

Meire Cristina Andrade Cassimiro da Silva
(organizadora)



CANA-DE-AÇÚCAR:

MANEJO, ECOLOGIA E BIOMASSA



 **FATECPR**
Faculdade de Tecnologia de Curitiba

 **GALILEU**
FACULDADE

 **GRANTETE**
FACULDADE

 *Editora*
Spessotto



Meire Cristina Andrade Cassimiro da Silva
(Organizadora)

CANA-DE-AÇÚCAR:
MANEJO, ECOLOGIA E BIOMASSA

Autores

Alessandro Aparecido Felice
Alex dos Santos
Alex Rodrigo Aguilera
Antonio Bestana Neto
Bruno Novaes Menezes Martins
Carla Gheler-Costa
Carlos Alves de Oliveira
Daniele Scudeletti
Diego Antônio Biondo
Dile Pontarolo Stremel
Elisa Fidêncio de Oliveira
Erilene Romeiro Alves
Fábio Henrique Comin
Gilberto Sabino dos Santos Junior
Ivan Leandro Coletti
Junior Cesar Souza e Silva
Letícia Galhardo Jorge
Luciano Martins Verdade
Luiz Vitor Crepaldi Sanches
Marcio Gonçalves Campos
Meire Cristina Andrade Cassimiro da Silva
Natália Oliveira Totti de Lara
Olívia Gomes Martins
Victor Gonçalves Cremonez
Vinícius Fernandes Canassa

2021



1ª EDIÇÃO – 2021

Todos os direitos reservados

Editor: Ricardo Zanetta Spessotto

Capa: Thiago Rubio

Imagem da capa: Freepik.com.

(essa capa foi desenhada usando recursos do Freepik.com)

**C212 Cana-de-açúcar : manejo, ecologia e biomassa /
Organizado por Meire Cristina Andrade
Cassimiro da Silva – Bauru, SP : Spessotto,
2021. *E-book*.
208 p.**

ISBN 978-85-5973-190-3

**1.Cana-de-açúcar – Irrigação 2. Cultivo do solo
3. Resíduo Sólido I. Silva, Meire Cristina Andrade
Cassimiro da (Org.) II. Título**

CDD 338.17361

Ficha catalográfica elaborada por Fatima Aparecida Anselmo CRB/8 10250

Livraria e Editora Spessotto

Rua Araújo Leite, 25-72 – Santa Tereza

Bauru/SP

www.livrariaspessotto.com.br

APRESENTAÇÃO

A Universidade, desde os seus primórdios, tem como função, além do ensino, desenvolver a pesquisa através de seus docentes e discentes, assim como a extensão acadêmica, oferecendo atendimento e serviços para a comunidade. Essa tríade e tripé-base das Instituições de Ensino Superior (IES) é o alicerce da qualidade mister à formação dos alunos de graduação no Brasil.

A literatura bibliográfica tem, neste contexto, um papel fundamental na formação dos graduandos e, associada às publicações de artigos, resumos e resenhas, é a fonte de conhecimento para a consolidação e atualização dos diversos profissionais de nível superior.

O agronegócio é uma das riquezas brasileiras e deve representar, segundo os dados do CEPEA (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada da Esalq/USP) de 2021, 30% do PIB nacional e 14% do PIB paulista, sendo que, desde último percentual, 80% é a fatia representativa da agricultura paulista.

No cenário agrícola brasileiro e, especificamente, no paulista, temos a produção de cana-de-açúcar como parte da história do desenvolvimento econômico nacional.

Este e-book é uma conquista das Faculdades Fatec-PR, Galileu e Gran Tietê e, com certeza, uma obra de referência para especialistas, docentes, alunos e demais interessados nesta temática. Versando sobre diversos aspectos da produção de cana-de-açúcar desde o cultivo até a obtenção de seus produtos, a obra foi desenvolvida de forma transdisciplinar, cujos autores/colaboradores em sua maioria são docentes e alunos dos cursos de Engenharia Agrônômica de nossas IES.

Através da coordenação dos trabalhos e organização do e-book por parte da Profa. Dra. Meire Cristina Andrade Cassimiro da Silva e da participação de doutores, mestres e especialistas em seus capítulos, esta publicação nasce coroando o esforço, competência e dedicação de todos os seus colaboradores.

Parabenizo os autores, as faculdades Fatec-PR, Galileu e Gran Tiête e demais envolvidos neste trabalho e apresento à comunidade o e-book "Cana-de-açúcar: Manejo, Ecologia e Biomassa", com a certeza do sucesso desta publicação por sua relevância no cenário do agronegócio nacional, sua qualidade acadêmica e científica, sua contemporaneidade e sua contribuição para a formação de alunos, pesquisadores e profissionais deste importantíssimo setor produtivo e econômico mundial.

Fico honrado e orgulhoso pela gentileza dos autores ao me confiarem a apresentação desta obra literária.

Prof. Jefferson Capeletti

Vice-diretor geral das Faculdades Galileu e Gran Tietê

SUMÁRIO

01 - CORREÇÃO E ADUBAÇÃO DO SOLO PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....7

(Bruno Novaes Menezes Martins e Letícia Galhardo Jorge)

02 - MÉTODOS DE IRRIGAÇÃO/FERTIRRIGAÇÃO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....35

(Luiz Vitor Crepaldi Sanches)

03 - RESPOSTAS MORFOANATÔMICAS E FISIOLÓGICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES CONDIÇÕES HÍDRICAS55

(Natália Oliveira Totti de Lara)

04 - ROTAÇÃO DE CULTURA COM PLANTIO DE SOJA EM REFORMA DE CANAVIAL.....75

(Antonio Bestana Neto)

05 - GANHOS COM A SISTEMATIZAÇÃO EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR.....91

(Alessandro Aparecido Felice, Ivan Leandro Coletti, Junior Cesar Souza e Silva, Diego Antônio Biondo, Alex Rodrigo Aguilera. Alex dos Santos e Marcio Gonçalves Campos)

06 - FAUNA E CONSERVAÇÃO NA PAISAGEM AGRÍCOLA PAULISTA.....99

(Carla Gheler-Costa, Fábio Henrique Comin, Gilberto Sabino dos Santos Junior e Luciano Martins Verdade)

07 - INSETOS-PRAGA NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR123

(Vinícius Fernandes Canassa)

08 - MICRORGANISMOS NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR143

(Daniele Scudeletti, Elisa Fidêncio de Oliveira e Erilene Romeiro Alves)

09 - BIOETANOL A PARTIR DA BIOMASSA DE CANA-DE-AÇUCAR.....161

(Carlos Alves de Oliveira, Dile Pontarolo Stremel e Victor Gonçalves Cremonez)

10 - APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA AGROINDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA EM SISTEMAS DE COMPOSTAGEM.185

(Olívia Gomes Martins e Meire Cristina Andrade Cassimiro da Silva)

CORREÇÃO E ADUBAÇÃO DO SOLO PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Bruno Novaes Menezes Martins¹

Letícia Galhardo Jorge²

Para obtenção e manutenção de altas produtividades, um dos fatores fundamentais é o manejo adequado da adubação. Os métodos de utilização da adubação orgânica e mineral podem ser aperfeiçoados, com o objetivo de maximizar o potencial produtivo da cultura. Esta prática se resume em satisfazer as necessidades nutricionais da planta, em todos os estádios de desenvolvimento. A recomendação de adubação tem por objetivo elevar os teores de nutrientes no solo a níveis considerados adequados para cada cultura.

Segundo Rosseto et al. (2008a), a adubação é um importante fator para aumentar a produtividade. Além disso, é responsável por entre 17% e 25% de todos os custos do plantio da cana. Para o estudo da adubação, as exigências nutricionais da cultura e as quantidades de nutrientes removidos pela planta são considerados de suma importância para se indicar as quantidades de nutrientes a serem fornecidas (COLETTI et al., 2002).

Vale destacar que, quando o teor foliar está abaixo do nível crítico, normalmente ocorre uma deficiência nutricional, que poderá ser manifestada por sintomas visuais. Quando os sintomas aparecem, comumente a produtividade já foi afetada (LUZ et al., 2017).

De acordo com Vitti et al. (2016), para o dimensionamento da adubação, é necessário o conhecimento das exigências nutricionais para determinado nível de produtividade, respondendo as seguintes questões:

¹ Engenheiro Agrônomo, Dr, Docente das Faculdades Galileu e Gran Tietê, brunovaesagrope@gmail.com

² Bióloga, M. Sc, Doutoranda em Botânica (Fisiologia vegetal) – IBB/ UNESP, leticia.g.jorge@unesp.br

1. O que aplicar? (fontes e nutrientes a serem aplicados).
2. Quanto aplicar? (quantidade necessária de acordo com o nível de produtividade).
3. Quando aplicar? (época de maior exigência da cultura e interação do nutriente com o solo).
4. Como aplicar? (os nutrientes podem ser aplicados via solo, folha, tolete ou tratamento fitossanitário).

Além disso, existe o fator de eficiência do fertilizante, definido como a interação entre o sistema solo-planta-atmosfera e a cultura na qual o fertilizante foi aplicado. Perdas nessa interação podem ocorrer por erosão (arraste de nutrientes), lixiviação (percolação de nutrientes no perfil do solo), fixação (adsorção ou precipitação de ânion e de cátions metálicos) ou volatilização (perda do nutriente para a atmosfera) (VITTI et al., 2016; LUZ et al., 2017).

De acordo com Vitti et al. (2016), o manejo e uso de fertilizantes na cultura da cana tem início com o diagnóstico da fertilidade do solo e as práticas corretivas (calagem, gessagem e fosfatagem), práticas conservacionistas (adubação verde e orgânica) e finaliza com a aplicação do adubo mineral. Vale destacar que as práticas corretivas e conservacionistas têm o objetivo de aumentar a eficiência do fertilizante mineral, promovendo maior desenvolvimento radicular, ocasionando maior absorção de água e de nutrientes.

Práticas corretivas

Calagem

Em sua maioria, os solos brasileiros se apresentam sob condições de elevados graus de intemperismo e acidez. Segundo Quaggio (2000), cerca de 70% dos solos são considerados ácidos, causando redução da produtividade em até 40%.

De acordo com Rajj (2017), o solo será tanto mais ácido quanto menor for a parte da CTC (capacidade de troca de cátions) ocupada por cátions (Ca, Mg, K e Na). Desta forma, subteende-se que a remoção desses cátions do ponto de troca catiônica, substituindo-se por Al^{+3} e H^{+} , contribuirá para o aumento da acidificação do solo.

Vários são os fatores que contribuem para a acidificação do solo, como a pobreza de materiais de origem desprovidos de bases, condições de intensificação de agentes de intemperismos (pedogênese), água da chuva (em decorrência de sua reação com o gás carbônico da atmosfera – dissociação do ácido carbônico), decomposição da matéria orgânica com liberação de íons de hidrogênio para a solução do solo, remoções de cátions básicos (Ca, Mg, K e Na) em regiões de altos índices pluviométricos (lixiviação) e utilização de fertilizantes de caráter ácido (RAIJ, 2017; KORNDÖRFER et al., 2017).

A disponibilidade de nutrientes para a cultura está relacionada ao pH do solo. Valores inadequados de pH podem causar desequilíbrios fisiológicos nas plantas. Um pH abaixo de 5,5 resulta em menor disponibilidade de N, P, Ca e Mg, além do aumento comum da toxidez de alumínio (KORNDÖRFER et al., 2017). Esses efeitos tendem a contribuir na restrição do crescimento radicular, limitando o desenvolvimento das plantas e resultando em perdas significativas na produção.

Portanto, o pH serve como referência e indicador direto da acidez do solo, o qual consiste na avaliação da concentração de íons hidrogênio na solução do solo. Tais problemas de acidez e disponibilidade de nutrientes podem ser amenizados com a elevação do pH, através da aplicação de produtos que liberam ânions capazes de neutralizar os prótons (H^+) e o íon alumínio (Al^{+3}), resultando em ganhos de produtividade.

O calcário é o material mais indicado para a realização dessa atividade, por possuir componentes básicos que geram ânions que são capazes de promover a neutralização da acidez. A correção ocorre com a substituição do alumínio e do hidrogênio pelo cálcio e magnésio no ponto de troca catiônica. Deste modo, além da eliminação da acidez do solo, o resultado também será o fornecimento de cálcio e magnésio para as plantas, contribuindo para a promoção da fertilidade do solo. A velocidade da reação irá depender grandemente do grau de acidez do solo, da granulometria do corretivo e do grau de interação entre o calcário e o solo (RAIJ, 2017).

Contribuição do cálcio no desenvolvimento da cultura

Após a absorção pelas raízes, o cálcio é levado pelo xilema até a parte aérea, através da corrente transpiratória. Desta forma, maiores quantidades de Ca serão assimiladas por órgãos que apresentam maiores taxas de transpiração. No caso de folhas novas, que transpiram pouco, poderá ocorrer uma deficiência do elemento. Diante do exposto, torna-se necessário prevenir eventual desordem, através do favorecimento de um maior fluxo de Ca (PRADO, 2008).

O cálcio participa do desenvolvimento e formação do sistema radicular da cana, estando presente na forma de pectatos de cálcio, constituindo a lamela média das paredes celulares e incrementando a resistência mecânica dos tecidos. Na busca do benefício, é necessário que o Ca ocupe todo o volume de solo, na qual se concentra a maior parte das raízes (MALAVOLTA, 2006; PRADO, 2008).

Sob deficiência, inicialmente os sintomas ocorrerão em regiões meristemáticas. Na cultura, é possível identificar que os cartuchos se tornam necróticos nas pontas e ao longo das margens. Já os colmos se tornam mais moles e mais finos, principalmente em direção ao ponto de crescimento, devido à redução do efeito “protetor” do cálcio, que ocorre em decorrência da sua ação na inibição da atividade das enzimas lipoxigenase, que atua na degradação das membranas, e poligacturonase, que é responsável pela degradação da parede celular (PRADO, 2008).

Apesar da importância, os acréscimos na produtividade da cana-de-açúcar em resposta à calagem nem sempre são comuns, fato que pode ser explicado pela tolerância à acidez do solo. Contudo, trata-se de uma planta bastante exigente em Ca e Mg. Normalmente, quando ocorrem respostas à calagem, elas são, na maioria, correlacionadas a teores inadequados de Ca e Mg (ORLANDO FILHO et al., 1994; ROSSETO et al., 2004).

Oliveira et al. (2010), ao avaliarem a extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena, constataram que a quantidade média de Ca extraída pela cana (226 kg ha⁻¹ de Ca) foi superior à do nitrogênio (179 kg ha⁻¹ de N).

