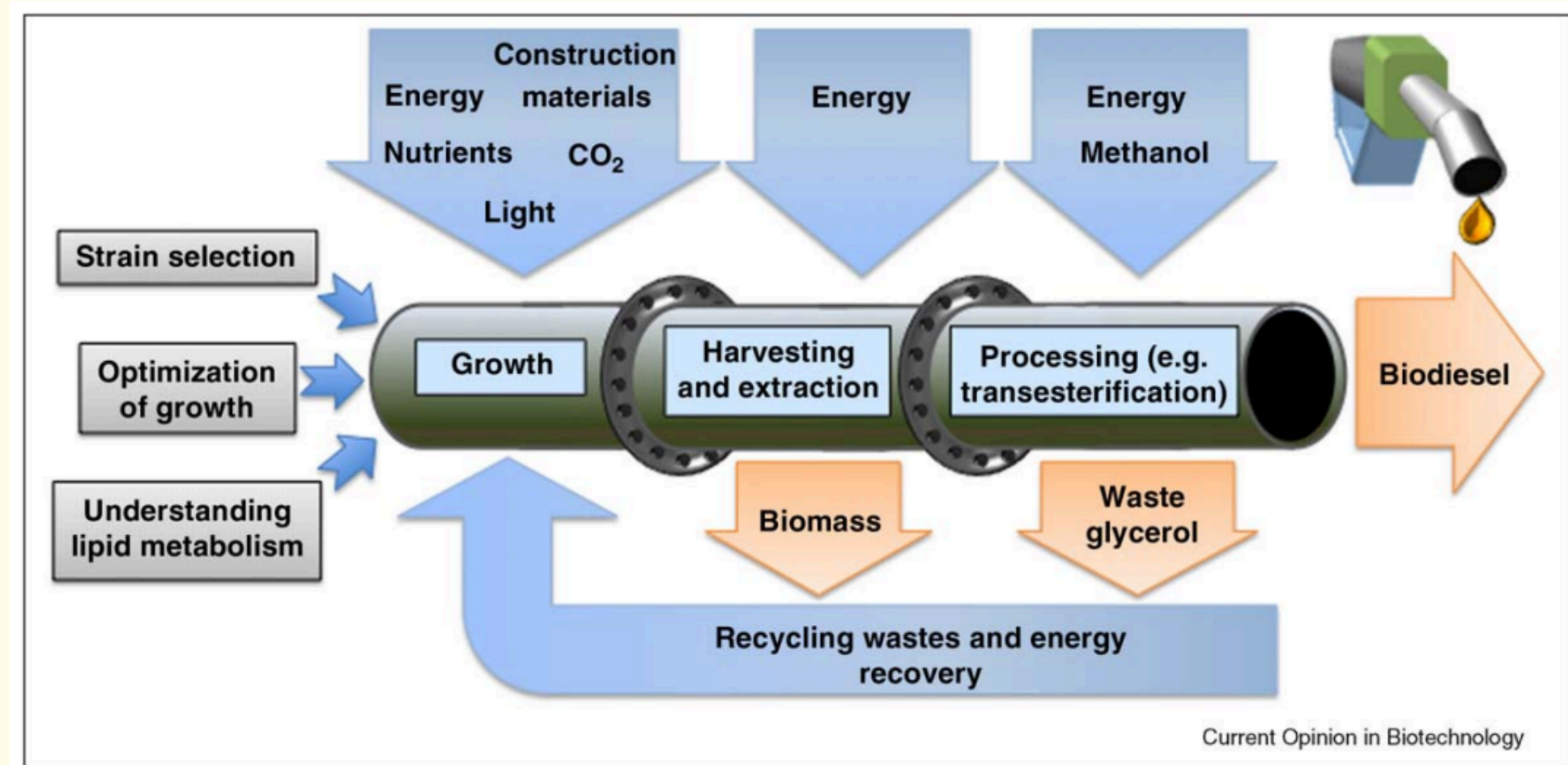
PROCESSOS E PRODUÇÃO

- Podem ser:
 - **Autotróficos** (dependente de luz);
 - **Heterotróficos** (dependente de carbono);
 - **Mixotrófico** (carbono e CO₂);
 - **Fotoheterotróficos** (luz e carbono);



Fonte: KHOO, Kuan Shiong et al. 2023.

- Para microalgas oleaginosas:
 - Etapas de colheita envolvem **centrifugação, floculação, sedimentação, microfiltração**;
 - Extração de lipídeos (**secagem, prensa, solvente**) para obtenção dos óleos.



Fonte: SCOTT, Stuart A. et al. 2010.



