



REVISTA ELETRÔNICA  
CIENTÍFICA DA UERGS

# Estimativa de produção de álcool de segunda geração de plantas de cobertura de solo

## Jackson Eduardo Schmitt Stein

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS).

E-mail: jackson.s.stein@hotmail.com, <http://lattes.cnpq.br/2183664958159614>

## Eduardo Canepelle

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS).

E-mail: eduardocanepelle@gmail.com, <http://lattes.cnpq.br/9610736541010188>

## Rodrigo Rotili Júnior

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS).

E-mail: rodrigorotili01@gmail.com, <http://lattes.cnpq.br/1447686658922754>

## Divanilde Guerra

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS).

E-mail: divanilde-guerra@uergs.edu.br, <http://lattes.cnpq.br/9759850350175482>

## Danni Maise da Silva

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS).

E-mail: danni-silva@uergs.edu.br, <http://lattes.cnpq.br/2971607375965625>

## Marciel Redin

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS).

E-mail: marciel-redin@uergs.edu.br, <http://lattes.cnpq.br/7912908707815307>

ISSN 2448-0479. Submetido em: 28 jul. 2021. Aceito: 14 fev. 2022.

DOI: <http://dx.doi.org/10.21674/2448-0479.81.63-72>

## Resumo

O grande desafio para a produção de álcool de segunda geração (Álcool 2G) é encontrar fontes baratas de materiais lignocelulósicos. O objetivo foi avaliar o rendimento teórico de álcool 2G a partir da biomassa seca de plantas de cobertura do solo. Neste estudo foram utilizadas seis das espécies mais representativas de primavera/verão: *Mucuna cinza* (*Mucuna pruriens*), feijão de porco (*Canavalia ensiformis*), crotalária espectável (*Crotalaria spectabilis*), crotalária juncea (*Crotalaria juncea*), guandu anão (*Cajanus cajan*) e milho (*Pennisetum glaucum*). A produção de matéria seca, a composição química dos resíduos culturais e os posteriores rendimentos em hidrólise e fermentação foram obtidos através de cálculos utilizando-se dados de literatura. Foram testados diferentes cenários de remoção/utilização da biomassa produzida pelas espécies: 1) 100%, 2) 75%, 3) 50% e 4) 25%. O rendimento médio de álcool variou de 2.121 (mucuna cinza, feijão de porco e crotalária spectabilis) a 8.876 litros/ha no milho. Com a utilização de apenas 25% da biomassa do milho é possível produzir 2.219 litros de álcool por hectare e, por outro lado, somente 418 litros com a cultura da mucuna cinza. As culturas do milho e guandu anão, com utilização de 75% e 50% da biomassa seca, respectivamente, mostram-se espécies potenciais para produção de álcool 2G e com sobra acima de 5 ton/ha de resíduos culturais para proteção do solo.

**Palavras-chave:** Etanol; aproveitamento energético; biomassa; energia sustentável.



## Abstract

### Estimate of second-generation alcohol production from cover crop plants

The great challenge for the production of second-generation alcohol (2G Alcohol) is to find cheap sources of lignocellulosic materials. The aim was to evaluate the theoretical yield of 2G alcohol from the dry biomass of cover crops. Six of the most representative species of spring/summer were used in this study: Gray mucuna (*Mucuna pruriens*), jack bean (*Canavalia ensiformis*), showy rattlebox (*Crotalaria spectabilis*), crotalaria juncea (*Crotalaria juncea*), dwarf pigeonpea (*Cajanus cajan*) and millet (*Pennisetum glaucum*). Dry matter production, chemical composition of crop residues and subsequent hydrolysis and fermentation yields were obtained through calculations using literature data. Different scenarios for the removal/use of biomass produced by the species were tested: 1) 100%, 2) 75%, 3) 50% and 4) 25%. The average alcohol yield ranged from 2,121 (grey mucuna, jack bean and showy rattlebox) to 8,876 liters/ha in millet. With the use of only 25% of the millet biomass, it is possible to produce 2,219 liters of alcohol per hectare and, on the other hand, only 418 liters with the cultivation of gray mucuna. The millet and dwarf pigeonpea plants, with use of 75% and 50% of dry biomass, respectively, are potential species for the production of 2G alcohol and with a surplus of more than 5 ton/ha of crop residues for soil protection.