Já o magnésio participa da molécula de clorofila. Cerca de 20% do Mg total foliar se encontra nos cloroplastos. Desta forma, sob deficiência, ocorrerá diminuição da síntese de clorofila e, consequentemente, redução da taxa de fotossíntese. Vale destacar também que o elemento é responsável pela ativação de diversas enzimas ligadas ao metabolismo energético.

Da mesma forma que o Ca, o Mg também é movido pela transpiração da planta. Entretanto, o magnésio apresenta mobilidade no floema, facilitando a redistribuição na planta. Sob situação de deficiência, no início os sintomas aparecem nas folhas mais velhas, por meio de uma clorose entre as nervuras, começando nas pontas e ao longo das margens com pequenas pontuações necróticas, que também atingem a bainha (ORLANDO FILHO et al., 1994; PRADO, 2008; KORNDÖRFER et al., 2017).

Além disso, a calagem pode também aumentar a disponibilidade de fósforo e molibdênio, melhorar a agregação do solo através da adição de cátions floclulantes (cálcio e magnésio) aos coloides do solo, auxiliar na fixação simbiótica do nitrogênio, favorecer a nitrificação da matéria orgânica e estimular o desenvolvimento das raízes, contribuindo para um melhor aproveitamento de água e nutrientes presentes no solo (VITTI; MAZZA, 2002; RAIJ, 2017).

Métodos de calagem na cana-de-açúcar

Segundo o critério de recomendação, a quantidade de corretivo pode variar bastante. Deve-se considerar o nível de tecnologia empregado pelos agricultores e seus custos em curto e médio prazo. Sabe-se que quantidades elevadas tendem a encarecer a produção. Entretanto, o efeito residual do corretivo será mais prolongado (KORNDÖRFER et al., 2017).

Há dois critérios utilizados para se proceder o cálculo da necessidade de calagem. O Instituto Agrônômico de Campinas (IAC), por meio de Raij et al. (1996), recomenda a calagem baseada na saturação de bases. De acordo com Raij (2017), a grande vantagem da determinação da necessidade de calagem para a elevação da saturação por bases está na

facilidade dos cálculos e na flexibilidade de adaptação para diferentes culturas, de acordo com suas exigências. Neste cálculo, são considerados parâmetros referentes ao solo, ao corretivo e à cultura. Para a cultura da cana, recomenda-se elevação da saturação de bases do solo para 60%, que pode ser traduzida pela fórmula:

$$NC \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = \frac{(60 - V\%) \times CTC}{100} \times \frac{100}{PRNT}$$

Em que:

NC = necessidade de calagem, t ha⁻¹;

V% = saturação por bases encontrada na análise de solo;

CTC = capacidade de troca de cátions (cmol_c dm⁻³) do solo a pH 7,0.

Já Copersucar, por meio de Benedini (1988), sugere a necessidade de calagem para a cultura utilizando a seguinte fórmula:

$$NC \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = [3 - (Ca + Mg)] \times (100/PRNT)$$

Para se atingir o sucesso desta prática, recomenda-se aplicar o calcário em uma profundidade média de 40 cm na implantação do canavial. Deve-se atentar para a uniformidade em toda extensão do terreno, para que haja um contato bem próximo entre as partículas do solo. Além disso, a antecedência da aplicação é de suma importância, devendo ser realizada três meses antes, aplicando-se metade do corretivo antes e a outra metade após a aração por meio da gradagem (SANTOS; BORÉM, 2016; RAIJ, 2017).

No caso de soqueira, deve-se realizar a calagem logo após o segundo e quarto cortes, com base nas análises de solo realizadas após o primeiro e terceiro cortes, caso a saturação por bases (V%) seja menor do que 50, levando em consideração somente a camada de 0-20 ou 0-25 cm (SANTOS; BORÉM, 2016).

Outro ponto importante a ser considerado é o PRNT (Poder Relativo de Neutralização Total), que pode ser definido como o conteúdo de neutralizantes contidos no corretivo que reagirá com o solo no período de três meses. Um calcário que apresenta PRNT mais baixo terá um poder residual de neutralização da acidez que ocorre de forma mais lenta, podendo ser vantajoso para a cana-de-açúcar. Por outro lado, um calcário com PRNT mais elevado terá uma reação mais rápida no solo, ou seja, maior será a quantidade de ácidos neutralizados. Vale ressaltar que a velocidade de reação no solo será influenciada pelas condições do clima e do solo, da natureza química do corretivo e, principalmente, da sua granulometria (PRIMAVESI; PRIMAVESI, 2004; SANTIAGO; ROSSETO, 2021).

Além do PRNT, deverá ser considerado também o teor de magnésio, devendo-se dar preferência aos materiais que contenham uma grande quantidade deste nutriente, como é o caso do calcário dolomítico, que apresenta teor de óxido de magnésio superior a 12% (PRIMAVESI; PRIMAVESI, 2004).

Gessagem

Outro produto que pode ser utilizado na melhoria do ambiente radicular em profundidade é o gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que é um subproduto da produção de ácido fosfórico e contém aproximadamente 26% de CaO e 15% de enxofre (KORNDÖRFER et al., 2017).

O gesso, quando aplicado superficialmente no solo, tende a dissolver de maneira gradual. Devido à sua rápida mobilidade, o gesso lixivia para as camadas mais profundas, sem precisar de incorporação. Este fato contribui para o aprofundamento das raízes favorecendo a absorção de água e nutrientes com maior eficiência, além de se tornarem mais tolerantes a veranicos. Além disso, a aplicação deste insumo tende a aumentar o teor de Ca e ajuda na redução da saturação de Al em profundidade, reduzindo os efeitos do Al sobre o crescimento das raízes, sem necessariamente atuar como corretivo de pH (DEMATÊ, 2004).

O gesso também é importante fornecedor de enxofre para as plantas. Conforme Raij (2017), o enxofre participa de dois aminoácidos essenciais (cistina e metionina). Esses aminoácidos entram na composição de todas as proteínas, tendo função estrutural. O enxofre atua também como ativador enzimático e participa de todos os processos metabólicos da planta (fotossíntese, respiração, síntese de gorduras e proteínas e fixação simbiótica de nitrogênio) (MALAVOLTA, 2006; PRADO, 2008).

Quanto à determinação da dose de gesso, deve-se considerar o resultado de análise da camada de 20-40 ou 25-50 cm (VITTI et al., 2016).

$$NG = \frac{(50 - V1) \times CTC}{500}$$

Em que:

NG = necessidade de gesso, t ha⁻¹;

V1 = saturação por bases encontrada na análise de solo;

CTC = capacidade de troca de cátions (mmol_c dm⁻³).

Uma outra forma de recomendar o gesso agrícola é através do conhecimento do teor médio de argila do solo. Com posse dos dados de análise química do solo, deve-se multiplicar o fator de 60 pelo teor médio de argila para culturas anuais e perenes em geral, critério que é utilizado no Estado de São Paulo (RAIJ et al., 1996). Como exemplo, para a cultura da cana-de-açúcar, a recomendação resulta em dose de 900 kg ha⁻¹ de gesso para um solo ácido com 15% de argila.

Segundo Sousa et al. (2005), se a saturação de alumínio for maior que 20% ou o teor de cálcio for menor que 0,5 cmol_c/dm³, existe a possibilidade de resposta ao gesso, justificando-se a utilização deste insumo. A aplicação deve ser realizada a lanço depois da calagem ou imediatamente antes, caso seja necessário.

Fosfatagem

Um dos problemas que mais afetam a eficiência na produção agrícola é a baixa concentração de fósforo disponível e o alto potencial de fixação do P aplicado via fertilizante (PRADO, 2008).

Embora o elemento seja exigido em menores quantidades do que o nitrogênio e o potássio, exerce função-chave no metabolismo da cultura, particularmente na transferência e armazenamento de energia, absorção iônica, fotossíntese, síntese de proteínas, processo de divisão celular, herança e fixação biológica de N (MALAVOLTA, 2006).

Devido à sua baixa disponibilidade natural e à alta interação do elemento com a fração mineral do solo, o fósforo é aplicado em grandes quantidades nos solos brasileiros. A fosfatagem é uma prática corretiva que tem como objetivo elevar o teor de fósforo do solo, tornando o elemento disponível para a cultura ao longo do ciclo.

De acordo com Rein et al. (2015), esta prática é baseada na aplicação de altas doses de P_2O_5 (até 180 kg/ha) no fundo do sulco, exclusivamente no plantio. Entretanto, a fosfatagem também pode ser realizada a lanço com incorporação em profundidade (em torno de 15 cm), onde a densidade de raízes da cana-de-açúcar é bastante alta. A disponibilidade de fósforo em grande quantidade faz com que se atinja aproximadamente 80% do potencial produtivo no ano, sem outra complementação de fertilizante fosfatado.

Para que ocorra uma adequada absorção do fósforo, é necessário um contato próximo do nutriente com as raízes. Vale destacar que o movimento do nutriente no solo é governado pela difusão, ou seja, a movimentação ocorrerá a favor de um gradiente de concentração, percorrendo pequenas distâncias, fato que justifica a aplicação localizada, a qual irá favorecer o processo de absorção (MALAVOLTA, 2006; PRADO, 2008; RAIJ, 2017).

De acordo com Korndörfer et al. (2004), a adubação fosfatada contribui para o aumento o teor de P_2O_5 no caldo, o que melhora sobremaneira o processo de clarificação do caldo para a produção de

açúcar. O nutriente funciona como um agente floculante, fazendo com que as impurezas contidas no caldo sejam carregadas para o fundo do decantador, apresentando, assim, relevância no processo industrial.

Práticas conservacionistas

Adubação verde

A adubação verde é entendida como a incorporação de massa vegetal ao solo, produzida no local ou adicionada, com a finalidade de preservar e/ou restaurar os teores de matéria orgânica e nutrientes do solo, proporcionando melhorias nas suas propriedades físicas, químicas e biológicas, sendo uma alternativa viável na busca da sustentabilidade dos solos agrícolas (ABBOUD, 1986). Igue (1984) destaca que a prática da adubação verde contribui para o aumento da capacidade de troca catiônica, formação e estabilização dos agregados, melhoria na infiltração de água e aeração, controle de nematoides e incorporação de nitrogênio no solo, efetuado através da fixação biológica.

Para que ocorra a absorção dos nutrientes advindos da mineralização dos adubos verdes, a planta depende, em grande parte, da sincronia entre a decomposição e a mineralização dos resíduos vegetais e a época de maior exigência nutricional da cultura (LINHARES et al., 2010). Se a mineralização dos nutrientes ocorrer fora do período de maior demanda nutricional da cultura de interesse econômico, a planta não será beneficiada (CREWS; PEOPLES, 2005). Lembrando que a adição de adubo verde ao solo trará benefícios não só ao primeiro cultivo, mas também a cultivos sucessivos que se caracterizam pela viabilidade no emprego desse insumo.

O tempo de decomposição dos resíduos depende das condições edafoclimáticas da região, da relação entre as quantidades de carbono e nitrogênio (relação C/N) e do teor de lignina dos resíduos vegetais (TORRES et al., 2005; XU; HIRATA, 2005).

Segundo Vale et al. (2004), a mineralização do N é muito influenciada pela relação C:N do material em decomposição. Quanto maior for a C:N do material orgânico adicionado ao solo, tanto maior será

o período de imobilização. De acordo com esses autores, quando são adicionados ao solo resíduos orgânicos com relação C:N maior que 30:1, há o predomínio da imobilização de N. Com a adição de resíduos com relação C:N menor que 20:1, há predominância de mineralização de N no início de sua decomposição, o que pode acarretar numa maior perda do elemento. À medida que os microorganismos decompõem um resíduo orgânico, ocorre a mineralização, processo pelo qual os nutrientes são convertidos da sua forma orgânica para sua forma inorgânica, tornando-os disponíveis para as plantas.

De acordo com Espindola et al. (2006), vários critérios devem ser adotados na escolha da espécie a ser adotada como adubo verde. Entre eles destacamos: adaptação das espécies às condições de clima e solo do local; tolerância ao Al; eficiência na extração e ciclagem de nutrientes; elevada fixação de N₂ atmosférico; rusticidade; crescimento inicial rápido, de modo a cobrir o solo e dificultar a presença de plantas espontâneas; sistema radicular bem desenvolvido; elevada produção de fitomassa verde; baixa suscetibilidade ao ataque de pragas e doenças, relação C/N baixa e livres de dormência.

Em áreas de reforma da cana-de-açúcar, os adubos verdes são caracterizados como uma importante alternativa para a reciclagem de nutrientes, com economia da adubação nitrogenada e geração de renda (MASCARENHAS et al., 1994; AMBROSANO et al., 2010, 2011). Conforme Bolonhezi et al. (2014), a prática da adubação verde em cana-de-açúcar supre os requerimentos de N na cana-planta, gerando aumentos acima de 20 t ha⁻¹ na produtividade de colmos. Ambrosano et al. (2011) afirmam que esses aumentos significativos nas produções de cana-de-açúcar podem chegar até o quinto corte, sendo um custo relativamente baixo.

Atualmente, a família das leguminosas é mais utilizada como adubo verde. De acordo com Miyasaka et al. (1984), o principal motivo para essa prioridade está em sua capacidade de fixar o N atmosférico mediante a simbiose, com bactérias do gênero *Rhizobium/Bradyrhizobium* nas raízes. Essa característica é importante, uma vez que possibilita maior rapidez na

decomposição dos restos vegetais, além de proporcionar um sistema radicular geralmente bem profundo e ramificado, capaz de extrair nutrientes das camadas mais profundas do solo.

Além disso, Ambrosano et al. (2017) destacam também a proteção oferecida pela cobertura vegetal, as menores amplitudes diurnas da variação térmica do solo, a proteção ao impacto das gotas da chuva e ao escoamento superficial, a manutenção de uma temperatura mais estabilizada no solo e a proteção contra possíveis perdas de nutrientes e de água, contribuindo para a conservação do solo.

Adubação orgânica

Atualmente, existem vários tipos de adubos orgânicos, tanto de origem animal quanto vegetal e agroindustrial, indicados para a utilização no plantio de diversas culturas, devendo-se atentar para a origem e a qualidade dos mesmos (SOUZA; RESENDE, 2012).