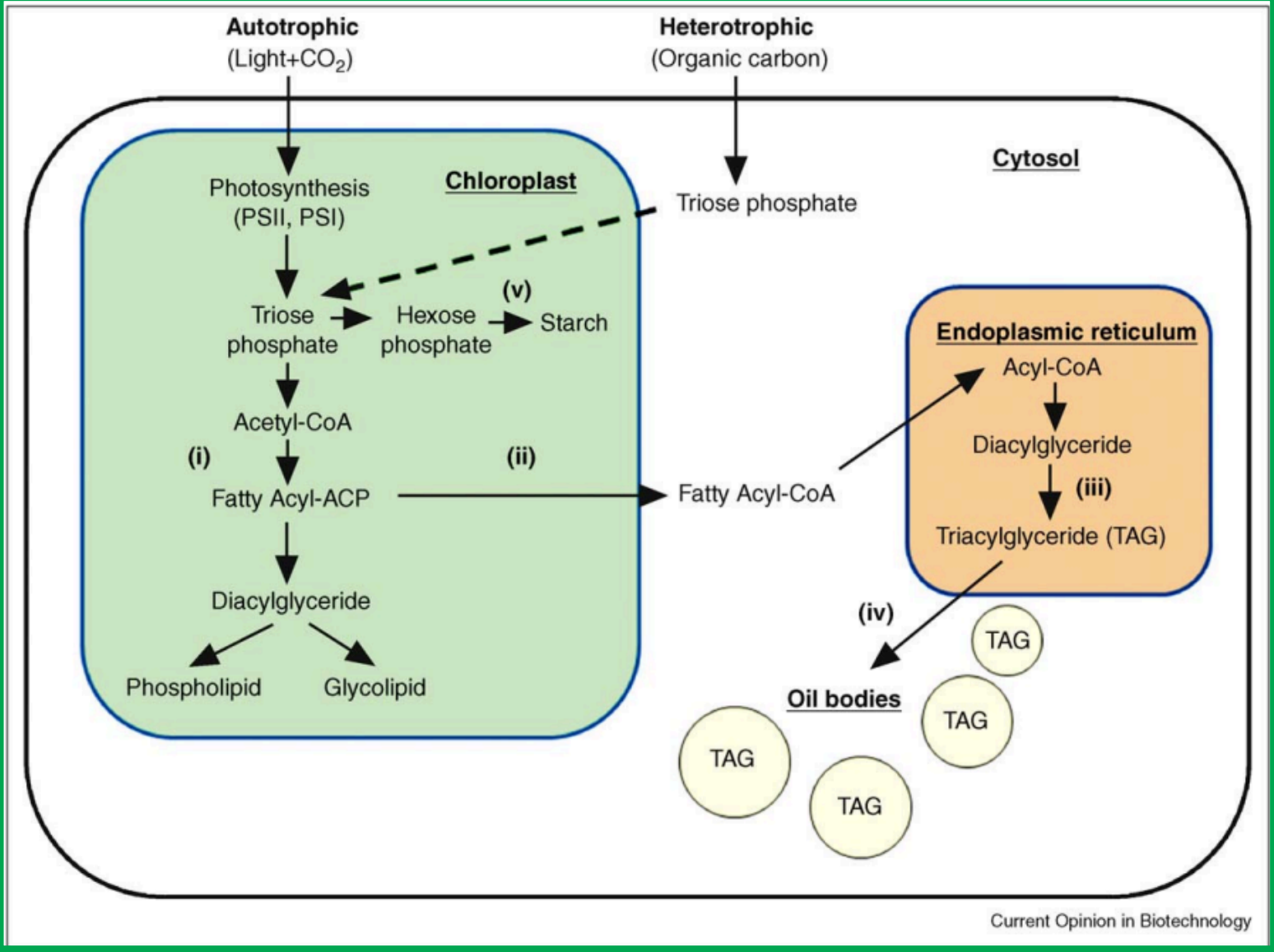
PROCESSOS E PRODUÇÃO

Parâmetro	Tanques (Raceway)	Sistemas Fechados (Fotobiorreatores)
Espaço Requerido	Muito	Pouco
Risco de contaminação	Alto	Médio a Baixo
Perda de água	Alto	Baixo
Concentração de Oxigênio	Usualmente baixa	Deve ser removido continuamente
CO ₂ - Perdas	Alto	Quase nenhuma
Reprodutibilidade da produção	Variável, mas consistente.	Possível dentro de determinadas tolerâncias
Controle de Processo	Limitado	Possível
Desgaste do material de construção	Baixo	Usualmente Alto
Temperatura	Variável, mas consistente.	Necessário Resfriamento
Custo de colheita	Alto	Médio
Manutenção	Fácil	Difícil
Custo da Construção	Médio	Alto
Concentração de biomassa na colheita	Baixo	Alto