**Keywords:** Ethanol; energy use; biomass; sustainable energy.

## Resumen

### Estimación de la producción de alcohol de segunda generación de cultivos de cobertura del suelo

El gran desafío para la producción de alcohol de segunda generación (alcohol 2G) es encontrar fuentes baratas de materiales lignocelulósicos. El objetivo fue evaluar el rendimiento teórico de alcohol 2G a partir de la biomasa seca de cultivos de cobertura. En este estudio se utilizaron seis de las especies más representativas de la primavera/verano: mucuna gris (*Mucuna pruriens*), frijol cerdo (*Canavalia ensiformis*), crotalaria spectabilis (*Crotalaria spectabilis*), crotalaria juncea (*Crotalaria juncea*), gandul enano (*Cajanus cajan*) y mijo (*Pennisetum glaucum*). La producción de materia seca, la composición química de los residuos de los cultivos y los rendimientos posteriores de hidrólisis y fermentación se obtuvieron mediante cálculos utilizando datos de la literatura. Se probaron diferentes escenarios para la remoción/uso de biomasa producida por la especie: 1) 100%, 2) 75%, 3) 50% y 4) 25%. El rendimiento alcohólico medio osciló entre 2.121 (mucuna gris, frijol cerdo y crotalaria spectabilis) y 8.876 litros/ha en mijo. Con el uso de 25% de la biomasa de mijo es posible producir 2.219 litros de alcohol por hectárea y, por otro lado, solamente 418 litros con el cultivo de mucuna gris. Los cultivos de mijo y gandul enano, con uso de 75% y 50% de biomasa seca, respectivamente, son especies potenciales para la producción de alcohol 2G y con un excedente superior a 5 ton/ha de residuos de cultivos para protección de suelos.

**Palabras clave:** Etanol; aprovechamiento energético; biomassa; energía sostenible.

## Introdução

O álcool surgiu como alternativa a fontes não renováveis do petróleo, gás natural e carvão e seus primeiros usos no Brasil ocorreram no início do século XX e naquele momento o Brasil importava cerca de 80% do petróleo consumido (LEITE; CORTEZ, 2007). O uso de combustíveis fósseis como o petróleo traz consigo diversos efeitos colaterais atrelados a crescente demanda energética mundial, alguns dos principais efeitos são o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE's), aquecimento global e o aumento do preço do produto e seus derivados (EPE, 2020). Desta forma, o uso de biocombustíveis, como o álcool de segunda geração (Álcool 2G), é visto como uma alternativa viável, devido a necessidade crescente por alternativas de fontes de energia limpa (FIGUEIREDO; GIOCONDO CÉSAR, 2021). O álcool 2G, consiste em mitigar os efeitos do avanço do aquecimento global e competir economicamente com combustíveis fósseis como o petróleo (ROSA; GARCIA, 2009).

A produção do álcool 2G é fortemente afetada principalmente pela composição química dos diferentes tipos de biomassa. Além da preocupação industrial, outros fatores como a disponibilidade dos materiais para a



produção do álcool 2G, o baixo custo na cadeia de produção da biomassa e a geração de renda, são fatores essenciais para o sucesso econômico e ambiental. Olivério e Hilst (2005) abordam questões como a otimização dos resíduos industriais e seus potenciais usos para a geração do álcool 2G, atrelando a eficiência econômica destes processos à disponibilidade e baixo custo de resíduos industriais ou materiais lignocelulósicos. Aita et al. (2001) avaliaram os benefícios econômicos da utilização de plantas de cobertura do solo evidenciado seu baixo custo de implantação e grande produtividade de fitomassa. As plantas de cobertura do solo geralmente representam um material de baixo custo de produção e rápido crescimento. No entanto, seus usos ainda pouco são atribuídos como potenciais fontes de materiais lignocelulósicos para a indústria de álcool 2G. Além disso, as plantas de cobertura do solo, são pouco utilizadas nos períodos de entressafra de culturas principais de grãos, a geração de renda, a partir destes materiais como fonte de matéria-prima para a indústria do álcool 2G, contribui não somente para o lucro imediato, mas muito provavelmente, para a conservação do solo em um período onde muitas áreas permanecem em pousio (PACHECO et al., 2008).

Os processos de obtenção do álcool 2G consistem basicamente nas etapas de pré-tratamento dos materiais lignocelulósicos, compostos por celulose, hemicelulose e lignina, e a posterior hidrólise de seus polissacarídeos, com o propósito de gerar açúcares de qualidade para a fermentação (SANTOS et al., 2014). O principal composto químico da biomassa das plantas quando se pensa em produção de álcool 2G, é a celulose, que é um polímero de elevada massa molecular composta basicamente de glicose (Hexose) sendo a hexose o principal açúcar responsável na etapa de fermentação, os processos de obtenção de glicose são influenciados diretamente pelo rendimento de açúcares após hidrólise e a posterior fermentação (NETO, 2009). O processo de hidrólise pode ser realizado de diversas maneiras, geralmente utilizam-se meios enzimáticos, ácidos ou alcalinos, a eficiência dos processos e a otimização dos custos destas etapas é bastante variável, a ciência tem buscado excessivamente por metodologias, que sejam capazes de obter a maior quantidade de açúcares fermentáveis e de qualidade, em escala industrial, com o menor custo possível. O rendimento no processo de fermentação dos açúcares é influenciado diretamente pelos processos anteriores, o pré-tratamento e a hidrólise devem ser capazes de produzir açúcares de boa qualidade para o sucesso do processo de fermentação, alguns estudos remetem a utilização de fungos termofílicos como potencializadores deste processo (SILVA et al. 2017).