A matéria orgânica conserva, em suas estruturas, elementos contidos em compostos químicos remanescentes das estruturas dos seres vivos que os utilizaram. Esses elementos formam a estrutura básica da matéria orgânica, representados por cadeias e anéis de carbono contendo hidrogênio e oxigênio, além de grupamentos funcionais diversos, entre os quais se destacam nitrogênio, enxofre e fósforo (RAIJ, 2017). Além disso, a matéria orgânica funciona como fonte de energia para os microrganismos que conduzirão a disponibilização dos nutrientes para as plantas, proporciona aumento na capacidade de retenção de umidade, melhora a estrutura e o arejamento (formação de macroporos), melhora a taxa de infiltração de água, regula a temperatura do solo, evitando grandes oscilações, aumenta a capacidade de retenção de cátions, fornece nutrientes e retarda a fixação do fósforo, uma vez que os radicais orgânicos bloqueiam os sítios de fixação. Alguns produtos da decomposição da matéria orgânica têm efeito hormonal ou estimulante para o desenvolvimento das raízes (MALAVOLTA et al., 2002; VITTI et al., 2016).

Diante da variabilidade na composição dos resíduos orgânicos, seu uso como adubo requer conhecimento da dinâmica de mineralização de nutrientes, com o objetivo de otimizar a sincronização da disponibilidade de nutrientes no solo com a demanda nutricional das plantas, de modo que possa ser evitada a imobilização ou a rápida mineralização de nutrientes durante os períodos de alta e baixa demanda (MYRES et al., 1994; HANDAYANTO et al., 1997; GABRIELLE et al., 2004; BENITO et al., 2005).

Como alternativa, a utilização de subprodutos tornou-se grande redutor de custos para a usina, tendo em vista que esses materiais cada vez mais substituem ou complementam a adubação mineral. Os subprodutos mais utilizados são a torta de filtro, vinhaça, fuligem e a cinza. Quanto ao processo para o uso desses subprodutos, existem as seguintes opções: “*in natura*”, utilizando-se torta de filtro com cerca de 70 a 75% de umidade no plantio de cana de inverno, no sulco; “condicionada”, com o uso da torta de filtro submetida a um processo de secagem e, por fim, a “torta de filtro enriquecida”, a qual, além de sofrer o processo de condicionamento, passa por compostagem aeróbica, sendo misturada com outras matérias-primas (bagaço, cinza, serragem, cama de frango, esterco bovino, dejetos de suíno, fosfatos naturais, gesso agrícola, etc.), visando elevar o padrão da concentração de nutrientes e diminuir a umidade (VITTI et al., 2016).

Adubação mineral

Adubação nitrogenada

No sistema solo-planta, o nitrogênio (N) passa por reações de oxirredução, sendo absorvido pelas raízes na forma oxidada NO_3^- (nitrato) ou na forma reduzida NO_4^+ (amônio). Cerca de 95% do N no solo está na forma de NO_3^- , que é lixiviada para fora da zona de absorção das raízes, fato que está relacionado com a textura do solo e com o regime pluviométrico da região de cultivo. O N é um nutriente móvel no solo e na planta, normalmente assimilado na forma de aminoácidos. É encontrado em componentes celulares como proteínas, ácidos nucleicos e clorofilas, além de ser requerido para a síntese de transporte de citocininas, constituindo-se na forma de N inorgânico para as células (FAGAN et al., 2016; CASTRO, 2016).

A cana-de-açúcar é uma Poaceae, de metabolismo de carbono C4, conhecida por ser bastante eficiente em condições de clima tropical, uma vez que praticamente anula a fotorrespiração, apresentando altas taxas de fotossíntese líquida e alta eficiência na utilização do N e da energia solar, fato este que revela grande importância do N para essa espécie. Por fazer parte da constituição dos aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos, o N tem participação direta e indireta em processos bioquímicos e sua carência acarreta na diminuição da síntese de clorofila e aminoácidos essenciais, além de diminuir a energia necessária para produção de carboidratos e esqueletos carbônicos, refletindo no desenvolvimento e rendimento da cultura (MALAVOLTA et al., 1997; DA SILVA et al., 2015).

O N é o nutriente que mais gera dúvidas quanto à recomendação técnica e econômica. O N disponível para as plantas no solo é suprido pela fixação biológica, mineralização da matéria orgânica e adição de fertilizantes nitrogenados. Nesse contexto, pensando-se na cana-de-açúcar, podemos citar algumas práticas como fontes alternativas que favorecem o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, maior absorção de N e fixação biológica: N mineralizado dos restos de cultura da própria cana, N mineralizado da matéria orgânica do solo e N armazenado no tolete de plantio (LUZ et al., 2017).

Raij et al. (1996) recomendam, para cana planta no estado de São Paulo, 30 kg ha⁻¹ de N no sulco de plantio e 30 kg ha⁻¹ a 60 kg ha⁻¹ de N em cobertura, no final do período de chuvas, dependendo da meta de produção. Porém, ainda há dúvidas quanto ao parcelamento da adubação nitrogenada em cana planta. O parcelamento da adubação justifica-se, uma vez que altas doses de fertilizante nitrogenado solúvel no sulco de plantio, quando as plantas possuem poucas raízes e em um período de precipitação alta, podem resultar em baixa eficiência do seu uso. Vale ressaltar que a viabilidade de parcelamento com N em cana planta vai depender da época de plantio, textura do solo e regime pluviométrico (LUZ et al., 2017).

Em relação às fontes nitrogenadas, emprega-se a fonte que apresentar menor custo por unidade de N, sendo utilizadas geralmente a aquamônia (líquida) e a ureia (sólida), sendo a ureia o fertilizante

nitrogenado mais utilizado no mercado brasileiro e de menor custo por unidade de N. Em situações em que a incorporação da ureia ao solo não é possível, outras fontes como o nitrato de amônio e o sulfato de amônio podem ser boas alternativas (LUZ et al., 2017).

Adubação fosfatada

Depois do nitrogênio, o fósforo é o elemento que mais limita o crescimento dos vegetais, fato que pode ser explicado pela participação na formação inicial e pelo desenvolvimento das raízes. O fósforo atua em inúmeros processos metabólicos da planta, com destaque para o fornecimento e armazenamento de energia.

Vale destacar que a eficiência na utilização do P como fertilizante é baixa, o que implica em aplicações de doses elevadas. De acordo com Rosseto et al. (2008b), um dos fatores responsáveis pela baixa eficiência da adubação com fósforo nos solos brasileiros é o alto teor de óxidos de ferro e alumínio, que tendem a promover a sua fixação e, consequentemente, indisponibiliza o elemento para a planta.

Luz et al. (2017) afirmam que, em solos com teores muito baixos de P (P em resina $< 10 \text{ mg dm}^{-3}$), são indicadas aplicações em área total, uma prática conhecida como fosfatagem. Esta prática é realizada principalmente em solos arenosos ou com teor de argila menor do que 30%, a qual tende a diminuir a fixação do elemento. A fosfatagem deverá ser feita logo após a calagem e a gessagem. Vários benefícios são advindos da aplicação do P, tais como maior quantidade de P em contato com o solo, maior volume de solo explorado pelo sistema radicular e maior absorção de água e outros nutrientes (ROSSETO et al., 2008b).

Outro ponto importante é a questão da solubilidade. As fontes de P diferem quanto à sua eficiência e, consequentemente, promovem diferentes respostas na produtividade da cana. As fontes de P parcialmente solúveis apresentam um bom desempenho na cultura, uma vez que o fósforo é liberado de maneira gradual ao longo do tempo, gerando um maior aproveitamento pela planta ao longo do seu desenvolvimento (LUZ et al., 2017).

Segundo Vitti et al. (2016), com o adequado fornecimento de P_2O_5 na implantação da cultura, tanto em área total como no sulco, não se faz necessária a utilização de P_2O_5 na soqueira. A grande maioria dos experimentos demonstram que há maior resposta ao fósforo quando este é aplicado em dose completa no plantio, não havendo a necessidade posterior de adubação fosfatada nas soqueiras (RAIJ et al., 1996). Considerando o teor de fósforo no solo e a produtividade, encontra-se na Tabela 1 a recomendação de adubação fosfatada. Entretanto, de acordo com o IAC, em áreas onde o teor P no solo seja menor que 15 mg dm^{-3} (extrator de resina), aplica-se nas soqueiras 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 .

Tabela1 - Recomendação de adubação fosfatada P_2O_5 para plantio de cana-de-açúcar.

Produtividade esperada (TCH)	Fósforo ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$)			
	0-6	7-15	16-40	>40
	P_2O_5 (kg ha^{-1})			
< 100	180	100	60	40
100-150	180	120	80	60
> 150	-	140	100	80

Fonte: Raij et al. (1996).

Adubação potássica

O potássio é o macronutriente mais extraído pela cana-de-açúcar. A maior parte do elemento absorvido tende a se concentrar nos colmos e cerca de 45% permanece nas folhas (ROSSETO et al., 2008c).

Ao contrário do nitrogênio, o potássio não faz parte de nenhum composto orgânico na planta, ou seja, não tem função estrutural. Sua principal função é o de ativador enzimático, participando de muitos processos metabólicos. Além disso, o potássio apresenta grande importância na expansão celular, formando de um grande vacúolo central que ocupa cerca de 80% a 90% do volume da célula (PRADO, 2008).

Segundo Malavolta et al. (1997), o potássio atua na abertura e fechamento de estômatos. O elemento influencia o ótimo turgor das células-guarda, pois eleva o potencial osmótico dessas células, resultando em absorção de água e, conseqüentemente, em maior turgor e abertura dos estômatos. A abertura e fechamento dos estômatos é importante na taxa de fotossíntese, pois em plantas que estão deficientes em K, a abertura dos estômatos não ocorre de maneira adequada, diminuindo a entrada de CO₂ (PRADO, 2008).

De acordo com Silveira e Malavolta (2000), as plantas bem supridas com potássio são mais resistentes a secas e geadas, em razão da maior eficiência no uso da água, ou seja, mantêm maior quantidade de água nos tecidos em relação às plantas sob deficiência nutricional. Com maior teor de água nas células, o potássio irá favorecer as reações metabólicas e também a orientação das folhas, fazendo com que ocorra maior interceptação da luz (MALAVOLTA, 1980).

De acordo com o IAC, a recomendação de adubação potássica, tanto na cana planta como nas soqueiras, é baseada na análise de solo e na expectativa de produtividade. Quanto maior for a expectativa da produtividade, maiores serão as doses de K. Espera-se maior resposta à aplicação de K em solos que apresentem cerca de $< 1,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K (PRADO, 2008; LUZ et al., 2017). A Tabela 2 mostra, a seguir, a recomendação de adubação potássica no sulco de plantio da cana-de-açúcar (Tabela 2).

Tabela 2 - Recomendação de adubação potássica (K₂O, em kg ha⁻¹) para plantio de cana-de-açúcar.

Produtividade esperada (TCH)	Fósforo ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$)			
	0,0-0,7	0,8-1,5	1,6-3,0	3,1-6,0
	K ₂ O (kg ha ⁻¹)			
< 100	100	80	40	40
100-150	100-150	120	80	60
> 150	>150	160	120	80

Fonte: Raij et al. (1996).

Adubação com enxofre

Apesar do enxofre ser um nutriente essencial para as plantas, provavelmente é o macronutriente menos empregado nas adubações. A sua deficiência em extensas áreas do Brasil é fator limitante da produção agrícola. Na agricultura brasileira, as fontes mais comuns de enxofre são o superfosfato simples (12% S-sulfato), sulfato de amônio (24% de S-sulfato), sulfato de potássio (18% de S-sulfato) e também o gesso, um subproduto da fabricação de ácido fosfórico (CUNHA et al., 2001; HOROWITZ; MEURER, 2006; RAIJ, 2017). De acordo com Luz et al. (2017), as necessidades de S dos canaviais estão sendo satisfeitas por meio de gessagens e uso de resíduos orgânicos, como torta de filtro, vinhaça e fertilizantes orgânicos.

A concentração de enxofre nos solos varia de 0,1% em solos minerais até 1% em solos orgânicos. A proporção de enxofre no solo varia de acordo com o tipo de solo e sua profundidade. Entretanto, grande parte desse elemento está na forma orgânica (60% - 90% do total como S-aminoácidos, S-fenóis, S-carboidratos, S-lipídeos, S-húmus) e necessita passar pelo processo de mineralização para se tornar disponível às plantas (SO_4^{2-}). Portanto, a matéria orgânica é considerada como um reservatório de S do solo. Solos arenosos e com baixo teor de matéria orgânica ($<20 \text{ g kh}^{-1}$) podem apresentar pouca capacidade de suprir as necessidades nutricionais da planta em relação a esse elemento (RAIJ et al., 1997; HOROWITZ; MEURER, 2006; PRADO, 2008; RAIJ, 2017).

Conforme Malavolta (1981), os compostos orgânicos de enxofre no solo estão sob a forma de aminoácidos livres, sulfatos orgânicos, derivados de quinomas e aminoácidos com enxofre. A mineralização do enxofre depende da relação entre carbono e enxofre (C/S) no solo ou substrato.

Segundo Luz et al. (2017), quando a palhada é mantida sobre o solo em sistema de colheita de cana crua, grande parte do S contido no resíduo vegetal pode retornar ao solo. Em resíduo contendo relação C:S abaixo de 200 e acima de 400, predominará, respectivamente, a mineralização e imobilização do S pelos microrganismos presentes do solo.

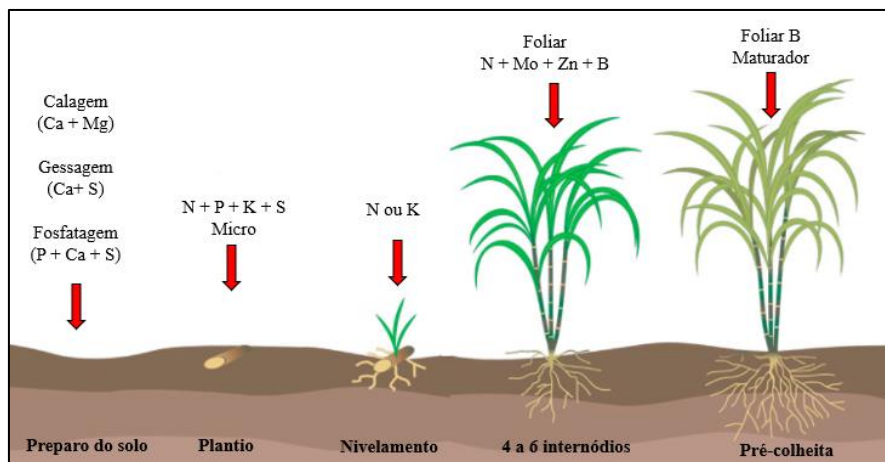
Nas plantas, os compostos de enxofre atuam nas reações fisiológicas e bioquímicas, participando de dois aminoácidos essenciais (cistina e metionina). Esses aminoácidos fazem parte da composição de todas as proteínas. Além disso, o enxofre participa diretamente na redução do nitrato na fixação biológica do nitrogênio e na síntese de proteínas nos tecidos vegetais e reprodutivos da planta (VITTI et al., 2006; PRADO, 2008; RAIJ, 2017).