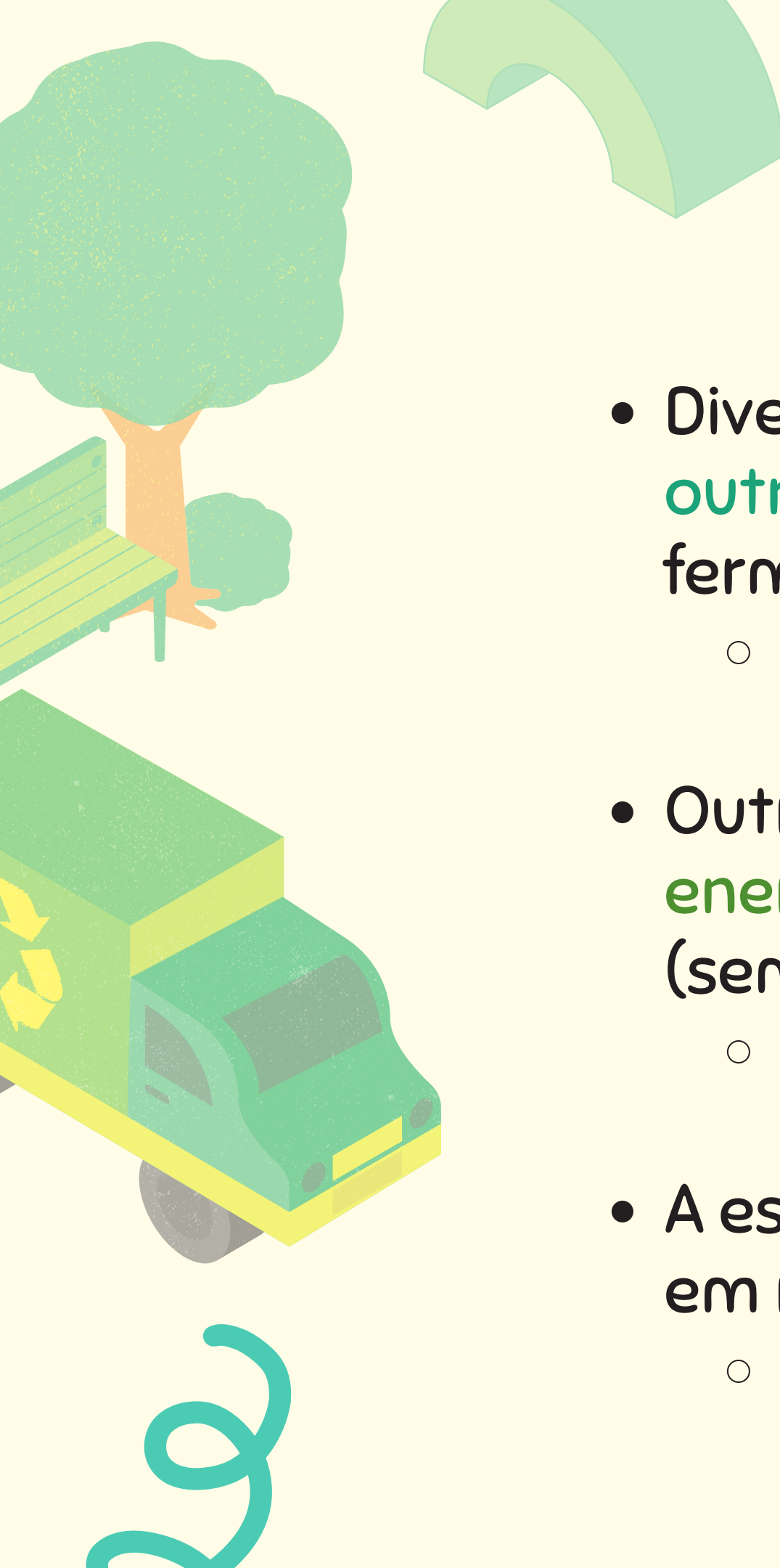


MECANISMO

- As duas principais rotas condicionam uma priorização do **armazenamento de energia** das algas (originalmente de proteínas) em lipídeos;
 - Ácidos graxos de **12 a 18** carbonos: Mirístico (C14:0), Palmitico (C16:0), Estearico (C18:0), Oleico (C18:1) e seus derivados insaturados;
- Recentemente pesquisas avaliam superexpressão e deleção de genes (Engenharia Metabólica) para ganho na produção **triglicerídeos (TAG's)**;



Espécie de Microalga	Teor de Óleo (% peso seco)
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75
<i>Chlorella sp.</i>	28-32
<i>Cohnii Cryptocodinium</i>	20
<i>Cylindrotheca sp.</i>	16-37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis sp.</i>	25-33
<i>Monallanthus salina</i>	> 20
<i>Nannochloris sp.</i>	20-35
<i>Nannochloropsis sp.</i>	31-68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35-54
<i>Nitzschia sp.</i>	45-47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20-30
<i>Schizochytrium sp.</i>	50-77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15-23



ESTADO DA ARTE

- Diversos trabalhos defendem que a produção esteja **associada à outras usinas** (ex. água residuária esgoto, uso de CO₂ da fermentação de etanol, tratamento água de piscicultura e outros);
 - CARNEIRO et al. 2018; SOUZA et al. 2015; SILVA et al. 2015.
- Outros discorrem sobre os principais problemas: **elevado gasto energético** de processo e dificuldade de **avaliação econômica** (sem relação à experimentação prática);
 - CARNEIRO et al. 2017; SCOTT et al. 2010.
- A estimativa de custo do **biodiesel de algas** ainda é muito elevado em relação à **biodiesel 1G ou 2G**
 - **\$ 7,9 a 10,6 USD/GGE** vs **\$ 2,6 a 4,3 USD/GGE**

ESTADO DA ARTE



P&D biocombustíveis de algas NREL
Laboratory Directed Research and
Development (LDRD)

- Autores projetam que sistemas mais viáveis **não devam surgir até 2030** (PATNAIK, Reeza; MALLICK, Nirupama. 2021).
 - Dificuldade estabelecer **monoculturas** de algas;
 - Desafios de **escalamento** da produção;
 - Complexidade advinda da **engenharia genética**;
 - Desconexão entre **áreas de estudo** (biologia vs engenharia)
- Alguns dos laboratórios de pesquisa ao redor do mundo:
 - EUA: projetos financiados e associados à **NREL (National Renewable Energy Laboratory)**:
 - Colorado Center for Biorefining and Biofuels (B2C2);
 - Sandia National Laboratories (SNL);
 - Algenol Biofuels e Dow Chemical Company;

ESTADO DA ARTE



Fotobioreatores (70L)– (Algo-Lab)
Universidade de Bologna

- Alguns dos laboratórios de pesquisa ao redor do mundo:
 - **Itália: Università di Bologna;**
 - Laboratory of Algal Biology (Algo-Lab), Departamento de Ciências Biológicas, Geológicas e Ambientais (Cultivo e crescimento algas);
 - **Alemanha: Universität Duisburg-Essen (Ruhr);**
 - Probst Lab, Departamento de Metagenômica Ambiental; (Sub-projeto: GeneOil e MultiKulti)
 - **China: 中国科学院 (Academia Chinesa de Ciências),** Instituto de tecnologias de bioenergia e bioprocessos de Qinqdao;
 - Microalgae Biotechnology Group;