No cenário de mudanças, surgem diversas complicações e uma delas está na produção dos biocombustíveis, que resultam em conflitos entre a produção de biomassa e a produção de alimentos (ROSA e GARCIA, 2009). Diversas plantas apresentam potencial para produção de álcool 2G a partir da sua biomassa, como por exemplos, palha de cana-de-açúcar (SANTOS et al., 2012) e capim elefante (GRASEL et al., 2017). Além destes, outros trabalhos elencam a possibilidade de utilização de outros materiais provenientes das mais diferentes plantas para a produção de álcool 2G, por exemplo, pedúnculos de cajú (LIMA et al., 2015) e aguapé (TEIXEIRA et al., 2019). Pouco se discute a potencial utilização de plantas de cobertura do solo na produção de álcool 2G, tão pouco se discute, outros fatores agrônômicos como a remoção total ou parcial dos resíduos da lavoura e os seus efeitos na área de produção. As plantas de cobertura do solo, geralmente são utilizadas na agricultura com o propósito de aumentar a eficiência dos sistemas de cultivo (ANDRIOLI; PRADO, 2012), muitas destas, podem ser utilizadas nos períodos de entre safras e possuem elevada produtividade de biomassa seca. O trabalho de Conceição et al. (2005), atribui a utilização de plantas de cobertura do solo, com ganhos em qualidade do solo devido à influência positiva de forma direta e/ou indireta, nos atributos químicos, físicos e biológicos nos solos, como por exemplo, a proteção do solo contra a erosão, diminuição da degradação da matéria orgânica, influência na amplitude térmica favorecendo a germinação das sementes da cultura sucessora; além de também diminuir a lixiviação dos nutrientes e proporcionar uma série de outros benefícios à fauna edáfica do solo.

As plantas de cobertura do solo, vêm sendo atribuídas há anos para a rápida produção de biomassa com baixo custo econômico; estes, são quesitos que se alinham com o cenário agrícola atual, que está contemplado por diversos problemas associados à produção dos combustíveis convencionais, assim, as plantas de cobertura do solo surgem como alternativa à possível utilização da sua biomassa, ou parte dela, na produção do álcool 2G (OLIVEIRA et al., 2020). O uso de biocombustíveis, principalmente do setor sucroalcooleiro deve crescer 2,2% ao ano até 2050 (EPE, 2020), e até o momento existem poucas pesquisas por possíveis fontes de matéria-prima que resultem em baixo custo de implantação e rápido crescimento para a produção de álcool 2G. Além disto, a busca por biomassas com o propósito de obtenção do álcool 2G de celulose vem crescendo

nos últimos anos (FERREIRA, 2015), a celulose corresponde à substância de maior conteúdo na biomassa e apresenta uma alta eficiência para produção de álcool 2G quando submetido à reações de hidrólise. As plantas de cobertura de solo, podem apresentar conteúdo de celulose em seus tecidos iguais ou maiores que os encontrados em palha de cana-de-açúcar por exemplo.

Neste contexto, associado a incipientes estudos, sobretudo de artigos científicos, sobre a utilização da biomassa de plantas de cobertura do solo, que segundo Silva *et al.* (2017), são ricas em celulose como fonte de matéria-prima para a produção de álcool 2G, surge a necessidade de trabalhos para mostrar o potencial do uso da sua biomassa, total ou parcial, no rendimento de álcool 2G. Assim, o objetivo foi avaliar o rendimento teórico de álcool 2G a partir da biomassa seca de plantas de cobertura do solo.

## Material e Métodos

A estimativa de produção de álcool 2G foi realizada a partir dos dados de literatura de produção de matéria seca e composição química dos resíduos culturais de plantas de cobertura de solo do trabalho de Redin *et al.* (2018). Para o presente estudo da estimativa teórica de produção de álcool 2G foram selecionadas seis espécies mais representativas de primavera/verão: *Mucuna cinza* (*Mucuna pruriens*), feijão de porco (*Canavalia ensiformis*), crotalaria espectábilis (*Crotalaria spectabilis*), crotalaria juncea (*Crotalaria juncea*), guandu anão (*Cajanus cajan*) e milheto (*Pennisetum glaucum*).

Para o rendimento teórico de álcool 2G (pré-tratamento, hidrólise e fermentação dos materiais) foi realizado cálculo a partir dos modelos propostos por Santos *et al.* (2012); Almeida (2019), onde foram utilizadas as palhas de gramíneas como referência, cana-de-açúcar e sorgo granífero. A utilização desses modelos deve-se a restritos trabalhos que expressem o rendimento de álcool 2G das plantas estudadas em específico, sobretudo das espécies de Fabaceae. O propósito do apanhado teórico e a contabilização destes valores é gerar uma taxa de rendimento teórica destes processos, buscando aproximar-se da realidade, uma vez que são poucos os trabalhos avaliando exclusivamente as plantas do presente estudo.