Os sintomas de deficiência de S são semelhantes aos da deficiência de nitrogênio: início nas folhas mais novas e as plantas se apresentam uniformemente cloróticas. A deficiência deste nutriente interrompe a síntese de proteínas, por estar relacionado com a atividade da nitrato redutase, diminuindo, assim, o aproveitamento do N pela planta; diminui a fotossíntese e a atividade respiratória; reduz o teor de gorduras e diminui a fixação livre e simbiótica do N_2 atmosférico (VITTI et al., 2006).

Adubação com micronutrientes

Quando se trata de adubação com micronutrientes em cana-de-açúcar, as pesquisas apresentam muitos resultados contraditórios (LUZ et al., 2017). Além disso, a cana-de-açúcar pode apresentar o fenômeno de fome oculta em relação aos micronutrientes, ou seja, a deficiência existe e limita economicamente a produtividade, porém a planta não manifesta sintomas visuais (MELLIS et al., 2008). No processo de produção da cana, é possível nutrir o canavial com micronutrientes em diferentes fases do desenvolvimento vegetativo (Figura 1).

Figura 1 - Esquema do fornecimento de macro e micronutrientes ao longo do desenvolvimento vegetativo da cultura.



Fonte: Luz e Quitino (2013). Forplant.

Com base na pesquisa de Luz e Quitino (2013), segue uma sugestão de recomendação de aplicação de micronutrientes, levando em consideração a quantidade exigida pela cultura para a produtividade de cana-de-açúcar na faixa de 120 t ha^{-1} a 130 t ha^{-1} (Tabela 3).

Tabela 3 - Recomendação de adubação de micronutrientes para cana-planta.

Micronutrientes	Extração (g ha ⁻¹)		%	Teor Solo (mg dm ⁻³)	Sólido Oxi-Sulfato Dose (kg ha ⁻¹)		Líquido			
							Sais		Quelativado	
	Argiloso	Arenoso			Argiloso	Arenoso	Dose (kg ha ⁻¹)	Dose (kg ha ⁻¹)		
									Argiloso	Arenoso
Boro	390	300	77	< 0,6	2,50	1,50	1,25	0,75	0,75	0,45
Zinco	930	670	72	< 1,2	5,00	3,50	2,50	1,75	1,50	0,90
Cobre	394	252	64	< 1,2	2,50	1,50	1,25	0,75	0,75	0,45
Manganês	3.747	2.315	62	< 5,0	5,00	3,00	2,50	1,50	1,50	0,90
Ferro	15.540	6.157	40	< 12,0						

Fonte: Luz e Quitino (2013).

A indicação de adubação deve ser precedida da análise de solo e folhas, acompanhada da observação das lavouras no campo. O conjunto dessas práticas, quando aplicadas de forma correta, podem gerar aumento significativo de produção, com posterior redução no custo, com agregação de valor ao produto final.

Considerações finais

A avaliação da fertilidade do solo é uma atividade de suma importância na agricultura, devendo-se levar em conta as condições do solo e os fatores que afetam a produtividade e a necessidade de nutrientes.

Diversos recursos são utilizados para a avaliação da fertilidade do solo, destacando-se a análise do solo, ferramenta essencial para estabelecer quantidades de corretivos, e os fertilizantes a serem aplicados na área agrícola, objetivando não somente elevar ou manter os teores dos elementos no solo em faixas ideais, mas também diagnosticar problemas de toxidez de alguns elementos, de forma que possa gerar retorno econômico o mais favorável possível. Portanto, cabe ao responsável técnico interpretar os resultados e indicar a melhor forma e momento para aplicação dos insumos.

Referências

ABBOUD, A. C. S. **Eficiência da adubação verde associada a fosfato natural de Patos de Minas**. Itaguaí, 1986. 298 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1986.

AMBROSANO, E. J. et al. Crop rotation biomass and arbuscular mycorrhizal fungi effects on sugarcane yield. **Scientia Agrícola**, v. 67, n. 6, p. 692-701, 2010.

AMBROSANO, E. J. et al. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosa. **Bragantia**, v. 10, n. 4, p. 810-818, 2011.

AMBROSANO, E. J. et al. **Uso de plantas para cobertura do solo e adubação verde nas áreas de implantação e reforma da cana-de-açúcar.** In: SILVA, F. C.; ALVES, B. J. R.; FREITAS, P. L. Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos. Brasília: Embrapa, 2017. 938 p.

BENEDINI, M. S. Recomendação de calcário para a cana-de-açúcar. In: Seminário de Tecnologia Agrônômica, 1988, Piracicaba. Anais[...] Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1988. p. 99-102.

BENITO, M. et al. Evaluation of maturity and stability of pruning waste compost and their effect on carbon and nitrogen mineralization in soil. Source. **Soil Science Society of America Journal**, v. 170, p. 360-370, 2005.

BOLONHEZI, D.; BOLONHEZI, A.C.; CARLOS, J.A.D. Adubação verde e rotação de culturas para cana-de-açúcar. In: LIMA FILHO, O.F.; AMBROSANO, E.J.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e práticas.** Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 127-158.

CASTRO, S. G. Q. **Manejo da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar e diagnose por meio de sensores de dossel.** 2016. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

COLETTI, J. T. et al. Remoção de macronutrientes pela cana-planta e cana-soca, em argissolos, variedades RB835486 e SP81 3250. In: Congresso Nacional da Sociedade dos técnicos açucareiros e alcooleiros do Brasil, 2002, Recife. Anais [...] Piracicaba: Stab, 2002. p.316-321.

CUNHA, M. K. et al. Doses de nitrogênio e enxofre na produção e qualidade da forragem de campo natural de planossolo no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.30, n.3, p.651-658, 2001.

CREWS, T. E.; PEOPLES, M. B. Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer-based Agroecosystems. **Nutrient cycling in Agroecosystems**, Germany, v. 72, n.2, p. 101-120, 2005.

DA SILVA, F. C.; ALVES, B. J. R.; DE FREITAS, P. L. **Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos**. Brasília: Embrapa, 2015. 586 p.

DEMATÊ, J.L.I. Recuperação e manutenção da fertilidade dos solos. **Revista Visão Agrícola**, v.1, p.48-59, 2004.

ESPINDOLA, J. A. A.; GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L. de. Adubação verde para hortaliças. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA 46., 2006, Goiânia. Anais eletrônicos[...] Congresso brasileiro de olericultura 46, Goiânia: ABH, 2004.

FAGAN, E. B. et al. **Fisiologia vegetal: metabolismo e nutrição mineral**. São Paulo: Andrei, 2016.

GABRIELLE, B.; SILVEIRA, J. D.; FRANCOU, C. Simulating urban watw compost effects on carbono and nitrogen dynamics using a biochemical index. **Journal of Environmental Quality**, v.33, p. 2333-2342, 2004.

HANDAYANTO, E.; GILLER, K. E.; CADISH, G. Regulating N release from legume tree prunings by mixing residues of diffrent quality. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.29, p.1417-1426, 1997.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, p.822-828, 2006.

IGUE, K. Dinâmica da matéria orgânica e seus efeitos na propriedade do solo. In: **Adubação verde no Brasil**. Campinas: Fundação Cargill, 1984. 363 p.

KORNDÖRFER, G. H. Fósforo na cultura da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, São Pedro, SP. Anais[...] Piracicaba: Potafos, 2004. p. 290-306.

KORNDÖRFER, G. H.; RAMOS, L. A.; REIN, T. A. Calagem, silicatagem, gessagem e fosfatagem para cana-de-açúcar. In: SILVA, F. C.; ALVES, B. J. R.; FREITAS, P. L. **Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos**. Brasília, Embrapa, 2017. p. 938.

LINHARES, P. C. F. et al. Decomposição do Mata-pasto em cobertura no desempenho agrônômico do coentro. **Revista Verde**, Mossoró, v.5, n.1, p.168 – 171, 2010.

LUZ, P. H. C.; QUINTINO, T. A. Manejo da produção de fertilizantes organominerais balanceados para a cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR, 6., 2013, Piracicaba. Anais[...] Piracicaba: Esalq/USP, 2013.

LUZ, P. H. C.; QUINTINO, T. A.; COLETI, J. T.; BET, J. A. Nutrição mineral e fertilização em cana-de-açúcar. In: SILVA, F. C.; ALVES, B. J. R.; FREITAS, P. L. **Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos**. Brasília, Embrapa, 2017. p. 938.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa do Potássio e do Fosfato, 1997.

MALAVOLTA, E.; GOMES, P.; ALCARDE, J. C. **Adubos e adubações**. São Paulo: Nobel, 2002.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MASCARENHAS, H. A. A. et al. **Efeito residual das leguminosas sobre o rendimento físico e econômico da cana-planta**. Campinas: IAC, 1994. p. 15 (IAC Boletim científico, 32).

MELLIS, E. V.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. Micronutrientes. In: **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2008. p. 331-336.

MIYASAKA, S. et al. **Adubação orgânica, adubação verde e rotação de culturas no Estado de São Paulo**. Campinas: Fundação Cargill, Parte 1, n. 2, p. 1-109, 1984.

MYRES, R. J. K. et al. The synchronization of nutrient mineralization and plant nutrient demand. In: WOOLMER, P.L.; SWIFT, M.J., (ed.) **The biological management of tropical soil fertility**. New York: John Wiley and Sons, 1994. Cap. 5. p. 81-116.

OLIVEIRA, E. C. A. et al. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 34, p. 1343-1352, 2010.

ORLANDO FILHO, J.; MACEDO, N.; TOKESHI, H. Seja o doutor do seu canavial. **Encarte de informações agrônômicas**, Piracicaba: Potafos, v. 67, p. 1-16. 1994.

PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora UNESP, 2008, p. 407.

PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O. **Características de corretivos agrícolas**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2004. p. 28.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2000. p. 111.

RAIJ, B. V. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. p. 285. (IAC. Boletim técnico, 100).

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. 2. ed. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2017. p. 420.

REIN, T. A. et al. **Manejo da Adubação Fosfatada para Cana-de-Açúcar no Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2015.

ROSSETO, D. et al. Calagem para a cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, v. 63, n.1, p.105-119, 2004.

ROSSETO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C. Fertilidade do solo, nutrição e adubação. In: **CANA-DE-AÇÚCAR**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2008a. p. 221-237.

ROSSETO, R. et al. Fósforo. In: **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, p. 271-288, 2008b.

ROSSETO, R. et al. Potássio. In: **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, p. 289-312, 2008c.

SANTOS, F.; BORÉM, A. **Cana-de-açúcar: do plantio à colheita**. Ed. Viçosa: UFV, 2016.

SANTIAGO, A. D. ; ROSSETTO, R. **Calagem**: árvore do conhecimento de Cana-de-Açúcar. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Jul 2021.

SILVEIRA, R. L.V. A.; MALAVOLTA, E. **Nutrição e adubação potássica em Eucalyptus**. Piracicaba: 2000. p. 12. (Informações Agronômicas, 91).

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso de gesso agrícola nos solos do Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005.

SOUZA, J. L.; RESENDE, P. **Manual de horticultura orgânica**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2012. p. 843.

TORRES, J. L. et al. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo em um solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 609 -618, 2005.

VALE, F. R. et al. **Fertilidade do solo:** dinâmica e disponibilidade dos nutrientes de plantas. Lavras: UFLA, 2004. 171 p.

VITTI, G.; MAZZA, J. A. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, n.97, p.1-16. 2002. Encarte técnico.

VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre. In: FERNANDES, M.S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. cap. 12, p. 300-322.

VITTI, G. C.; LUZ, P.H.C.; ALTRAN, W.S. Nutrição e adubação. In: SANTOS, F.; BORÉM. **Cana-de-açúcar do plantio à colheita**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2016.

XU, X.; HIRATA, E. Decomposition patterns of leaf litter of seven common canopy species in a subtropical forest. N and P dynamics. **Plant and Soil**, v. 273, n.1-2, p. 279 -289, 2005..

MÉTODOS DE IRRIGAÇÃO/FERTIRRIGAÇÃO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Luiz Vitor Crepaldi Sanches³

Introdução

Ao transitarmos pelas rodovias do Estado de São Paulo, é comum nos depararmos com imensas áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Muitos acreditam que a cultura é rústica e resistente à falta de água, não sendo necessário o incremento via irrigação. Entretanto, existem duas vertentes sobre esta afirmação.

De fato, a cana-de-açúcar consegue se manter viva sob estresse hídrico. Contudo, nessa condição, apresenta baixa produtividade e má qualidade, sendo fundamental a suplementação hídrica para seu crescimento e desenvolvimento e, assim, ter sua produtividade maximizada.

A suplementação hídrica da cultura da cana é fundamental para o fornecimento de água em períodos de estiagem, pois, na atualidade, os regimes pluviométricos já não mais ocorrem de forma distribuída pelas estações climáticas durante o ano. Após a colheita, a cultura necessita de suprimento de água para favorecer a rebrota das soqueiras, o que tem impacto direto na safra do ano seguinte.

Nesse contexto, a cana é a cultura com maior área irrigada no Brasil. Na safra 2018/2019, dos 11,2 milhões de hectares cultivados com cana-de-açúcar no país, 3,66 milhões foram irrigados (AGROSATÉLITE, 2019).

Segundo a Agência Nacional das Águas – ANA (2019), a área irrigada no Brasil é dividida em dois segmentos, sendo um deles com a aplicação de águas captadas em mananciais (irrigação) e o outro, com a

³ Engenheiro Agrônomo, Dr., Docente das Faculdades Galileu e Gran Tietê, luizvitorsanches@hotmail.com

aplicação de águas residuárias e vinhaça (fertirrigação) originária do processo industrial de produção de etanol e açúcar. Dos 2,1 bilhões de m³ de água aplicados nos canaviais brasileiros, 27,7% foram aplicados na forma de fertirrigação e 72,3% na forma de irrigação. Entretanto, a área irrigada no Brasil foi de 748,9 mil hectares, enquanto que a fertirrigada foi de 2,9 milhões, o que demonstra que uma menor proporção de área necessita de um grande volume de água para êxito no cultivo da cultura da cana.

Grande parte da área irrigada com água dos mananciais está localizada na região norte-nordeste (38,5%), o que representa 456,4 mil hectares, e apenas 2,9% no centro-sul.

A aplicação de vinhaça e águas residuárias via sistemas de irrigação é fundamental para as indústrias de etanol, açúcar e biomassa, pois o volume gerado diariamente é imenso, sendo inviável economicamente a sua estocagem. Segundo a Agência Nacional das Águas – ANA (2009), a indústria gera de 40 a 80 litros de etanol, 70 a 120 kg de açúcar e 70 a 100 Kwh/t para cada tonelada de cana processada, ao passo que se gera de 0,5 a 10 m³ de vinhaça e água residuárias por tonelada processada, sendo a média, na região centro-sul, de 1 m³/t.