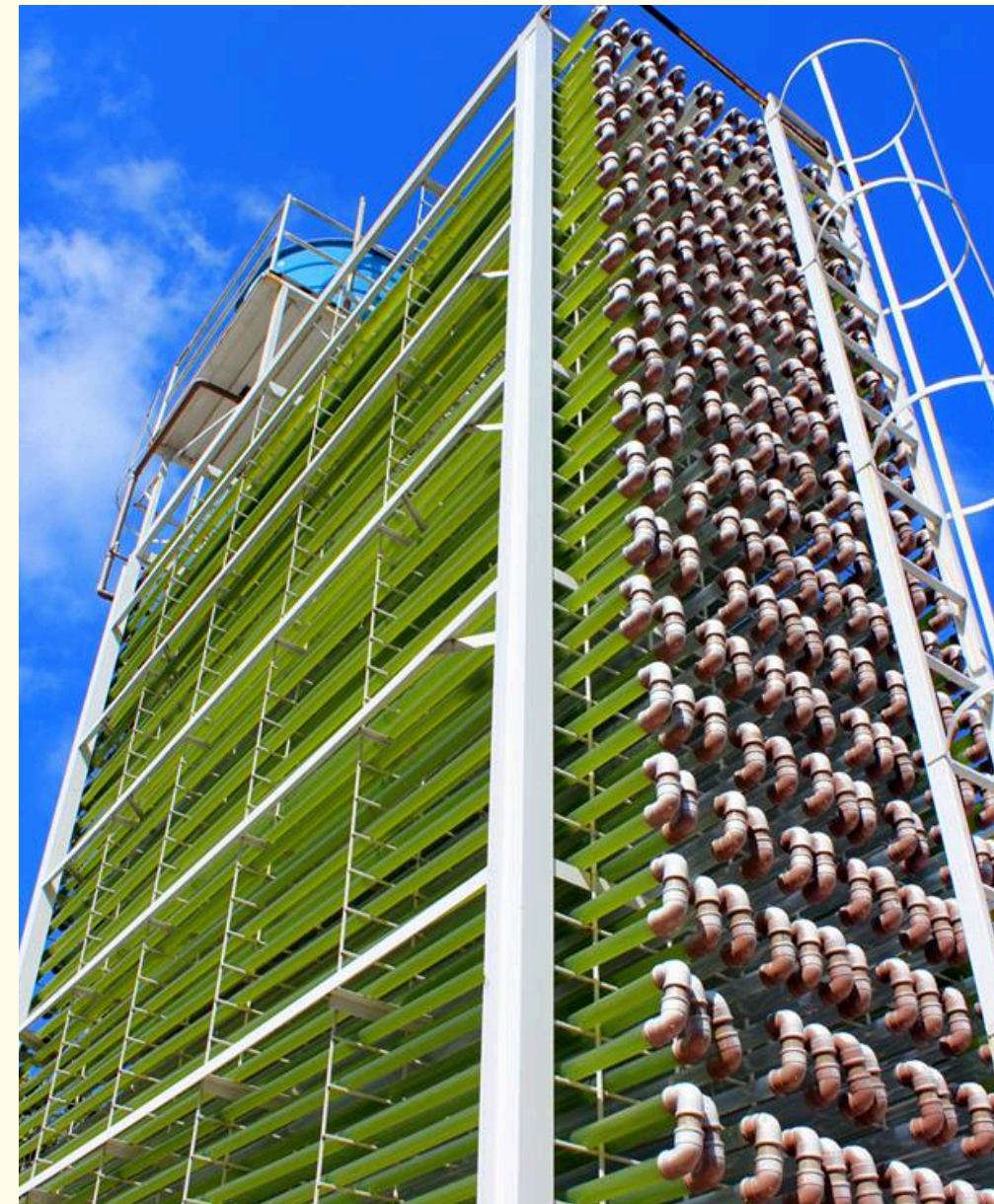
ESTADO DA ARTE

(BRASIL)

- Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN):
 - Planta piloto instalada com investimento da Petrobrás e Embrapa;
 - 100m² de área, 6000L e rendimento 30g/m²/dia;



- Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS)
 - Núcleo na Universidade Federal do Paraná (UFPR)



ESTADO DA ARTE

(BRASIL)