Para calcular o rendimento de celulose (RC) das diferentes biomassas, foram utilizados os valores de produtividade de matéria seca (MS) e percentagem de celulose na mesma, utilizando a seguinte fórmula:

$$\text{“RC =” Produtividade de MS em Kg/ha} \times \% \text{ Celulose na MS.}$$

No rendimento de glicose (RG) após hidrólise foi utilizado o fator de cálculo de 1,86 gramas de celulose/gramas de glicose (g/g), o fator de cálculo é a média encontrada nos trabalhos de Santos *et al.* (2012) e Almeida (2019) e foi calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$\text{RG} = \text{RC} \times 1,86$$

Para estipular o rendimento de álcool 2G após a fermentação (RAPF), foi utilizado o valor de rendimento de 0,39 gramas de glicose/gramas de álcool (g/g), o valor do rendimento é a média encontrada nos trabalhos de Santos *et al.* (2012) e Almeida (2019) e foi calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$\text{RAPF} = \text{RG} \times 0,39$$

Para calcular os valores de rendimento teórico de álcool 2G (RA) por hectare em relação à biomassa seca produzida, o resultado do rendimento de fermentação de cada tratamento foi subtraído pelo valor de 0,79 correspondente à densidade do álcool. A seguinte fórmula expressa detalhadamente o método do cálculo:

$$\text{RA} = \text{RAPF} \div 0,79$$

Para avaliar o potencial teórico de produção de álcool 2G, a partir da utilização total ou parcial dos resíduos culturais das plantas de cobertura de solo, foram testados os seguintes cenários de remoção/utilização da biomassa produzida pelas espécies: 1) 100%, 2) 75%, 3) 50% e 4) 25%. O cálculo do rendimento teórico de álcool 2G, nas diferentes culturas, foi realizado seguindo os mesmos cenários de exportação da biomassa

em estudo; assim, os diferentes cenários representam o seu respectivo rendimento em álcool 2G em relação a diferentes níveis de exportação de biomassa. Para calcular os diferentes cenários de exportação de biomassa seca e rendimento teórico de álcool 2G, foi realizado o cálculo utilizando as diferentes percentagens em relação ao valor total produzido, ou seja, no cenário 1, onde 100% da biomassa é extraída, consequentemente o rendimento de álcool 2G corresponde a 100% do volume total encontrado.

Os resultados obtidos foram comparados estatisticamente através do teste de variância (ANOVA), e as diferenças das médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) utilizando o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

## Resultados e Discussões

Ao analisar os dados de produção de matéria seca e composição química das seis espécies de plantas de cobertura de solo, os resultados mostram que embora algumas espécies produzem maior quantidade de matéria seca, nem sempre também apresentam a melhor qualidade química, pensando no rendimento em álcool 2G (Tabela 1).

**Tabela 1:** Matéria seca da parte aérea, conteúdo de celulose, rendimento teórico de glicose, hidrólise, fermentação e álcool 2G das plantas de cobertura de solo.

Culturas	MS <sup>1</sup> (Kg/ha)	CEL (%)	RC (Kg/ha)	RG (Kg/ha)	RAPF (Kg/ha)	RAPF (Kg/ha)
Mucuna cinza	5.740 d*	31,3 c	1.797 d	3.355 d	1.322 c	1.673 c
Feijão de porco	7.990 cd	26,3 d	2.101 d	3.924 d	1.546 c	1.957 c
Crotalária spectabilis	7.210 cd	40,7 b	2.934 d	5.479 d	2.159 c	2.733 c
Crotalária juncea	8.900 c	49,8 a	4.432 c	8.276 c	3.261 b	4.128 b
Guandu anão	12.220 b	40,5 b	4.949 b	9.241 b	3.641 b	4.609 b
Milheto	22.480 a	42,4 b	9.532 a	17.798 a	7.012 a	8.876 a

<sup>1</sup>MS: Matéria seca e CEL: Celulose (Redin et al., 2018). RC: Rendimento de celulose. RG: Rendimento de glicose após hidrólise. RAPF: Rendimento após fermentação. RA: Rendimento de álcool 2G. \*Letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%.

Segundo Silva et al. (2017), na produção de álcool 2G, busca-se plantas com composição mais rica em celulose em seus tecidos e de acordo com Santos et al. (2012) por ser o material mais apto a hidrólise e fermentação dos seus açúcares, e posteriormente, maior será o rendimento em álcool 2G. Nesse contexto, é possível notar que o maior conteúdo de celulose na matéria seca foi encontrado na crotalária juncea (49,8%), seguido do milheto (42,4%) e guandu anão (40,5%), e os menores na mucuna cinza (31,3%) e no feijão de porco (26,3%). Informações estas que corroboram a afirmação feita por Rocha et al. (2017) que as gramíneas, amplamente utilizadas como forrageiras, podem exercer papel adicional como culturas energéticas, pois geralmente apresentam maior conteúdo de celulose em relação às culturas anuais. O trabalho de Santos et al. (2012), que foi utilizado como referência de valores neste trabalho, encontrou percentual muito próximo, 40% de celulose, porém em palha de cana-de-açúcar. Esses resultados evidenciam o potencial de rendimento teórico de álcool 2G das plantas de cobertura do solo em relação a quantidade de celulose presente em seus tecidos. Segundo Menandro et al. (2017), a produção etanol 2G a partir da cana-de-açúcar com diferentes partes da planta e processos de produção, podem gerar uma estimativa de 247 litros para cada tonelada de palha.