Segundo o Agrosatélite (2019), o Estado de São Paulo é líder no segmento, com 52,7% da área cultivada, cerca de 5,9 milhões de hectares, processando anualmente cerca de 345 milhões de toneladas de cana, o que corresponde à geração de 345 milhões de m³ de vinhaça e água residuárias, o que se compara a 138 mil piscinas olímpicas ou mesmo 1.150 navios petroleiros carregados com vinhaça. Segundo a Novacana (2019), a moagem da cana ocorre, em média, por 234 dias no ano, o que corresponde à geração diária média de 1,5 milhões de m³ de vinhaça, demonstrando a importância da aplicação deste resíduo industrial nas lavouras de cana-de-açúcar.

Objetivos da irrigação/fertirrigação

Segundo a Agência Nacional das Águas – ANA (2019), há três tipos de irrigação ou fertirrigação em canaviais: salvamento, déficit e plena.

A irrigação de salvamento é aquela praticada com o intuito de garantir o mínimo de umidade no solo em períodos de seca, reduzindo, desta maneira, o estresse hídrico e favorecendo a rebrota das soqueiras ou mesmo novos plantios (ANA, 2019). São consideradas irrigações de baixo volume (uma lâmina de 20 a 100 mm/ano), quando comparadas à necessidade hídrica para cada ciclo vegetativo da cana, que é de 1.500 a 2.500 mm de água por ano.

A irrigação do tipo déficit tem o intuito de suprir, em média, 50% da necessidade hídrica da cultura em estresse hídrico, aplicando-se lâminas dentre 200 e 400 mm/m²/ano. Tal variação depende do tipo de solo, topografia, clima da região, cultivar e eficiência do sistema de irrigação utilizado.

A irrigação plena constitui-se pela aplicação de quase toda a necessidade hídrica da cultura em estresse hídrico, com lâminas que variam de 400 a 1.000 mm/ano, podendo chegar a quase 50% de toda a necessidade hídrica da cultura durante cada ciclo de produção.

É importante o conhecimento dos objetivos da aplicação da irrigação, pois dos 11,2 milhões de hectares cultivados com cana-de-açúcar, cerca de 9,6 milhões de hectares estão localizados em regiões com déficit hídrico inferior a 800 mm por ano, o que torna economicamente viável a sua condução, com menor necessidade de aplicação de lâmina de irrigação. Entretanto, 1,6 milhões de hectares se encontram em regiões com déficit hídrico maior que 800 mm/ano, o que exige suplementação hídrica com frequência via irrigação.

A utilização de vinhaça na forma de fertirrigação visa reciclar os nutrientes extraídos pela cultura da cana durante o seu desenvolvimento e que estão disponíveis no resíduo. A aplicação de vinhaça faz com que os teores de nutrientes no solo e a umidade se elevem, favorecendo o desenvolvimento da cultura, além de propiciar economia na aquisição de adubos e fertilizantes.

Utilização de águas residuárias e vinhaça da indústria sucroalcooleira na cultura da cana

A legislação brasileira sobre o uso e aplicação de vinhaça em solo agrícola é regida pelas Portarias nº 323, de 29 de novembro de 1978, e nº 158, de 03 de novembro de 1980, emitidas pelo extinto Ministério do Interior, as quais dispõem sobre a proibição do lançamento direto ou indireto da vinhaça em qual seja o corpo hídrico (CETESB, 2015; ANA, 2019).

De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2015), a Norma Técnica P 4.231/2005, regulamenta a disposição da vinhaça em uso agrícola no Estado de São Paulo, estabelecendo formas e métodos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça. A referida norma impede a aplicação de vinhaça em áreas de preservação permanente, bem como em distâncias menores que 100 metros de poços de abastecimento de água e, pelo menos, 1 km de distância de núcleos populacionais. Outras medidas normativas estabelecem ainda que, no momento de aplicação de vinhaça, o aquífero livre deve estar, no mínimo, a 1,5 m de profundidade e que, em áreas com declive acima de 15%, deve-se realizar barreiras de contenção para evitar erosão. A incorporação da vinhaça ao solo só é permitida com autorização da CETESB.

Para se determinar o volume de vinhaça a ser aplicado em uma área, será necessária uma análise de solo que contemple pH, teores de potássio, capacidade de troca catiônica (CTC) e análise da vinhaça principalmente quanto ao teor de potássio. Com as análises concluídas, faz-se o cálculo aplicando-se a seguinte fórmula:

$$V = \frac{[(0,05 \times CTC - K_{\text{solo}}) \times 3744 + 185]}{K_{\text{vinhaça}}}$$

Onde:

V = volume de vinhaça a ser aplicada em m³;

$0,05 = 5\%$ da CTC em pH 7,0;

CTC = valor da CTC em pH 7,0;

K_{solo} = teor de potássio no solo a uma profundidade de 80 cm;

3744 = constante de transformação de cmolc K/dm^3 para kg K/ha ;

185 = quilos de K_2O extraído pela cultura da cana-de-açúcar por corte por hectare;

$K_{\text{vinhaça}}$ = teor de potássio na vinhaça ($\text{kg de K}_2\text{O por m}^3$).

Podem existir situações em que o cálculo demonstrará que não será possível a aplicação de vinhaça em determinado local, como, por exemplo, em um solo com baixa CTC (3 cmolc/dm^3) e alto teor de potássio ($0,45 \text{ cmolc/dm}^3$) em relação à CTC, correspondendo a 15% da CTC ocupada pelo potássio, podendo resultar em salinização do solo.

Por outro lado, solos com CTC média (10 cmolc/dm^3) e baixo teor de potássio ($0,45 \text{ cmolc/dm}^3$) na relação com a CTC, correspondendo a 4,5% da CTC ocupada pelo potássio, o que possibilita uma aplicação de cerca de 190 m^3 de vinhaça por hectare. Em solos com alta CTC ($15,1$ a 50 cmolc/dm^3), os volumes a serem aplicados ultrapassam facilmente os 1.000 m^3 de vinhaça por hectare, devendo-se ter o cuidado para que não haja escoamento superficial e, assim, contaminação de corpos hídricos.

Este é um fato de grande importância no Estado de São Paulo, tendo em vista que na região centro-oeste estão localizados os principais polos industriais sucroalcooleiros, como a Raizen Energia, uma das maiores indústrias de açúcar, etanol e bioenergia do mundo, localizada no município de Barra Bonita, onde os solos, em sua maioria, apresentam CTC de média a alta, o que favorece a aplicação da vinhaça com maiores lâminas. Entretanto, nessa região esbarramos em um entrave: a declividade. Locais com baixa declividade são passíveis da aplicação de maiores volumes; porém, em declividades acima de 15% não se deve realizar a aplicação volumosa, sob risco de um escoamento superficial, que pode resultar em erosão ou um grande acúmulo de vinhaça nas curvas de nível, podendo levar à infiltração de vinhaça em profundidades maiores

que 80 cm e a uma consequentemente contaminação do solo e até mesmo do lençol freático.

Reservatórios para acúmulo de vinhaça

A Portaria MINTER nº 124, de 20 de agosto de 1980, descreve as formas de armazenamento de substâncias capazes de causar poluição hídrica, como é o caso da vinhaça.

Os reservatórios de vinhaça não podem ser escavados, devendo conter revestimento para evitar a sua infiltração de água no solo. Os materiais mais utilizados para o revestimento de reservatórios de contenção de vinhaça são a vinilona, a manta asfáltica e a manta de PEAD (polietileno de alta densidade).

A vinilona e a manta de PEAD são geomembranas insolúveis em solventes orgânicos e químicos, além de serem resistentes às reações químicas de soluções de bases, ácidas e contendo sais. São materiais de alto custo, porém com garantia prolongada, a qual, dependendo do fabricante, pode chegar a 20 anos. As emendas são realizadas com produto próprio que faz a fusão das mantas, evitando que ocorram vazamentos.

A manta asfáltica é um dos métodos de impermeabilização mais utilizados no Brasil, pois é um material flexível, resistente a rachaduras, de menor custo e maior durabilidade. Entretanto, na prática, o que se observa é um grande número de emendas, sendo uma a cada 90 cm, as quais, no momento da instalação, devem ser feitas com cuidado, pois a manta sofre dilatação em altas temperaturas (verão), o que pode fazer com que emendas malfeitas se rompam e permitam a infiltração da vinhaça pelo perfil do solo, gerando contaminação do lençol freático.

Formas de transporte da vinhaça para realização da fertirrigação

Antes dos anos 80, era comum a utilização de canais abertos. As escavações eram simples (sem nenhum tipo de revestimento) e com baixo custo de implantação. Como resultado, a infiltração da vinhaça no solo levava a perdas elevadas, salinização do solo e contaminação do lençol freático.

Hoje existem basicamente três formas de transporte da vinhaça até os locais de aplicação no campo, podendo ser rodoviário (caminhões), por canais abertos ou por redes adutoras.

Transporte rodoviário

O transporte rodoviário é realizado por caminhões-tanques de fibra de vidro. Como pode ser observado na Figura 1, alguns modelos, além de transportar, podem aplicar a vinhaça de forma pressurizada por uma barra na parte traseira da carroceria, com orifícios que despejam o líquido diretamente na linha de plantio ou soqueira, ou mesmo serem acoplados ao carretel irrigador para promover a fertirrigação.



Figura 1 – Caminhão irrigador de vinhaça localizada. Fonte: Nonino (2021).

É comumente utilizado no início da safra para transportar a vinhaça em distâncias que não ultrapassem os 100 km da usina (distância econômica), podendo atender áreas dispersas. Para que o transporte seja viável, é comum concentrar a vinhaça. Períodos chuvosos inviabilizam a aplicação devido às condições do solo e do sistema viário precário.

Os caminhos são capazes de aplicar entre 7 e 40 m³ de vinhaça por hectare. Existem equipamentos que podem ser instalados nos caminhos para aplicações de baixo volume (entre 0,3 e 1,5 m³ por hectare).

Canais abertos

Os canais abertos são uma das formas mais utilizadas para o transporte da vinhaça das usinas até boa parte das áreas de cultivo, devido ao baixo custo de implantação, além de atuarem por força gravitacional. Entretanto, dependem da altimetria da região, promovem a perda da área agricultável e podem gerar a necessidade de transposição de sistemas viários, além da existência dos riscos de perdas por infiltração. Outro ponto negativo é que animais silvestres, no período noturno, podem cair nos canais e não conseguir sair, acarretando prejuízos na fauna local.

Ainda de acordo com a Portaria MINTER nº 124/1980, os canais de transporte de vinhaça também devem ser revestidos para se evitar danos ambientais. Neste sentido, as opções para impermeabilização são a aplicação de manta asfáltica, PEAD ou até mesmo concreto.

Como visto anteriormente, a manta asfáltica sofre dilatação com temperaturas elevadas, é de fácil perfuração e de difícil ancoragem, além de possuir muitas emendas (mais de 1.200 por km). Por não ser resistente ao fogo, é comum deixar um carreador de cada lado do canal para evitar danos à sua estrutura, em caso de incêndio. Entretanto, isso acarreta grandes perdas de área cultivada.

Da mesma forma que a manta asfáltica, a manta de PEAD não resiste ao fogo, porém é altamente resistente à corrosão e é de difícil perfuração. Na Figura 2 se pode observar uma instalação com manta de PEAD, onde se deve deixar carreadores em ambos os lados para evitar que incêndios nos canaviais danifiquem a sua estrutura. Deve-se realizar a manutenção periódica de plantas daninhas em torno do canal e efetuar a limpeza da vinhaça remanescente.



Figura 2 – Canal de vinhaça em PEAD. Usina Guaíra – SP. Fonte: B&B Soluções Ambientais (2021).

A utilização de concreto como forma de impermeabilização de canais vem ganhando espaço no Brasil, pois, mesmo com maior custo de implantação, apresenta maior relação custo-benefício, uma vez que é altamente resistente ao fogo, podendo-se cultivar a cana-de-açúcar bem próxima a ele, sem perda considerável de áreas agrícolas. Possuem fácil manutenção e vida útil de mais de 10 anos. Na Figura 3 se pode observar um canal de vinhaça impermeabilizado no município de Lençóis Paulista/SP, com passagem para pedestres.



Figura 3 – Canal de vinhaça impermeabilizado com concreto. Lençóis Paulista - SP, 2021. Fonte: arquivo pessoal.

Devido à porosidade natural do concreto, é indicada a aplicação de polímeros impermeabilizantes que irão auxiliar na vedação dos poros, evitando a infiltração de vinhaça no solo e prolongando a vida útil da estrutura de concreto.

Redes adutoras gravitacionais e pressurizadas (fixas e móveis)

As redes adutoras podem ser implantadas utilizando-se simplesmente apenas a força da gravidade ou conjuntos de motobombas.

As redes adutoras que atuam por força gravitacional dependem da altimetria da região onde está inserida a usina geradora de vinhaça, atuando com metade da sua capacidade de condução (raio hidráulico) e utilizando materiais de baixo custo, como o PVC. Possui a vantagem de serem enterradas, não acarretando perdas de áreas agrícolas.

Na adutora gravitacional também podem ser acoplados motores a diesel que irão promover a fertirrigação nos canaviais por meio de diferentes sistemas de irrigação. A maior desvantagem deste sistema é que, devido à força gravitacional, a vazão de escoamento é limitada, permitindo-se acionar simultaneamente poucos pontos de fertirrigação ao longo da adutora.

Já as adutoras pressurizadas possuem toda a sua tubulação preenchida e com alta pressão, impulsionadas por motobombas elétricas de grande potência. Isso faz com que um grande volume de vinhaça seja transportado de forma rápida e eficiente, podendo-se acoplar ao sistema inúmeros equipamentos de irrigação, como carretéis irrigadores ou mesmo pivôs centrais, de forma simultânea. Mesmo com o alto custo de instalação por hectare, algumas usinas têm substituído os seus sistemas de transporte de vinhaça por adutoras pressurizadas fixas com pivôs centrais, que podem trabalhar de forma automatizada e escoar o grande volume de vinhaça gerado pela usina.

As adutoras pressurizadas (Figura 4) têm sido instaladas utilizando-se materiais resistentes a alta pressão e a corrosão, como é o caso do RPVC e do PEAD, fácil instalação e manutenção.



Figura 4 – Instalação de adutora de vinhaça pressurizada em tubulação de RPVC. Fonte: Irriga Engenharia (2021).