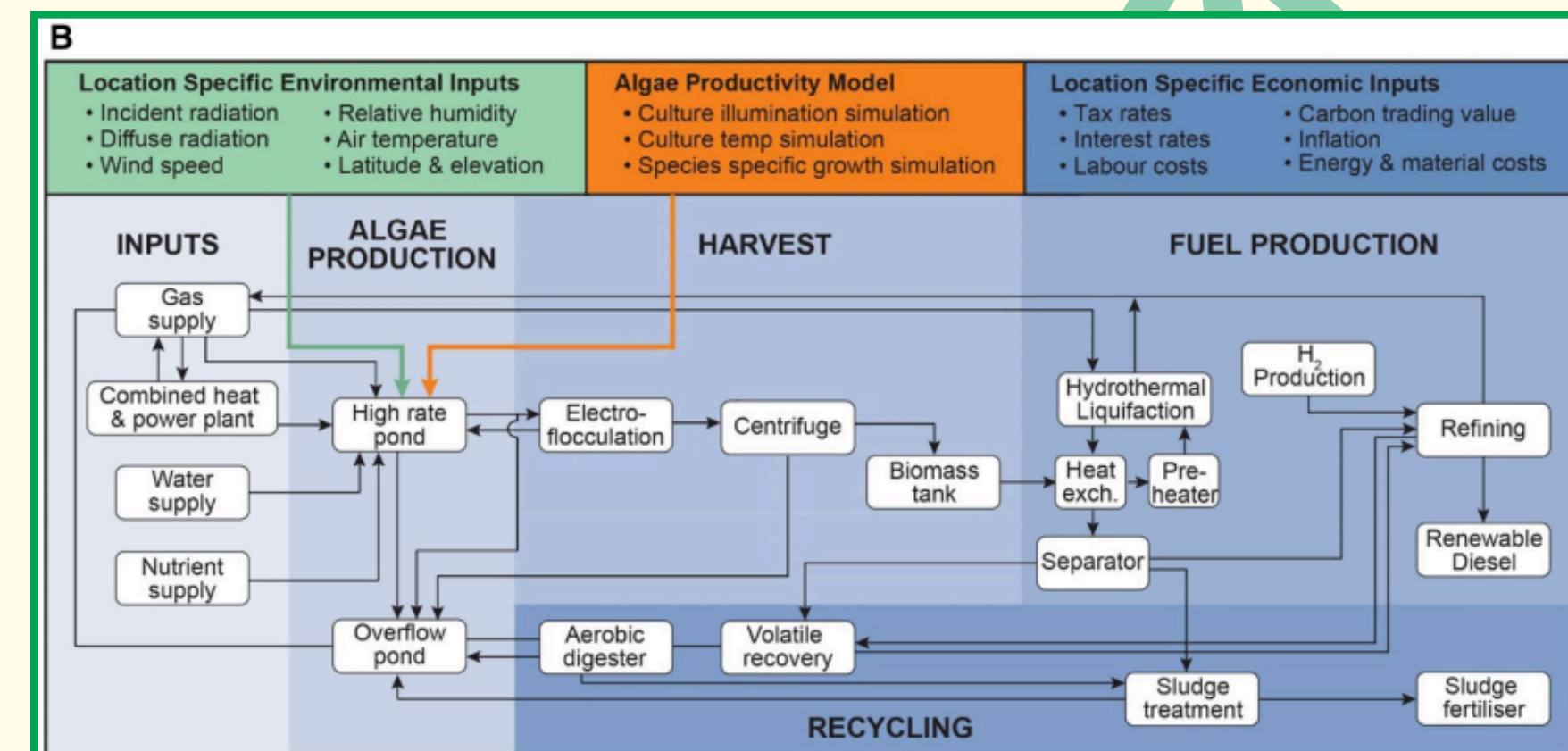
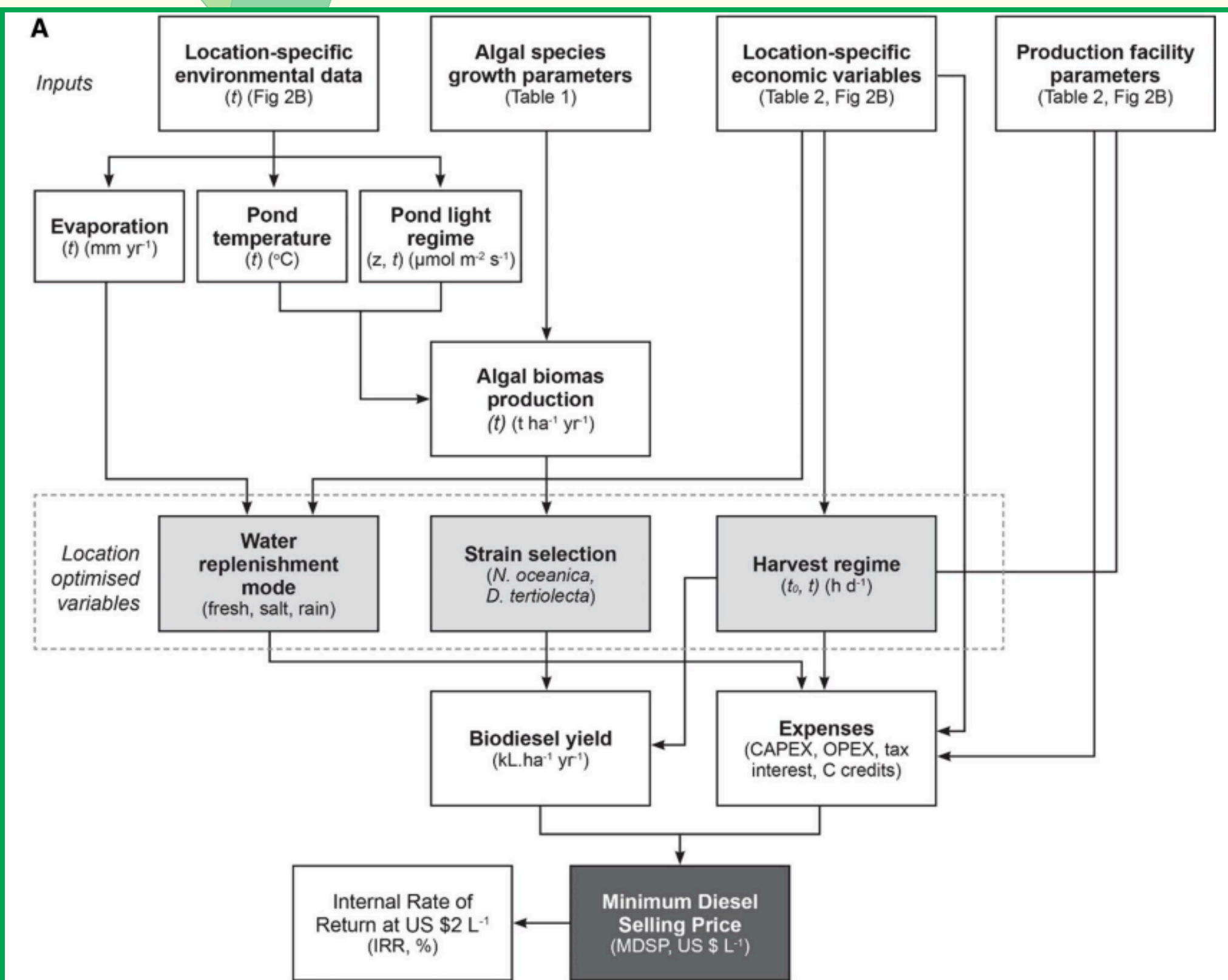
- **Laboratório de Cultivo de Algas (LCA)**
 - Laboratório da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
 - Associado ao Laboratório de Camarões Marinhos (LCM)
- **Laboratório de Biotecnologia de Microalgas (LABIM)**
 - Parte do Instituto Nacional de Tecnologia (INT)
- **Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes)**
 - Unidade de P&D da Petrobrás