O maior rendimento estimado de celulose, foi obtido com a cultura do milheto (9.532 kg/ha), seguido do guandu-anão (4.949 kg/ha), mucuna cinza, feijão de porco e crotalária spectabilis renderam em média 2.277 Kg/ha e crotalária juncea (4.432 kg/ha). De acordo com Andrade (2019), o rendimento de celulose dos materiais lignocelulósicos, está associado fortemente a qualidade química do material em que a proporção de celulose na biomassa das plantas, o principal composto químico responsável pela geração de açúcares fermentáveis, portanto, quanto maior o conteúdo de celulose, maior será os rendimentos em celulose e glicose. O rendimento da glicose após hidrólise dos resíduos das plantas de cobertura do solo seguiu o mesmo comportamento do rendimento de celulose, evidenciando que a qualidade química dos materiais (celulose) e a sua relação ao volume de matéria seca produzida são fatores determinantes para a produtividade de álcool 2G. O

maior rendimento em glicose foi obtido com a cultura do milho, rendendo 17.798 kg de glicose/ha e menor com as culturas da mucuna cinza, feijão de porco e crotalaria spectabilis com média de 4.253 kg de glicose/ha.

A fermentação dos açúcares obtidos na glicose, segundo Santos *et al.* (2014) é a etapa mais importante do processo, pois, após a fermentação é obtido o álcool 2G. A cultura do milho destacou-se em relação as outras plantas do estudo, rendendo 7.012 kg de álcool 2G/ha. As culturas de guandu anão e crotalaria juncea não diferiram estatisticamente, rendendo 3.641 e 3.261 kg de álcool 2G/ha, respectivamente. Os menores rendimentos da etapa de fermentação foram obtidos nos tratamentos com crotalaria spectabilis, feijão de porco e mucuna cinza com 2.159, 1.546 e 1.322 kg de álcool 2G/ha, respectivamente. De acordo com Neto (2009), os maiores rendimentos de álcool 2G estiveram diretamente associados ao volume da biomassa produzida, ou seja, aquelas plantas que mais produziram matéria seca, são, conseqüentemente as que apresentaram maiores produções de álcool 2G por hectare. Assim, o rendimento de álcool 2G atingiu 8.876 litros/ha na cultura do milho, sendo estatisticamente superior aos valores encontrados com as demais culturas. No entanto, se deixarmos de considerar o volume total produzido por hectare em biomassa seca por determinada cultura e passarmos a analisar um volume fixo de biomassa produzida, teríamos o maior rendimento teórico de álcool 2G daquelas plantas que possuem maior quantidade de celulose em seus tecidos. Por exemplo, a cada tonelada de biomassa seca de crotalaria juncea produzida, onde, 49,8% de seus tecidos são constituídos por celulose, teríamos um rendimento teórico de 464 litros de álcool 2G/ton de matéria seca. Neste mesmo contexto, a projeção segue uma ordem relativa ao percentual de celulose dos materiais, ou seja, a cultura do milho que possui 42,4% de celulose renderia teoricamente 395 litros de álcool 2G/ton de matéria seca, por outro lado, o feijão de porco renderia somente 244 litros de álcool 2G.

Além do conteúdo de celulose, o baixo custo de produção e manutenção da lavoura, o rápido crescimento, a possibilidade de replicação do material genético e os inúmeros benefícios ao solo, as plantas de cobertura de solo apresentam grande potencial para produção de Álcool 2G. Conforme Rocha *et al.* (2017) a diversificação das biomassas utilizadas para geração de diversos produtos agroenergéticos é essencial para ampliar a oferta de energia. Neste contexto, de acordo com Silva *et al.* (2017) as plantas de cobertura de solo são excelente matéria-prima na indústria de álcool 2G se comparados, por exemplo, com culturas que atualmente apresentam altos custos de produção, o milho e a cana-de-açúcar (ALMEIDA, 2019). Além disso, existe a preocupação no âmbito ambiental e econômico, uma vez que a cobertura do solo realiza diversas funções em uma área de produção, interagindo sinergicamente entre os atributos químicos, físicos e biológicos dos solos (ROSA *et al.*, 2017). Alguns benefícios como a proteção do solo contra a erosão, diminuição da degradação da matéria orgânica e a amplitude térmica, acabam favorecendo o rendimento da cultura sucessora, como também a diminuição da lixiviação dos nutrientes, e a proporção de uma maior diversidade e qualidade da fauna edáfica do solo (WOLSCHICK *et al.*, 2016).