A utilização de adutoras pressurizadas móveis reduz o custo de instalação por hectare, pois a linha pressurizada fica enterrada e, a partir dela, faz-se a montagem de linhas secundárias de forma superficial no solo, utilizando-se tubos de alumínio leves com alta pressão de serviço (170 mca) e de simples montagem e desmontagem, podendo-se aproveitar a mesma rede em diferentes áreas.

Sistemas de irrigação

Para a cultura da cana-de-açúcar, é comum à utilização de sistemas de aspersão, como carretel enrolador com canhão ou barra de irrigação, pivô central e pivô rebocável, além da utilização de caminhões irrigadores que aplicam vinhaça na linha de cultivo.

Os sistemas por aspersão possuem a vantagem de trabalhar com bocais que propiciam a saída de partículas de até 2 cm em média, facilitando a aplicação de efluentes como a vinhaça, cujas partículas podem causar graves entupimentos em sistemas de irrigação por gotejamento, gerando prejuízos por baixa eficiência do sistema ou mesmo a sua completa inativação. Entretanto, países como Estados Unidos e Índia

vêm estudando a utilização deste método de irrigação com vinhaça diluída, que tem promovido maior produtividade e maior longevidade do canavial, porém com alto investimento por área.

Na Figura 5 pode-se observar um carretel irrigador em operação aplicando vinhaça. É o equipamento mais utilizado para promover a irrigação ou mesmo a fertirrigação em canaviais brasileiros, pois são versáteis, de fácil manuseio, podem operar em diferentes topografias e conseguem ultrapassar curvas de níveis graças ao seu canhão móvel, que pode ser puxado até a base fixa do carretel. Outra vantagem é a fácil regulagem da lâmina de aplicação, que pode ser ajustada de forma robusta, variando de modelo e fabricante.



Figura 5. Aplicação de vinhaça com carretel autopropelido com canhão. Lençóis Paulista/SP, 2021. Fonte: arquivo pessoal.

Um exemplo é o carretel irrigador da empresa Krebs, modelo 75, que pode aplicar uma vazão de 27 a 45m³/h e irrigar até 20 há. Já o modelo Krebs 140 possui vazão de 119 a 160 m³/h e irrigar até 80 ha.

O manuseio é feito de forma simples: o trator reboca o carretel irrigador até o local a ser irrigado, faz a desacoplagem e fixa o carretel ao solo. Em seguida, é feita a acoplagem do carretel ao sistema pressurizado

de distribuição de água ou vinhaça. Então o trator acopla o canhão e o puxa até todo o carretel ser desenrolado, permitindo o acionamento do sistema.

A pressão do fluido ao passar pelo carretel irrigador aciona o pistão, que faz o recolhimento da mangueira e, conseqüentemente, puxa o canhão irrigador e promove a irrigação. A velocidade de recolhimento determina a lâmina de rega a ser aplicada.

O carretel irrigador é considerado um sistema de irrigação de baixo custo por hectares, pois, por ser rebocável, é versátil e permite a irrigação de grandes áreas.

Entretanto, o caminho por onde o trator realiza o reboque do canhão de aspersão se torna uma área não agricultável, além do fato de ventos fortes poderem impedir a sobreposição de molhamento, reduzindo a uniformidade da aplicação.

Disponível no mercado, o carretel irrigador com barra de irrigação (Figura 6) possui a vantagem de maior uniformidade e eficiência, além de trabalhar com menor pressão (20 a 35 mca). Entretanto, devido ao seu porte, é de difícil transporte e suas barras podem se chocar com o solo ao passarem por curvas de nível, podendo danificar os aspersores ou mesmo a estrutura física da barra irrigadora. Existem modelos com 18, 30, 42 e 54 metros de largura, acoplados ao carro irrigador de quatro rodas.



Figura 6 – Barra irrigadora acoplada a carretel. Fonte: IrrigaBrasil (2021).

Outro sistema de irrigação com grande aplicação em canaviais são os pivôs centrais que operam de forma circular, podendo irrigar até 200 hectares por vez, dependendo da estrutura adquirida e do relevo da região. Devido ao trajeto circular, podem trabalhar de forma intermitente, conseguindo escoar boa parte dos efluentes gerados na indústria. A maioria dos pivôs centrais instalados em cana-de-açúcar operam, em média, com tamanhos de 100 ha irrigados. A empresa brasileira Irriga Engenharia (2021) instalou o maior pivô central do mundo (Figura 7) no município de Pedro Afonso, no Estado de Tocantins. Com um raio irrigado de 1.300 metros e 26 torres, o equipamento irriga 530 hectares com vazão de 506 m³/h e tempo de 44 horas para completar o ciclo de rega.



Figura 7 – Pivô central em Pedro Afonso – TO. Fonte: Irriga Engenharia (2021).

Segundo Fuzaro (2017), um alto investimento na aquisição de pivô central para a cultura da cana-de-açúcar com 100 ha irrigados é economicamente viável, pois, com a utilização do pivô, faz-se 6 cortes na área, ou seja, 6 anos de cultivo antes da reforma, com retorno financeiro (*payback*) em 2 anos e lucro líquido a partir do terceiro ano de colheita. Outro ponto importante relatado por Fuzaro (2017) é o tempo de vida útil do pivô central, que varia de 10 a 20 anos, além de ser um sistema de irrigação importante para a cultura da cana em regiões com baixas precipitações.

Nota-se na Figura 8 um pivô central da empresa Valley em operação, onde se percebe a excelente uniformidade de aplicação de irrigação ao longo do pivô.



Figura 8 – Pivô central série 7000 da Valley em operação. Fonte: Valley Irrigation (2021a).

Deve-se utilizar reguladores de pressão em cada aspersor, com a finalidade de se manter a pressão constante ao longo da tubulação. Os aspersores devem aplicar a lâmina adequada em cada trecho do sistema. Os aspersores próximos à base fixa devem jogar um pequeno volume de água, por moverem-se lentamente. Já os aspersores que estão longe do ponto fixo – por exemplo, a 1 km de distância – necessitam jogar um grande volume de água, por se moverem em maior velocidade para completar uma volta completa de 360°, cumprindo um trajeto muito maior do que os aspersores próximos a base.

Os pivôs rebocáveis podem ser levados de um local para outro (Figura 9) e irrigarem de 2 a 120 ha por vez. Os pivôs fixos acabam promovendo a rega em maiores áreas, porém, por não serem móveis, podem impossibilitar a irrigação de áreas que possam estar passando por déficits hídricos. Os pivôs rebocáveis acabam reduzindo o custo fixo e de mão-de-obra por hectare, mas existe a necessidade de adequação da adutora para os inúmeros pontos de acoplamento do equipamento.



Figura 9 – Pivô rebocável acoplado ao trator para deslocamento entre áreas. Fonte: Valley Irrigation (2021b).

Considerações finais

A irrigação – ou mesmo a fertirrigação – é fundamental para o suprimento hídrico da cana-de-açúcar durante períodos de estresse hídrico.

A aplicação da vinhaça como fonte de nutrientes é importante, pois reduz os custos com a aquisição de adubos e fertilizantes.

Para as indústrias sucroalcooleiras é fundamental o transporte e a aplicação da vinhaça em áreas agrícolas, pois o volume gerado é elevado, sendo inviável economicamente a sua estocagem.

As características físicas e químicas do solo e características químicas da vinhaça irão determinar o volume máximo em m³ a ser aplicado.

Deve-se realizar um estudo de viabilidade para a instalação dos diferentes tipos de transporte da vinhaça e sua aplicação pelos diferentes sistemas de irrigação existentes.

Conclusão

A aplicação de irrigação/fertirrigação na cultura da cana-de-açúcar é uma atividade fundamental para suprir suas necessidades hídricas e nutricionais. Além disso, a estocagem do principal efluente das usinas, a vinhaça, é inviável sob o ponto de vista econômico, sendo a sua aplicação em áreas agrícolas a melhor solução, com a vantagem de incremento de produtividade e ciclagem de nutrientes.

Referências

AGROSATÉLITE. **Projeto Canasat safra 2018/19. Mapeamento por imagens de satélites de sensoriamento remoto da cana-de-açúcar no Brasil.** Agrosatélite Geotecnologia Aplicada Ltda. Florianópolis - SC, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. **Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética.** Brasília: ANA, 2009. 294 p.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. **Levantamento da cana-de-açúcar irrigada e fertirrigada no Brasil.** 2. ed. Brasília: ANA, 2019. 31 p.

B&B Soluções Ambientais. **Canal de Vinhaça. Usina Guaíra – SP.** 2021. Disponível em: <https://bebsolucoesambientais.com.br/canal-de-vinhaca-usina-guaira-sp-2021/>. Acesso em em: 04 set 2021.

CETESB, **Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola.** Norma Técnica P4.231. 3. ed. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2015. 15 p.

FUZARO, A.M. **Viabilidade financeira do pivô central no cultivo de cana-de-açúcar no sudoeste goiano.** 2017. 45 p. Tese (Pós graduação em ciências agrárias) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde - GO, 2017.

IRRIGABRASIL. **Barra Irrigadora.** 2021. Disponível em: <https://www.irrigabrasil.com/produto/barra-irrigadora/#>. Acesso em: 30 ago 2021.

IRRIGA ENGENHARIA. **Projetos**. 2021. Disponível em: <http://www.irrigaengenharia.com.br/projeto/adutora-enterrada-rpvcprfv/> 49. Acesso em: 02 set 2021.

MINTER - Ministério de Estado do Interior. **Portaria nº 124, de 20 de agosto de 1980**. Disponível em: <http://www.oads.org.br/leis/3426.pdf>. Acesso em: 17 out 2021.

NONINO. **Conheça o caminhão aplicador de vinhaça**. Nonino indústria e comercio de implementos agrícolas. Bebedouro - SP, 2021. Disponível em: <https://www.nonino.ind.br/caminhao-aplicador-vinhaca>. Acesso em: 07 set 2021.

NOVACANA. **Os indicadores de moagem de cana das usinas**. Cana: Safra e moagem. 2019. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/indicadores-moagem-cana-usinas-210514>. Acesso em: 30 ago 2021.

VALLEY. **Valley center pivots**. Valley, Valmont Industries. 2021a. Disponível em: <https://www.valleyirrigation.com/center-pivots#utilityblocksupportinnerMoreThan3lBadges>. Acesso em: 24 de Agosto de 2021.

VALLEY. **Pivôs Rebocáveis**. Valley, Valmont Industries. 2021b. Disponível em: <https://www.valleyirrigation.com.br/piv%C3%B4s-reboc%C3%A1veis>. Acesso em: 24 ago 2021.

RESPOSTAS MORFOANATÔMICAS E FISIOLÓGICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES CONDIÇÕES HÍDRICAS

Natália Oliveira Totti de Lara⁴

Introdução

Os estudos que envolvem Anatomia e Morfologia Vegetal merecem destaque na área agrônômica, já que se trata de uma ciência que estuda a organização e a estrutura do corpo vegetal, sendo a planta, portanto, a matéria-prima da Agronomia. Entender como as plantas são organizadas e como é a resposta dessas plantas frente ao ambiente em que se encontram é primordial para trabalhar em áreas como Fitotecnia, Produção Vegetal, Produção de Mudas, Nutrição Mineral de Plantas e tantas outras. O trabalho de Silva et al. (2005) mostra algumas interrelações da Anatomia com algumas dessas áreas importantes na Agronomia.

Quando pensamos em entender o corpo das plantas é necessário também incluir nessa temática os estudos em Fisiologia Vegetal, já que a estrutura interna das plantas tem total ligação com a sua fisiologia; isto é, suas células e tecidos fazem parte de uma arquitetura muito rica e intimamente ligada com seus processos fisiológicos, como fotossíntese, transpiração, transporte e translocação de solutos nas plantas.

Dessa forma, este capítulo de revisão bibliográfica visa trazer informações relevantes e atuais sob o ponto de vista morfológico, anatômico e fisiológico em uma monocultura, a cana-de-açúcar, em uma situação particular: a condição hídrica. O papel da água na planta é de vital importância e, por isso, justificam-se os trabalhos que tratam dessa temática para a cana-de-açúcar. A água na célula contribui para a turgescência celular, ou pressão de turgescência, que ocorre em resposta

⁴ Bióloga, Dra., Docente das Faculdades Galileu, Gran Tietê e Faculdade de Tecnologia de Curitiba, natotti@gmail.com

ao aumento de volume da célula devido à resistência imposta pela parede celular a esse volume (KRAMER; BOYER, 1995). Por outro lado, a diminuição da turgescência causa uma diferença de potencial hídrico, que leva ao movimento da água em direção às células e tecidos mais secos. A regulação dessa turgescência é a chave para a resposta da planta às mudanças ambientais (PRITCHARD, 2001).

Nos primeiros dois tópicos deste capítulo são contempladas informações que, embora elementares do ponto de vista técnico, são de suma importância para que o leitor tenha uma ampla visão da cana-de-açúcar. Após uma explanação mais geral da planta, serão contempladas as informações referentes às respostas do corpo da planta a diferentes condições hídricas e, então, as considerações finais.

Características botânicas

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma espécie pertencente a família Poaceae, ordem Poales (APG et al., 2016), assim como a aveia (*Avena sativa* L.), o centeio (*Secale cereale* L.), o sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), o milho (*Zea mays* L.), o arroz (*Oryza sativa* L.), a cevada (*Hordeum vulgare* L.), entre outras gramíneas.

A ordem Poales pertence ao clado das Comelinídeas, juntamente com outras três ordens (Arecales, Comelinales e Zingiberales) e é considerado o clado com as mais derivadas das onze ordens de monocotiledôneas (APG et al., 2016). Poales apresenta plantas majoritariamente herbáceas, folhas gramináceas e flores geralmente anemófilas, pequenas e sem nectários (APG et al., 2016).

Em Poaceae encontram-se ervas geralmente rizomatosas, perenes ou anuais, com folhas alternas e presença de lígula entre a bainha e o limbo; inflorescência do tipo espiguetas e fruto do tipo cariopse (SOUZA; LORENZI, 2012). Do ponto de vista econômico, Poaceae é uma das principais famílias botânicas em angiospermas, pois observa-se que, das plantas citadas acima, todas fazem parte da alimentação de diversas populações mundo afora.

A cana-de-açúcar, por ser uma planta de alto interesse econômico, vem passando por modificações com relação ao melhoramento vegetal, resultando em um híbrido multiespecífico que pode receber a designação somente de *Saccharum* spp. (ASSIS, 2014).

Aspectos gerais sobre morfologia, anatomia e fisiologia da cana-de-açúcar

Alguns trabalhos mais antigos já descreveram a morfologia externa da cana-de-açúcar (VAN DILLEWIJN, 1952; BACCHI, 1983). As plantas de cana-de-açúcar são formadas por raízes e rizomas na parte subterrânea, por colmo e folhas na parte aérea vegetativa e inflorescências em fase reprodutiva.