Laboratório de Cultivo de Algas - LCA/UFSC

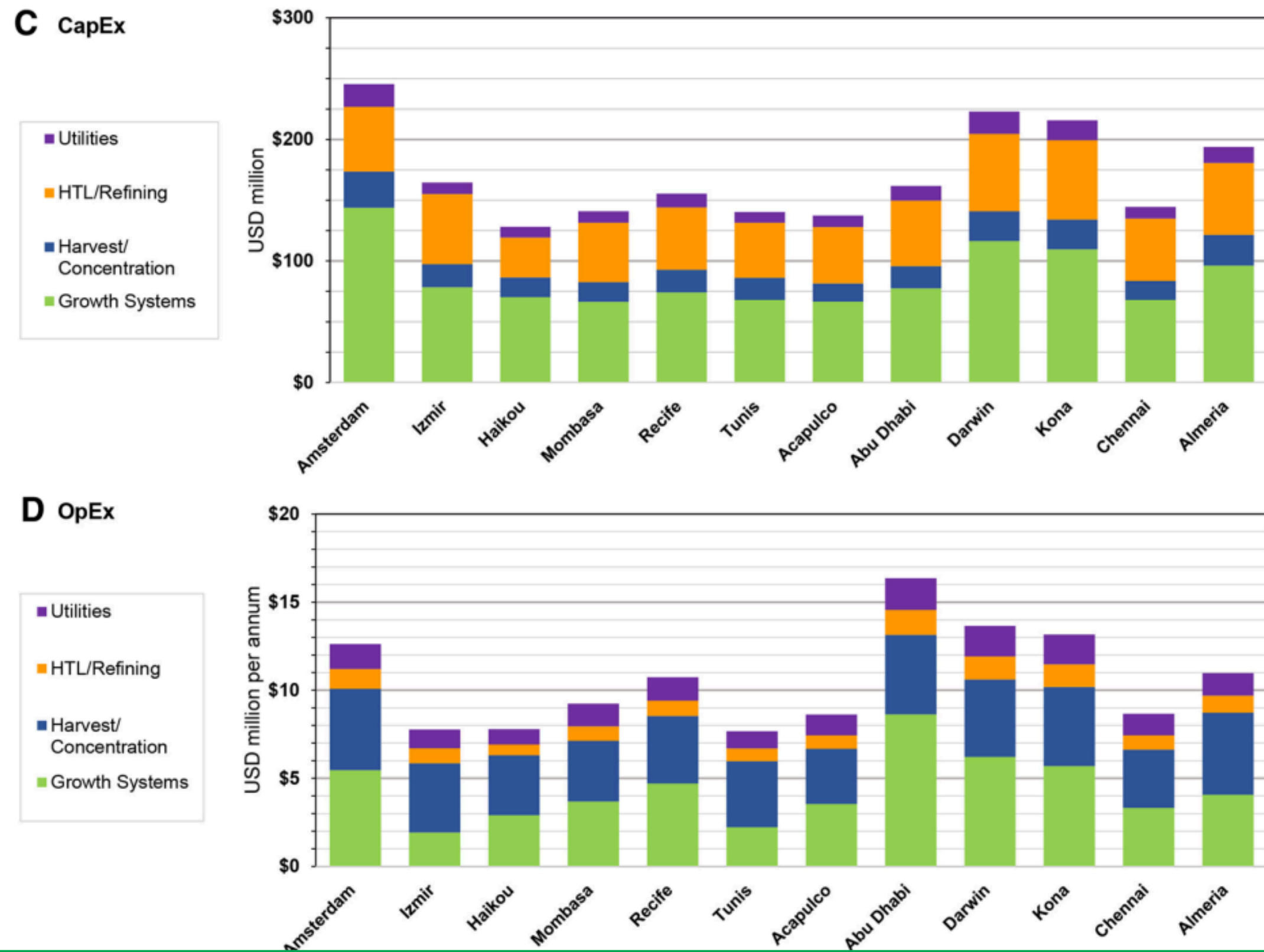
DISCUSSÃO

- É atribuído como sendo o principal motivo no atraso de desenvolvimento dessa tecnologia a **falta de padronização** de metodologias e descrição de **processos e parâmetros**;
- Poucos trabalhos apresentam análises econômica detalhada;
 - Roles (2021) realiza uma avaliação em **12 localidades** diferentes ao redor do globo;
 - Estima **custo biodiesel** (\$USD/L) e variação de parâmetros econômicos: **CAPEX, OPEX e TIR**;
 - Inclui: **custo de mão de obra, terreno, construção, energia + temperatura, evaporação e irradiação local**;
 - Considera 500ha (5 km² de área) com 2 modelos: comum e s/ lucro;



		<i>D. tertiolecta</i>	<i>N. oceanica</i>
Min temp, $^{\circ}\text{C}$ [37]	$T_{\min}$	5	-0.2
Optimum temp (max growth), $^{\circ}\text{C}$ [37]	T_{opt}	32.6	26.7
Max temp, $^{\circ}\text{C}$ [37]	$T_{\max}$	38.9	33.3
max growth rate, day^{-1} [37]	$\mu_{\max}$	3.5	1.85
Half saturation irradiance, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ [39]	K_s	58	29
Optimum irradiance, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ [39]	I_{opt}	275	203
Mass absorption coefficient, $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ [40]	E_a	141	178
Basal respiration rate, day^{-1} [41]	R_b	0.2	0.2

	TEA summary			Productivity (annual avg)			Carbon emissions	
	For-profit (S1)		Public utility (S2)	DW biomass	Max. DW biomass	Biodiesel	CO _{2eq}	Reduction to fossil
	IRR	MDSP before profit	MDSP					
	(at US\$2 L ⁻¹)	US\$ L ⁻¹ (US\$ gal ⁻¹)	US\$ L ⁻¹ (US\$ gal ⁻¹)	g m ⁻² day ⁻¹	g m ⁻² day ⁻¹	kL ha ⁻¹ year ⁻¹	g MJ ⁻¹	
Mombasa (KEN)	22.1%	\$1.60 (\$6.04)	\$1.24 (\$4.69)	22.1	29.1	44.7	25	– 72.8%
Acapulco (MEX)	20.8%	\$1.54 (\$5.82)	\$1.17 (\$4.42)	20.0	28.7	40.4	26	– 71.7%
Chennai (IND)	20.2%	\$1.51 (\$5.70)	\$1.15 (\$4.35)	19.8	28.4	40.0	25	– 72.8%
Recife (BRA)	19.0%	\$1.57 (\$5.93)	\$1.19 (\$4.50)	21.9	29.9	44.3	27	– 70.7%
Darwin (AUS)	13.2%	\$1.53 (\$5.80)	\$1.23 (\$4.67)	21.7	28.4	43.8	26	– 71.7%
Tunis (TUN)	13.3%	\$1.55 (\$5.87)	\$1.24 (\$4.68)	15.0	20.6	30.3	28	– 69.6%
Kona (USA)	13.0%	\$1.53 (\$5.79)	\$1.24 (\$4.68)	21.0	26.8	42.4	27	– 70.7%
Abu Dhabi (UAE)	11.5%	\$1.54 (\$5.84)	\$1.47 (\$5.58)	17.5	24.3	35.3	30	– 67.4%
Almeria (SPA)	10.9%	\$1.48 (\$5.61)	\$1.23 (\$4.66)	15.8	20.6	31.9	28	– 69.6%
Haikou (CHN)	9.5%	\$1.85 (\$6.99)	\$1.59 (\$6.01)	11.5	16.2	23.3	37	– 59.8%
Izmir (TUR)	1.0%	\$2.57 (\$9.73)	\$2.21 (\$8.35)	13.8	18.8	27.8	27	– 70.7%
Amsterdam (NDL)	– 7.0%	\$2.79 (\$10.55)	\$2.61 (\$9.87)	8.6	11.3	17.4	37	– 59.8%