Conforme Figueiredo; Giocondo César (2021) o desenvolvimento tecnológico do álcool 2G de segunda geração permite ganhos ambientais e sociais significativos, por ser produzido a partir de resíduos, e usar menor quantidade de recursos naturais e energia. Diante disso, em relação aos cenários de remoção total ou parcial da biomassa produzidas pelas plantas de cobertura de solo e seu rendimento de álcool 2G, os dados mostram que mesmo retirando apenas 25% da palhada para produção de álcool, ainda assim é possível comercializar 2.219 litros de álcool 2G com a cultura do milho, por outro lado, somente 418 litros por hectare com a cultura da mucuna cinza (Tabela 2). Nesse cenário seria possível ainda deixar no solo mais de 16 toneladas de matéria seca por hectare com a cultura do milho. Os dados obtidos para milho indicam grande potencial da cultura, uma vez que, em cenário de extração de 75% de sua biomassa da área de produção, restaria ainda 5,6 toneladas de matéria seca por hectare que, segundo Cruz *et al.* (2002), é biomassa suficiente para manter o solo coberto e dentro do que se espera em um manejo com foco na implantação do sistema de plantio direto, onde remete-se a um incremento de no mínimo 5 toneladas de matéria seca por cultivo. Ainda, com a utilização de 75% da biomassa seca do milho é possível obter 6.657 litros de álcool de 2G/ha. Sendo assim, deve-se considerar a remoção de toda a palhada do solo com muita cautela, a fim de se preservar as propriedades do solo, uma vez que as substâncias húmicas, que forma a maior parte da MOS, estão associadas às propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, de tal modo que, a manutenção de parte da palhada sobre o solo pode preservar os seus efeitos benéficos e, ao mesmo tempo, contemplar a fabricação de álcool 2G e a cogeração de energia (SILVA *et al.*, 2021).

**Tabela 2:** Percentagens de remoção/utilização da biomassa seca produzida pelas plantas de cobertura do solo e seu respectivo rendimento teórico de álcool 2G em relação ao percentual de extração.

Culturas	Remoção de biomassa seca (Kg/ha)			
	100%	75%	50%	25%
Mucuna cinza	5.740 d*	4.305 d	2.870 d	1.435 d
Feijão de porco	7.990 cd	5.992 cd	3.995 cd	1.997 cd
Crotalária spectabilis	7.210 cd	5.407 cd	3.605 cd	1.802 cd
Crotalária juncea	8.900 c	6.675 c	4.450 c	2.225 c
Guandu anão	12.220 b	9.165 b	6.110 b	3.055 b
Milheto	22.480 a	16.860 a	11.240 a	5.620 a
	Rendimento de álcool 2G (Litros/ha)			
Mucuna cinza	1.673 c	1.255 c	837 c	418 c
Feijão de porco	1.957 c	1.468 c	978 c	489 c
Crotalária spectabilis	2.733 c	2.050 c	1.366 c	683 c
Crotalária juncea	4.128 b	3.096 b	2.064 b	1.032 b
Guandu anão	4.609 b	3.457 b	2.304 b	1.152 b
Milheto	8.876 a	6.657 a	4.438 a	2.219 a

\*Letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%.

Entre as leguminosas (Fabaceae) o guandu-anão apresenta-se como grande potencial para geração de álcool 2G, pois possui alta produção de matéria seca, chegando a mais de 12 toneladas por hectare, além de ser uma planta capaz de fixar mais de 200 kg de N/ha em sua biomassa (REDIN *et al.*, 2018). A extração de apenas metade da sua biomassa total (50%), pode render teoricamente 2.305 litros de álcool 2G, e ainda assim, permanecer mais de 6 toneladas de matéria seca por hectare no solo. Por outro lado, a cultura da mucuna cinza apresentou a menor produção de matéria seca, onde removendo apenas 25% da biomassa produzida, a cultura obteria um rendimento de apenas 418 litros de álcool 2G por hectare, assim sua viabilidade neste tipo de sistema de dupla aptidão se torna questionável, pela baixa quantidade de álcool 2G produzida como consequência do seu baixo rendimento em matéria seca. É neste contexto que Ferreira (2015), afirma que, o álcool 2G pode ser considerado como a energia do futuro, especialmente quando produzido a partir de coprodutos ou resíduos agrícolas, já que o etanol celulósico poderá incrementar a produção brasileira anual do biocombustível, sem a necessidade de aumentar a área cultivada de culturas como a cana-de-açúcar, por exemplo, ou competir diretamente com a produção de alimentos. A autora destaca ainda que essa tecnologia é a chave para tornar o etanol 2G mais competitivo e atender à crescente demanda por biocombustíveis (FERREIRA, 2015), sendo o uso de parte da palhada das plantas de cobertura do solo, uma alternativa muito promissora.