A descrição morfológica mais referenciada para a cana-de-açúcar é a de Bacchi (1983). Aqui optou-se por uma breve descrição morfoanatômica apenas das partes vegetativas, pois são as partes da planta que mais são estudadas nos trabalhos que objetivam apresentar os efeitos do manejo hídrico para a cana-de-açúcar.

Raiz: a cana-de-açúcar tem raízes fasciculadas, típicas das gramíneas. Essas raízes são finas por natureza, ramificadas e pouco profundas e permanecem ativas por um período específico. A principal função dessas raízes é fornecer água e nutrientes para o caule primário. Em trabalho realizado por Faroni (2004), foi verificado que o sistema radicular, após o corte da cana planta, mantém-se ainda em atividade, dependendo da variedade de *Saccharum*, e depois é substituído pelas raízes dos novos perfilhos da soqueira. “As raízes da soqueira são mais superficiais do que as da cana planta pelo fato dos perfilhos das soqueiras brotarem mais próximo da superfície do que os da cana planta” (FARONI 2004, p. 21).

A estrutura anatômica das raízes das variedades é similar, apresentando três regiões distintas: a epiderme, o córtex e o cilindro vascular (QUEIROZ-VOLTAN et al., 1998; DA CRUZ MACIEL et al., 2015). A epiderme possui uma única camada de células (que podem variar no formato) e a presença de tricomas em algumas variedades (DA CRUZ MACIEL et al., 2015). O córtex é formado por células parenquimáticas e

apresenta uma exoderme estratificada que pode ser suberizada em algumas variedades (QUEIROZ-VOLTAN et al., 1998; DA CRUZ MACIEL et al., 2015). O cilindro vascular é limitado internamente por uma medula bem desenvolvida em raízes jovens e, externamente, pela endoderme (QUEIROZ-VOLTAN et al., 1998). A endoderme é unisseriada e formada por células isodiamétricas com espessamento nas paredes anticlinais e espessamento em U nas paredes periclinais (DA CRUZ MACIEL et al., 2015). Os trabalhos de Queiroz-Voltan et al. (1998) e da Cruz Maciel et al. (2015) descrevem com detalhes a estrutura anatômica radicular de plantas de cana-de-açúcar.

Caule: o caule em cana-de-açúcar é denominado colmo (material de maior interesse econômico na planta). Colmo é um termo botânico designado para uma estrutura caulinar que seja dividida em nós e entrenós (internódios) (Figura 1a) (SOUZA; LORENZI, 2012). No colmo, há a presença de gemas (Figura 1b), que posteriormente ao seu desenvolvimento darão origem a brotos ou colmos primários, dos quais originarão os perfilhos. Esses colmos, ao serem plantados, darão origem também a novas raízes de cada perfilho, na região da zona radicular (Figura 1b). As gemas são protegidas pela bainha das folhas, que é firmemente presa ao internódio quando a planta é jovem.



Figura 1. Morfologia do colmo da cana-de-açúcar. **A.** Colmo da planta. **B.** Detalhe para uma gema presente disposta alternadamente no colmo. **G** = gema; **Zr** = zona radicular. Fotos: autoria própria.

Com relação à anatomia dos colmos, há uma descrição realizada por Metcalfe (1960) em seu livro “*Anatomy of Monocotyledons*” para algumas espécies de *Saccharum*. Para *S. officinarum*, o autor descreve o colmo com centro sólido de parênquima de reserva, epiderme composta por células pequenas e com paredes espessas. O caule é composto por tecido parenquimático de reserva permeado por numerosos feixes vasculares (METCALFE, 1960; JACOBSEN et al., 1992; SANTOS et al., 2015). As células parenquimáticas aumentam gradualmente de diâmetro em direção ao centro do colmo (METCALFE, 1960). Possui feixes vasculares numerosos, espalhados por todo o tecido parenquimático, circundados por esclerênquima associado com fibras (METCALFE, 1960). Os feixes vasculares são circundados por uma bainha de duas ou mais camadas de células de esclerênquima lignificadas com paredes espessas (JACOBSEN et al., 1992).

Folhas: as folhas da cana-de-açúcar são alternas e firmemente presas aos nós dos colmos pela parte inferior da folha, denominada bainha foliar (Figura 2a). A parte superior é denominada lâmina ou limbo foliar. A lâmina é relativamente plana e alongada, com comprimento que varia de 0,5 a 1,5 m e largura entre 2,5 e 10 cm, quando totalmente expandida (MARAFON, 2012). Nas folhas é possível observar as nervuras foliares e entre a lâmina e a bainha encontra-se a lígula (Figura 2b), estrutura laminar em forma de colher que normalmente ocorre como um prolongamento adaxial da bainha, típica de gramíneas (SOUZA; LORENZI, 2012).

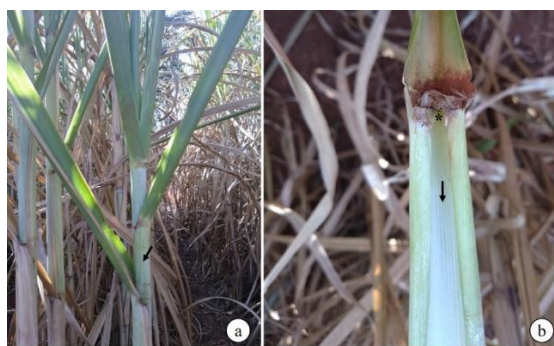


Figura 2. Morfologia da folha da cana-de-açúcar. **A.** Filotaxia alternata. Seta aponta para a bainha, porção foliar que envolve o colmo. **B.** Detalhe de uma folha. Seta aponta para nervuras foliares e o asterisco indica a posição da lígula. Fotos: autoria própria.

A estrutura anatômica da folha foi descrita no livro de Metcalfe (1960) para *S. officinarum*. O autor descreve o limbo em secção transversal com feixes vasculares, em sua maioria, pequenos e discretamente angulados em seu contorno, cada um com uma única bainha ao redor. Também relata a presença de esclerênquima em alguns desses feixes vasculares, opostos às células buliformes, mais na periferia, e mesófilo com presença de colênquima radiado imediatamente ao redor de cada feixe vascular.

O trabalho de Ferreira et al. (2007) traz diversas informações a respeito da anatomia foliar, contemplando estudos pioneiros, como os de Artschawager (1925) e Van Dillewijn (1952). Ferreira descreve a epiderme de folhas de cana-de-açúcar apresentando células buliformes, que são células epidérmicas volumosas ocorrendo em fileiras longitudinais nas folhas das gramíneas (APEZZATO-DA-GLORIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2012), estômatos do tipo paracítico, conteúdo de sílica e tricomas.

Outra característica importante na epiderme foliar é a presença de cutícula. A cutícula é uma camada de material de natureza graxa que cobre as paredes periclinais externas das células epidérmicas, sendo pouco permeável à água (FERREIRA et al., 2005; APEZZATO-DA-GLORIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2012). É sobre a cutícula propriamente dita que se encontra um revestimento também de natureza graxa, a cera epicuticular. Características como espessura de cutícula e presença de ceras epicuticulares influenciam na resposta à seca (ZHANG et al., 2015).

No mesófilo foliar da cana-de-açúcar, uma característica marcante é a anatomia Kranz (JOARDER et al., 2010), em que células do mesófilo se dispõem de maneira radiada em torno da bainha do feixe vascular, constituindo uma coroa. Daí o nome de “anatomia Kranz” (*kranz* = coroa em alemão) (MENEZES et al., 2012).

A cana-de-açúcar é uma planta C4, o que significa afirmar que, na fotossíntese, são produzidos compostos orgânicos estáveis de quatro carbonos. Em plantas C4, as células do mesófilo estão, no máximo, a duas ou três células da bainha mais próxima.

Segundo Marafon (2012),

A cana apresenta alta taxa fotossintética e eficiência na utilização e resgate de CO₂ (gás carbônico) e é adaptada à alta intensidade luminosa, altas temperaturas e relativa escassez de água, já que a cultura necessita de grandes quantidades de água para suprir suas necessidades hídricas (MARAFON, 2012, p. 10).

O fato de a cana-de-açúcar ser uma planta C4 influencia diretamente em sua eficiência fotossintética no sítio de carboxilação da enzima RUBISCO (ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase). Há duas consequências fisiológicas importantes para a cana-de-açúcar devido à bioquímica da via C4: primeiro, o CO₂ pode ser concentrado nas células da bainha do feixe, com reduzidas perdas por difusão, o que aumenta a eficiência de uso do CO₂ pela planta; segundo, a maioria das células do mesófilo situa-se muito próxima ou adjacente às células da bainha do feixe, o que garante uma cooperação dinâmica entre essas células, também auxiliando no aumento da eficiência fotossintética (MAJEROWICZ, 2008; SAGE et al., 2014).

Adaptações morfoanatômicas e fisiológicas da cana-de-açúcar sob diferentes condições hídricas

Os trabalhos que tratam das respostas morfoanatômicas e fisiológicas da cana-de-açúcar mediante diferentes condições hídricas são, em sua maioria, experimentais, testando tratamentos hídricos que induzem a condição de seca ou alagamento (Tabela 1).

Tabela 1. Relação dos trabalhos que estudaram plantas de cana-de-açúcar sob o enfoque de diferentes condições hídricas, utilizando metodologias para análise de características morfológicas, anatômicas e/ou fisiológicas.

Variedade (s) da cana-de-açúcar utilizada	Órgão (s) analisado (s)	Metodologia empregada		Parâmetros utilizados			Referência
		Condições hídricas	Análise anatômica	Morfológicos	Anatômicos	Fisiológicos	
<i>Saccharum</i> 'Cv H65-7052', <i>Saccharum</i> 'Cv H69-8235, <i>Saccharum</i> 'Cv AP85-0068 e <i>Saccharum</i> 'Cv Cavengerie'	Folha	Experimental em campo. Duas áreas com plantas irrigadas (-0,02MPa) e não irrigadas (-0,1 MPa), conforme determinado por tensiômetros de solo	Conduividade hidráulica baseada e adaptada de Sperry et al. (1988) e microtomia para microscopia de luz	--	Comprimento de vasos, frequência e distribuição de feixes vasculares	--	Neufeld et al. (1992)
RB801816, RB867515, RB855453, SP801842, SP803280 e SP813250.	Raiz	Experimental em estufa sob 80% de umidade relativa por 45 dias, com irrigação diária	Microtomia para microscopia de luz e testes histoquímicos	Diâmetro da raiz do caule principal e do perfilho	Diâmetro de vasos do metaxilema	--	da Cruz Maciel et al. (2015)
<i>Saccharum</i> 'IACSP94-2094' (resistente a seca) e <i>Saccharum</i> 'IACSP95-5000' (susceptível a seca)	Raiz, caule e folha	Experimental em casa de vegetação. Utilizou-se três tratamentos: (1) seca severa, 40% da capacidade de campo (CC); (2) seca moderada, 80% da CC e (3) controle, irrigação diária.	Cortes à mão livre e microscopia de luz com reação de floroglucinol acidificado para detecção de lignina	Número de folhas, número de internódios, comprimento do caule, massa fresca do caule, peso seco das folhas e peso das raízes	Qualitativos, como abundância de parênquima e feixes vasculares no caule	Teor de lignina, açúcares solúveis, prolina	Santos et al. (2015) ¹
<i>Saccharum</i> F172 (resistente a seca) e <i>Saccharum</i> YL6 (susceptível a seca)	Folha	Experimental em casa de vegetação. Utilizou-se quatro tratamentos: (1) seca leve, 65-70% da CC; (2) seca moderada, 45-50% da	Microtomia para microscopia de luz e microscopia eletrônica de transmissão	Número de folhas	Espessura do limbo, espessura da epiderme abaxial e adaxial, espessura da cutícula e	Conteúdo de clorofila	Zhang et al. (2015)

		CC; (3) seca severa, 25-30% da CC e (4) controle, 70% da CC.							
<i>Saccharum</i> 'Colk 94184' e <i>Saccharum</i> 'Col64'	Raiz, caule e folha	Experimental em talhão. Dois talhões foram utilizados, um inundado até um metro de altura e outro não inundado (controle).	Microscopia eletrônica de varredura	Taxa de alongamento do caule, peso seco da parte aérea e peso seco da parte subterrânea	ultraestrutura do cloroplasto	-	Jain et al. (2019)		
<i>Saccharum officinarum</i> 'KK3'	Folha	Experimental em casa de vegetação. Utilizou-se dois tratamentos: capacidade de campo e estresse hídrico.	Cortes à mão livre e microscopia de luz em folhas maduras seccionadas em três regiões: nervura central, margem do limbo e limbo foliar	--	41 parâmetros anatômicos foram utilizados, divididos em categorias como espessura do limbo, nervura central, epiderme, feixes vasculares e outras características	-	Taratima et al. (2019)		
<i>Saccharum</i> 'UT13' (resistente a seca) e <i>Saccharum</i> 'UT12' (susceptível a seca)	Folha	Experimental em casa de vegetação. Utilizou-se dois tratamentos: capacidade de campo e estresse hídrico	Cortes à mão livre em folhas maduras seccionadas em três regiões: nervura central, margem do limbo e limbo foliar	--	Idem Taratima et al. (2019)	-	Taratima et al. (2020)		
<i>Saccharum</i> 'Yuetang 93-159' (susceptível a seca) e <i>Saccharum</i> 'Yunzhe 05-51' (resistente a seca)	Folha	Experimental em casa de vegetação. Utilizou-se três tratamentos: (1) controle, 70% da CC; (2) seca moderada, 50% da CC; (3) seca severa, 30% da CC.	Microscopia eletrônica de transmissão	Número de folhas, altura da planta, área foliar, determinação do peso fresco e peso seco das folhas	--	Fotossíntese líquida, condutância estomática, conteúdo de clorofila, conteúdo de água e atividade enzimática	Zhang et al. (2020)		

¹ o trabalho também aplicou técnicas genéticas e bioquímicas adicionais.

Observa-se nesses trabalhos que todos os órgãos vegetativos da cana-de-açúcar podem ser passíveis de modificações em decorrência do conteúdo de água e são objetos de interesse para estudos morfoanatômicos e fisiológicos. Porém, nota-se que a parte da planta mais utilizada é a folha. Respostas funcionais dependentes de fatores ambientais, como é o caso do regime hídrico, são, em sua maioria, mais evidentes nas folhas (CABRAL et al., 2018). A folha é um órgão vegetal considerado como uma unidade de alto nível de adequação às diferentes condições ambientais às quais as plantas estão submetidas. Essa adequação pode ser referida como plasticidade morfoanatômica ou plasticidade fenotípica (GRATANI et al., 2006; CABRAL et al., 2018).