- CAPEX médio:
 - 130 a 250 milhões (USD);
- OPEX médio:
 - 7,7 a 16,4 milhões (USD)
- Custo mínimo biodiesel:
 - 1,85 USD/L (10 de 12 locais)
- Referência ao diesel comum;
 - ~0,8 USD/L
- Amsterdã teve o pior desempenho (mão de obra cara e temperatura amena)

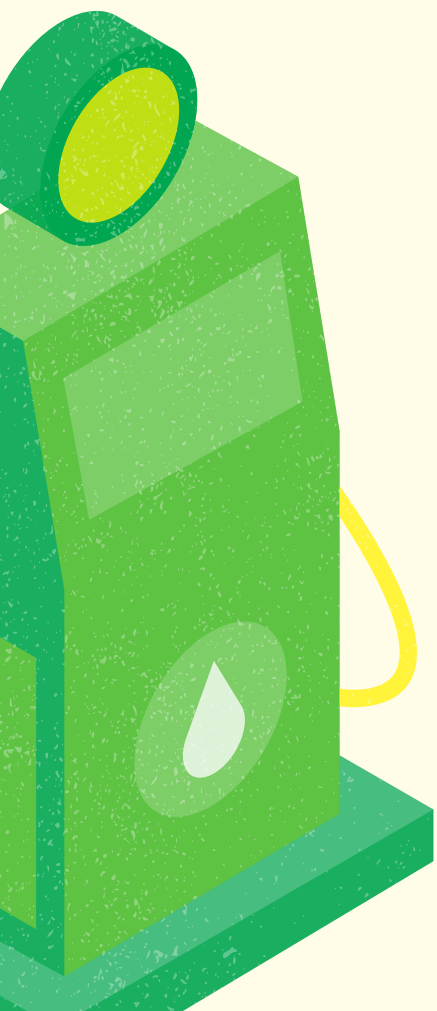
COMENTÁRIOS FINAIS

- Vantagens:
 - Maior produção em curto período de tempo;
 - Cultivo em locais inóspitos (terras não-aráveis, corpos d'água altamente salinos, esgotos) e expansão vertical;
 - Alta captura de CO₂ e reuso de nutrientes;
 - Versatilidade na produção de produtos secundários;
- Desvantagens:
 - Elevado custo e escalonamento complexo;
 - Variabilidade de espécies;
 - Inviabilidade em algumas regiões (ex: países muito frios);



REFERÊNCIAS

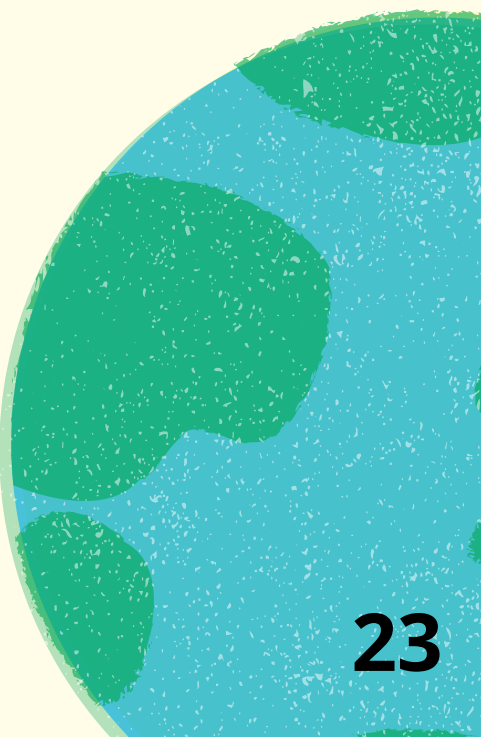
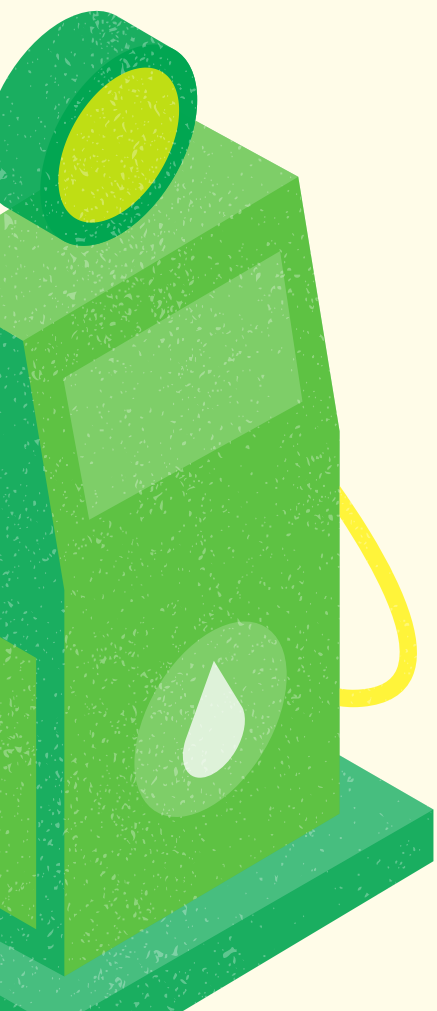
- SOUZA, Simone P.; GOPAL, Anand R.; SEABRA, Joaquim EA. Life cycle assessment of biofuels from an integrated Brazilian algae–sugarcane biorefinery. *Energy*, v. 81, p. 373–381, 2015.
- SCOTT, Stuart A. et al. Biodiesel from algae: challenges and prospects. *Current opinion in biotechnology*, v. 21, n. 3, p. 277–286, 2010.
- CARNEIRO, Maria Luisa NM et al. Potential of biofuels from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 73, p. 632–653, 2017.
- ALAM, Firoz et al. Biofuel from algae–Is it a viable alternative?. *Procedia Engineering*, v. 49, p. 221–227, 2012.
- CARNEIRO, Gillianne Assis et al. Uso de microalgas para produção de biodiesel. *Research, Society and Development*, v. 7, n. 5, p. e1075181–e1075181, 2018.
- PATNAIK, Reeza; MALLICK, Nirupama. Microalgal biodiesel production: realizing the sustainability index. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 9, p. 620777, 2021.
- SILVA, Rafael Mariano Dantas; BACHOLSKY, Richard Guimarães; DE MEDEIROS JERONIMO, Carlos Enrique. Produção de biodiesel por algas: integração com processos de carcinicultura. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, p. 713–724, 2015.
- ROLES, John et al. Techno–economic evaluation of microalgae high–density liquid fuel production at 12 international locations. *Biotechnology for Biofuels*, v. 14, n. 1, p. 133, 2021.