Com vistas na sustentabilidade, incluindo no manejo do solo, a utilização de plantas da família das Fabaceae nos sistemas de produção, segundo Pereira (2017) podem gerar economia nos cultivos subsequentes, pelo alto incremento em nitrogênio proveniente de sua biomassa remanescente no solo. Ainda, além de utilizar essas espécies visando à renda alternativa com a obtenção do álcool 2G, seria possível extrair cerca de 25% de sua biomassa disponível nas lavouras de crotalária juncea, crotalária spectabilis e feijão de porco, restando para o solo, mais de 5,4 toneladas por hectare de resíduos de alta qualidade. Segundo Cruz *et al.* (2002), para a manutenção do plantio direto é necessária a adição permanente de uma quantidade mínima de palhada no solo nunca inferior a 4,0 ton/ha. Nessa abordagem técnica, pensando nos benefícios de plantas Fabaceae, destaca-se a cultura do guandu-anão como a mais eficiente, pois pode ser extraído até 50% do total da sua biomassa seca, restando para o solo mais de 6 ton/ha de matéria seca, quantidade excelente se considerar que pode ser alcançada em apenas um cultivo e ainda gerar lucro potencial com a produção de álcool 2G, sem considerar o custo da produção da lavoura. Ainda é válido ressaltar, que não foi realizado um cálculo relatando a viabilidade econômica destes cenários; no entanto, dentre as espécies estudadas, a cultura do milheto é a mais promissora, pois mesmo extraído 75% de sua biomassa seca, permanecem 5,6 toneladas de biomassa seca no solo, e ainda com rendimento de 6.657 litros de álcool 2G por hectare.

Entretanto, o estudo de Lorenzi e Andrade (2019) destaca a complexidade da rede do etanol celulósico - ou etanol 2G - no Brasil, considerando desde a necessidade de desenvolvimento de processos de pré-tratamento mais eficientes, enzimas hidrolisantes mais baratas e variedades mais robustas e produtivas das plantas a serem utilizadas no processo, até a importância da continuidade e do aumento dos financiamentos públicos para pesquisa e produção, da inclusão de novos atores do setor de pesquisa e de universidades. O Brasil possui um potencial enorme a ser explorado, porém até 2020 somente seis pedidos de patente sobre as tecnologias de etanol 2G foram requeridas, um número muito abaixo se comparado com países como a China que solicitou 48 pedidos de patente para o mesmo fim (DILÁSCIO *et al.*, 2020). Essa abordagem pode ser vista tanto como uma dificuldade quanto, como uma grande oportunidade já que a tecnologia, a produção e a oferta de etanol 2G ainda podem ser melhoradas através da produção de conhecimentos científicos, tais como os que estão sendo disponibilizados através deste trabalho e que podem servir de inspiração para a produção de novas informações. Por fim, para Figueiredo; Giocondo César (2021) o etanol 2G tem papel primordial na proteção ambiental e climática, e será decisivo na matriz energética futura.

## Considerações Finais

A cultura do milheto apresenta o maior rendimento de álcool 2G com 8.860 litros por hectare e a cultura do guandu anão e crotalaria juncea, entre as Fabaceae com 4.609 e 4.128 litros, respectivamente.

As culturas do milheto e guandu anão, com utilização de 75% e 50% da biomassa seca, respectivamente, mostram-se espécies potenciais para produção de álcool 2G e com sobra acima de 5 ton/ha de resíduos culturais para proteção do solo.

O uso de plantas de cobertura de solo de estação primavera/verão mostram-se com grande potencial, mesmo quando removida somente parte da biomassa para produção de álcool 2G, porém é necessário a ampliação das espécies e intensificação de estudos nessa temática.

## Referências

- AITA, C. et al. Plantas de cobertura de solo como fonte de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 157-165, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100017>. Acesso em: 26 jan. 2022.
- ALMEIDA, G. F. L. Álcool de segunda geração utilizando sorgo biomassa (*Sorghum bicolor*). **Tese (Doutorado)** - Programa de Pós-graduação em Biocombustíveis, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 115p. 2019. Disponível em: <http://acervo.ufvjm.edu.br/jspui/handle/1/2066>. Acesso em: 25 jul. 2021.
- ANDRADE, T. C. C. et al. Hidrólise enzimática de celulose para obtenção de glicose utilizando líquido iônico como meio solvente. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 1, p. 310-325, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20190022>. Acesso em: 26 jan. 2022.
- ANDRIOLI, I.; PRADO, R. M. Plantas de cobertura em pré-safra e adubação nitrogenada na fertilidade do solo em diferentes camadas, cultivada com milho em sistema de plantio direto e convencional. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 3, p. 963-978, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n3p963>. Acesso em: 26 jan. 2022.
- CONCEICÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 777-788, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000500013>. Acesso em: 26 jan. 2022.
- CRUZ, J. C. et al. **Rotação de culturas**. In: Sistema de Produção: Milho. 2002, Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01\\_72\\_59200523355.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_72_59200523355.html). Acesso em: 26 jan. 2022.
- DILÁSCIO, M. B. et al. Monitoramento tecnológico das patentes do etanol de segunda geração. **Revista Geintec-Gestao Inovacao e Tecnologias**, v. 10, n. 3, p. 5553-5566, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.7198/geintec.v10i3.1441>. Acesso em: 29 jan. 2022.



EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em 28 jun. 2021.

FERREIRA, J. Etanol de segunda geração: Definição e perspectivas. **Revista Conexão Eletrônica**, v. 12, n. 1, p. 11, 2015.

FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 1, p. 1039-1042, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>. Acesso em: 26 jan. 2022.