REFERÊNCIAS

- RAVINDRAN, Balasubramani et al. Microalgae potential and multiple roles—current progress and future prospects—an overview. Sustainability, v. 8, n. 12, p. 1215, 2016.
- MENDES, Leonardo B. B. Recent advances of micro-algal biotechnology in Brazil. Journal of Aquaculture & Marine Biology. Vol 5. 2017.
- CASANOVA, Livia Marques et al. Development of microalgae biodiesel: Current status and perspectives. Microorganisms, v. 11, n. 1, p. 34, 2022.
- FALFUSHYNSKA, Halina. Advancements and prospects in algal biofuel production: a comprehensive review. Phycology, v. 4, n. 4, p. 548–575, 2024.
- JHA, Saket et al. Recent aspects of algal biomass for sustainable fuel production: a review. Discover Sustainability, v. 5, n. 1, p. 300, 2024.
- KHOO, Kuan Shiong et al. Enhanced microalgal lipid production for biofuel using different strategies including genetic modification of microalgae: A review. Progress in Energy and Combustion Science, v. 96, p. 101071, 2023.
- TIKANNEN, A. Soybean. Site informativo. <<https://www.britannica.com/plant/soybean>>. 2025.
- JAGDISH. Sugarcane Farming in Brazil: Exploring Varieties, Cultivation, Production Costs and Profit. Artigo Online. Disponível em: <https://www.agrifarming.in/sugarcane-farming-in-brazil-exploring-varieties-cultivation-production-costs-and-profit#google_vignette>. 2024

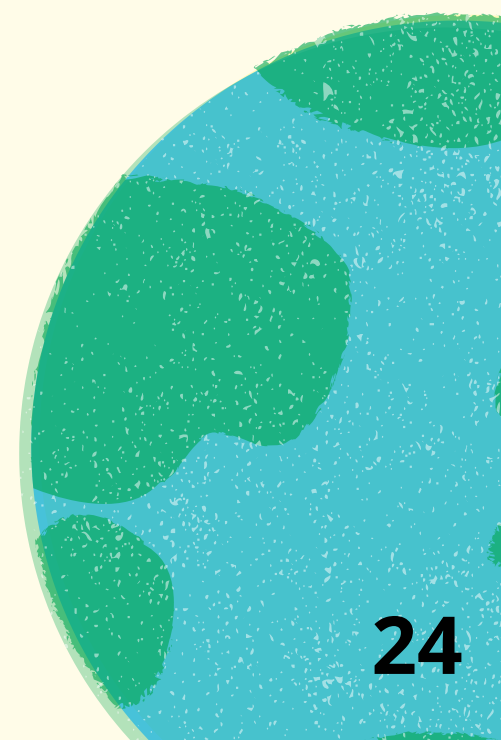
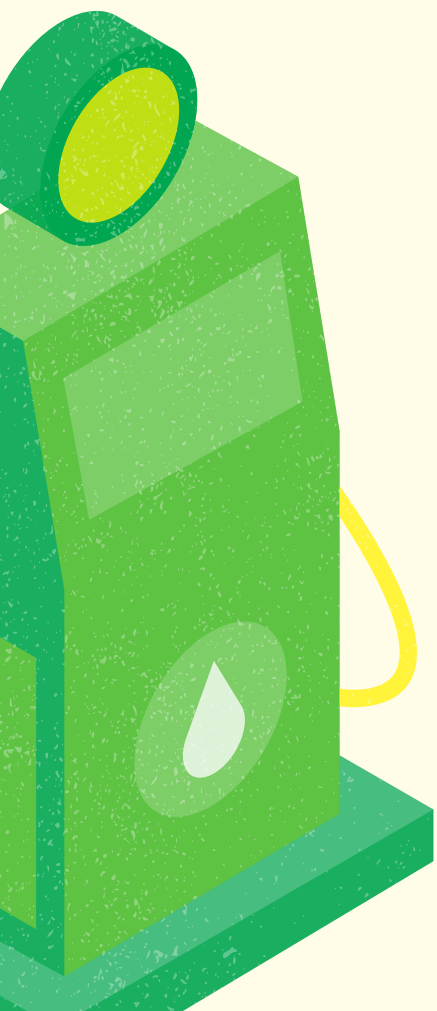




REFERÊNCIAS



- LET'S TALK SCIENCE. Introduction to biofuels. Artigo online. Disponível em: <https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-explained/introduction-biofuels>. 2019.
- DARZINS, Al. The Promises and Challenges of Algal-Derived Biofuels. Apresentação Workshop IEA. NREL. 2009.
- JHA, Saket et al. Recent aspects of algal biomass for sustainable fuel production: a review. Discover Sustainability, v. 5, n. 1, p. 300, 2024
- ŠKALOUD, P. List of aero-terrestrial algae found on Boreč hil. Base de dados fotográfica. Departamento de botânica da Universidade Charles de Praga, República Tcheca. 2008.
- CELLANA. Microalgae Provide a Cost-effective and More Sustainable Supply of Oil. 2025.





OBRIGADO!