FIGUEIREDO, B. B; GIOCONDO CÉSAR, F. I. Estudo comparativo da eficiência na produção do álcool de segunda geração. **Revista Científica Acertte**, v.1, n. 6, p. e1643, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.47820/acertte.v1i6.43>. Acesso em: 28 jan. 2022.

GRASEL, F. et al. Innovation in biorefineries I. Production of second generation ethanol from elephant grass (*Pennisetum purpureum*) and sugarcane bagasse (*Saccharum officinarum*). **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 4-14, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20170003>. Acesso em: 26 jan. 2022.

LEITE, R. C.; CORTEZ, L. A. B. E. **O álcool combustível no Brasil**. In: Brasil. Ministério das Relações Exteriores - MRE (org.). Biocombustíveis no Brasil: Realidades e perspectivas. Brasília: Arte Impressora Gráfica LTDA, p. 60-75, 2007. Disponível em: [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/etanol3\\_000g7gq2cz702wx5ok0wtedt3xdr-mftk.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/etanol3_000g7gq2cz702wx5ok0wtedt3xdr-mftk.pdf). Acesso em: 26 jan. 2022.

LIMA D. E. E. et al. Produção de álcool de segunda geração proveniente do bagaço de pedúnculos do Caju. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 2, p. 26-35, 2015. Disponível em: <http://periodicos.ufersa.edu.br/revistas/index.php/sistema>. Acesso em: 26 jan. 2022.

LORENZI, B. R; ANDRADE, T. H. N. O Etanol de Segunda Geração no Brasil: Políticas e redes sociotécnicas. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, v. 34, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/3410014/2019>. Acesso em: 27 jan. 2022.

NETO, B. O. Integração das principais tecnologias de obtenção de álcool através do processamento de celulose (2ª geração) nas atuais usinas de processamento de cana-de-açúcar (1ª geração). **Dissertação (Mestrado)** – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 137p. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.11606/D.3.2009.tde-02062009-164523>. Acesso em 25 jan. 2022.

OLIVÉRIO, J. L; HILST, A. P. Dedini rapid hydrolysis: Revolutionary process for producing alcohol from sugarcane bagasse. **International Sugar Journal**, v. 106, n. 1263, p. 168-172, 2004.

OLIVEIRA, M. M. R. et al. Pré-tratamento químico e caracterização do bagaço da cana: Uma perspectiva para produção de álcool a partir de resíduos agroindustriais. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 87865-87879, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n11-273>. Acesso em: 26 jan. 2022.

PACHECO, P. L. et al. Desempenho de plantas de cobertura em sobressemeadura na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 7, p. 815-823, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000700005>. Acesso em: 26 jan. 2022.

PEREIRA, A. P. et al. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura de verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 4, p. 120-129, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.19084/RCA17065>. Acesso em: 26 jan. 2022.

ROCHA, A. M. et al. Prospecção tecnológica do capim elefante e sua relevância como matéria-prima para a produção energética. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 10, n. 2, p. 475-499, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2017v10n2p475-499>. Acesso em: 28 jan. 2022.

REDIN, M. et al. Root and shoot contribution to carbon and nitrogen inputs in the topsoil layer in no-tillage crop systems under subtropical conditions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, e0170355, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbcS20170355>. Acesso em: 26 jan. 2022.

ROSA, D. M. et al. Substâncias húmicas do solo cultivado com plantas de cobertura em rotação com milho e

soja. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 2, p. 221-230, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170026>. Acesso em: 26 jan. 2022.

ROSA, S. E. S.; GARCIA, J. L. F. O álcool de segunda geração: limites e oportunidades. **Revista do BNDES**, n. 32, n. 1, p. 117-156, 2009. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/7046>. Acesso em: 26 jan. 2022.

SANTOS, F. A. et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de álcool. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000500025>. Acesso em: 26 jan. 2022.

SANTOS, F. A. et al. Otimização do pré-tratamento hidrotérmico da palha de cana-de-açúcar visando à produção de álcool celulósico. **Química Nova**, v. 37, n. 1, p. 56-62, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422014000100011>. Acesso em: 26 jan. 2022.

SILVA, R. M. et al. Um estudo de caso da remoção da palhada de cana-de-açúcar do solo: Quais são as implicações no conteúdo de matéria orgânica do solo? **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, p. e71101421717-e71101421717, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.21717>. Acesso em: 27 jan. 2022.

SILVA, R. B. R. et al. Revisão de biomassas para produção de etanol de segunda geração. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 14, n. 1, 10 p. 2017. Disponível em: <http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/viewarticle.php?id=1454>. Acesso em: 26 jan. 2022.

TEIXEIRA, D. A. et al. Produção de etanol de segunda geração a partir de aguapé: Uma Revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 1, p. 127-143, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20190010>. Acesso em: 26 jan. 2022.

WOLSCHICK, N. H. et al. Cobertura do solo, produção de biomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 15, n. 2, p. 134-143, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5965/223811711522016134>. Acesso em: 26 jan. 2022.