As plantas de cana-de-açúcar sob estresse hídrico apresentam folhas murchas, amareladas e número reduzido de folhas verdes (SANTOS et al., 2015; ZHANG et al., 2015; 2020). As folhas verdes são indispensáveis para manter a fotossíntese normal e as atividades de vida sob estresse hídrico (ZHANG et al., 2015).

A restrição hídrica afeta progressiva e negativamente os parâmetros morfológicos da cana-de-açúcar, afetando, dessa forma, o crescimento da planta (SANTOS et al., 2015; ZHANG et al., 2015; 2020). No trabalho de Zhang et al. (2015), na seca severa o cultivar resistente mostrou enrolamento das folhas e o susceptível apresentou a ponta da folha seca. Sob seca moderada, houve enrolamento da folha e menos de um terço da folha permaneceu verde sob seca severa. O enrolamento das folhas é uma resposta benéfica, pois reduz a perda de água, deixando de expor toda a lâmina foliar ao ambiente, reduzindo a transpiração. A redução do número de folhas e da senescência foliar em cana-de-açúcar durante o déficit hídrico pode indicar uma estratégia para diminuir a superfície de transpiração, mitigando o gasto energético e garantindo o metabolismo tecidual basal (SANTOS et al., 2015).

O encurtamento do entrenó também foi observado nos cultivares em condição de seca (SANTOS et al., 2015), embora as plantas tenham sido afetadas de maneiras diferentes. A média de impacto negativo no crescimento das plantas de cana-de-açúcar foi estimado pelos autores em mais de 35% (SANTOS et al., 2015).

Os parâmetros anatômicos que apresentam maior alteração em condições de estresse hídrico em folhas foram: redução da área foliar, redução do diâmetro dos vasos do metaxilema, aumento da espessura da parede em células esclerenquimáticas, aumento da espessura da epiderme e aumento da espessura da cutícula (ZHANG et al., 2015; TARATIMA et al., 2019; 2020).

A redução da área foliar ocorre quando o conteúdo de água nas células vegetais é reduzido, pois as células e as paredes celulares são enfraquecidas pela diminuição do volume celular e da pressão de turgor (TARATIMA et al., 2019). Se a deficiência de água ocorre continuamente, as células tornam-se mais compactadas, com concentrações mais altas de soluto. Este fenômeno desencadeia a sensibilidade do crescimento da planta sob estresse hídrico.

As respostas anatômicas frente ao estresse hídrico em cana-de-açúcar variam conforme o cultivar e a intensidade dessas respostas depende do genótipo (SMIT; SINGELS, 2006; MACHADO et al., 2009). O trabalho de Santos et al. (2015) mostrou que a deficiência hídrica teve impacto na produção de biomassa das duas variedades, mas principalmente na mais resistente à seca, o que os autores explicaram ser possivelmente devido à severidade do estresse ou maior suscetibilidade desse genótipo durante a fase de alongamento do caule. O teor de lignina, principal parâmetro testado pelos autores, mostrou-se alterado quando comparado com os internódios maduros e jovens das plantas submetidas a deficiência hídrica severa. Os internódios jovens de plantas sob deficiência hídrica tiveram maior expressão gênica para lignina, mostrando uma deposição precoce desse polímero nas paredes celulares, ao contrário de plantas controle, que tendem a apresentar níveis mais elevados de expressão gênica da biossíntese de lignina em internódios maduros (SANTOS et al., 2015).

As respostas morfoanatômicas para a condição de alagamento podem ser vistas no trabalho de Jain et al. (2019). Os autores observaram que as plantas submetidas a saturação hídrica mostraram maior número de raízes novas, o que pode ser explicado pelo fato de a planta necessitar de

mais raízes para explorar regiões que possam estar com maior quantidade de oxigênio. Presença de aerênquima, células epidérmicas irregulares e danificadas, distorção celular e perda de uniformidade nas regiões da endoderme e periciclo foram modificações anatômicas observadas. Sabe-se que a formação do aerênquima é essencial para a sobrevivência e funcionamento das plantas submetidas ao alagamento devido às condições anóxicas da raiz (JAIN et al., 2019). O aerênquima contribui com o suprimento de oxigênio da parte aérea às raízes e para a ventilação dos gases. Dos trabalhos que observam o efeito do manejo hídrico para cana-de-açúcar (Tabela 1), o trabalho de Jain et. (2019) foi o único que estudou o efeito do alagamento para essas plantas.

Com relação às respostas fisiológicas, sabe-se que a deficiência hídrica pode afetar diretamente parâmetros como condutância estomática, uso eficiente de água pela planta, conteúdo de clorofila e taxas de transpiração. A concentração de solutos na célula leva a uma diminuição do potencial hídrico e a continuidade da deficiência pode ocasionar o fechamento estomático. O menor potencial hídrico foliar, além de levar à redução interna de CO₂, também reduz a eficiência da carboxilação instantânea, indicando que o aparato de fotossíntese também é afetado (ENDRES et al., 2010).

A transpiração é regulada principalmente pela abertura estomática e, de acordo com Endres et al. (2010), é o processo fisiológico mais sensível ao estresse hídrico na maioria das plantas. Embora os estômatos fechem em resposta à seca antes de qualquer alteração no potencial hídrico ou no teor de água das folhas, há também o fechamento estomático quando o déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar aumenta (SOCIAS et al., 1997; ENDRES et al., 2010). Há que se considerar também a atividade do ácido abscísico, uma vez que este hormônio está relacionado ao fechamento estomático (SOCIAS et al., 1997).

O trabalho de Zhang et al. (2015) estudou o efeito do conteúdo de clorofila para parâmetros fisiológicos e seus dados indicaram que os conteúdos de clorofila *a* e clorofila *a/b* diminuiriam sob estresse hídrico leve. Sob condições de seca moderada e severa, a clorofila *a*, a clorofila *b*

e clorofila *a/b* foram todas significativamente reduzidas para ambos os cultivares de cana-de-açúcar estudadas. Considera-se que maior conteúdo de clorofila é benéfico para melhorar a fotossíntese e aumentar o número de *grana* nos cloroplastos (ZHANG et al., 2015). Com conteúdo diminuído de clorofila, há menor empilhamento de *granum* nos cloroplastos, levando a mudanças na ultraestrutura da organela (ZHANG et al., 2015) e, em última instância, na eficiência fotossintética.

Outra resposta fisiológica geralmente estudada é o conteúdo de prolina. Prolina é um aminoácido osmorregulador que pode ter sua concentração aumentada em plantas sob deficiência hídrica. Quando as plantas são submetidas à restrição hídrica, um aumento na concentração de solutos compatíveis evita a perda de água, diminuindo o potencial osmótico e, portanto, mantendo o potencial hídrico em níveis ótimos (GUIMARÃES et al., 2008). O trabalho de Zhang et al. (2020) mostrou que, em seca moderada e em seca severa, os níveis de prolina aumentaram na folha em comparação com o tratamento controle, porém sem diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos. Já no trabalho de Santos et al. (2015), os níveis de prolina para o caule não diferiram entre os tratamentos sob deficiência hídrica e controle. Os autores argumentam que, no caso da cana-de-açúcar, os teores desse aminoácido podem variar de acordo com a severidade e/ou tempo de exposição ao estresse, bem como a fase de desenvolvimento da planta.

O acúmulo de solutos orgânicos como açúcares solúveis e prolina nas plantas é instigado pelo déficit hídrico para manter o equilíbrio osmótico (ZHANG et al., 2020). Além de seu papel no ajuste osmótico, solutos compatíveis também melhoram o sistema de defesa das plantas contra danos oxidativos induzidos por espécies reativas de oxigênio (ASHRAF; FOOLAD, 2013), o que, consequentemente, melhora a capacidade das plantas de resistir ao ambiente estressado.

Considerações finais

Ao longo deste capítulo foi possível observar que alguns trabalhos foram e outros estão sendo realizados na temática das respostas morfológicas, anatômicas e fisiológicas mediante diferentes condições

hídricas. Observou-se que os trabalhos que objetivam conhecer essas respostas realizam experimentos, seja em campo ou em laboratório – casas de vegetação – para melhor aplicar diferentes técnicas.

Embora a área de Anatomia e Morfologia seja uma ciência básica, nota-se que o interesse por entender como o corpo vegetal responde aos experimentos de manejo hídrico vem aumentando ao longo do tempo, visto que existem trabalhos tanto antigos quanto bem recentes disponíveis na literatura.

Assim, observou-se que:

- para se trabalhar com manejo hídrico em plantas de cana-de-açúcar é necessário realizar experimentos práticos;
- a maioria dos experimentos encontrados na literatura são para investigar a condição de deficiência hídrica comparada ao tratamento controle e não a condição de saturação hídrica;
- o órgão da planta mais utilizado para esse fim é a folha.

Observou-se que as respostas morfológicas mediadas pela falta de água foram redução da altura da planta, encurtamento do entrenó, murchamento e amarelecimento foliar. As respostas anatômicas mediadas por deficiência hídrica foram redução da área foliar, redução do diâmetro dos vasos, aumento da espessura da parede em células esclerenquimáticas e aumento da espessura da epiderme e da cutícula. Já as respostas fisiológicas ressaltam diminuição do conteúdo de clorofila, acúmulo de prolina e altas taxas de transpiração em condições de seca.

Todos esses parâmetros merecem atenção em trabalhos futuros que envolvam conhecer as respostas da cana-de-açúcar frente à deficiência hídrica. São poucos os estudos que visam estudar as três áreas – morfologia, anatomia e fisiologia – no mesmo trabalho, o que seria o cenário ideal para entender as adaptações por completo. A área de manejo hídrico em plantas de cana-de-açúcar sob o aspecto do corpo da planta (morfológica, anatômica e fisiologicamente) é muito rica e ainda possui muitas perguntas a serem respondidas, levando o pesquisador interessado nesta área a caminhos futuros muito promissores.

Referências

- APEZZATO-DA-GLORIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. Glossário. In: APEZZATO-DA-GLORIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. (eds). **Anatomia vegetal**. 3 ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2012. 408 p.
- APG – THE ANGIOSPERM PHYLOGENY GROUP; CHASE, M. W.; CHRISTENHUSZ, M. J. M.; FAY, M. F.; BYNG, J. W.; JUDD, W. S.; SOLTIS, D. E.; MABBERLEY, D. J.; SENNIKOV, A. N.; SOLTIS, P. S.; STEVENS, P. F. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 181, n. 1, p. 1-20, 2016.
- ARTSCHWAGER, H. S. A. Anatomy of the vegetative organs of sugarcane. **J. Agric.**, v. 30, p. 197-221, 1925.
- ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. Crop breeding for salt tolerance in the era of molecular markers and markerassisted selection. **Plant Breeding**, v. 132, n. 1, p. 10-20, 2013.
- ASSIS, C. **Previsão do teor de lignina em cana-de-açúcar usando espectroscopia no infravermelho próximo e métodos quimiométricos**. 2014. 88 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.
- BACCHI, O. O. S. Botânica da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR, 1983. p. 25-37.
- CABRAL, R. D. C.; MELO JUNIOR, J. C. F.; MATILDE-SILVA, M. Plasticidade morfoanatômica foliar em *Smilax campestris* (Smilacaceae) em gradiente ambiental de restinga, SC, Brasil. **Hoehnea**, v. 45, n. 2, p. 173-183, 2018.
- da CRUZ MACIEL, J. R. C.; OLIVEIRA, D.; FADIN, D. A.; SAJO, M. G.; PEDROSO-DE-MORAES, C. Morpho-anatomical characteristics conferring drought tolerance in roots of sugar cane genotypes (*Saccharum* L., Poaceae). **Braz. J. Bot**, v. 38, p. 951-960, 2015.

ENDRES, L.; SILVA, J. V.; FERREIRA, V. M.; BARBOSA, G. V. S. Photosynthesis and Water Relations in Brazilian Sugarcane. **The Open Agriculture Journal**, v. 4, p. 31-37, 2010.

FARONI, C. E. **Sistema radicular de cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas**. 2004. 86 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 2004.

FERREIRA, E. A., VENTRELLA, M. C., SANTOS, J. B., BARBOSA, M. H. P., SILVA, A. A., PROCÓPIO, S. O. SILVA, E. A. M. Leaf blade quantitative anatomy of sugarcane cultivars and clones. **Planta Daninha**, v. 25, n. 1, p. 25-34, 2007.

FERREIRA, E. A.; DEMUNER, A. J.; SILVA, A. A.; SANTOS, J. B.; VENTRELLA, M. C.; MARQUES, A. E.; PROCÓPIO, S. O. Composição química da cera epicuticular e caracterização da superfície foliar em genótipos de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 23, n. 4, p. 611-619, 2005.

GRATANI, L.; COVONE, F.; LARCHER, W. Leaf plasticity in response to light of three evergreen species of the Mediterranean maquis. **Trees**, v. 20, n. 5, p. 549-558, 2006.

GUIMARÃES, E. R.; MUTTON, M. A.; MUTTON, M. J. R.; FERRO, M. I. T.; RAVANELI, G. C.; da SILVA, J. A. Free proline accumulation in sugarcane under water restriction and spittlebug infestation. **Sci. Agric.**, v. 65, n.6, p. 628-633, 2008.

JACOBSEN, K. R.; FISHER, D. G.; MARETZKI, A.; MOORE, P. H. Developmental changes in the anatomy of the sugarcane stem in relation to phloem unloading and sucrose storage. **Bot Acta**, v. 105, n. 1, p. 70-80, 1992.

JAIN, R.; SINGH, A.; SINGH S. P.; CHANDRA A.; PATHAK A. D. Morphological and anatomical aberrations induced by waterlogging in sugarcane. **J. Environ. Biol.**, v. 40, n. 1, p. 634-640, 2019.

JOARDER, N.; ROY, A. K.; SIMA, S. N.; PARVIN, K. Leaf blade and midrib anatomy of two sugarcane cultivars of Bangladesh. **J. Bio-Sci.**, v. 18, p. 66-73, 2010.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic Press, 1995. 495 p.

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; LANDELL, M. G. A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesq. Agropec. Bras**, v. 44, n. 12, p. 1575–1582, 2009.

MAJEROWICZ, N. Fotossíntese. In: KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008. p. 114-115.

MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar**: uma introdução ao procedimento prático. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, p. 10, 2012. 29 p.

MENEZES, N. L.; SILVA, D. C.; de PINNA, G. F. A. M. Folha. In: APEZZATO-DA-GLORIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. (eds). **Anatomia vegetal**. 3 ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2012. 408 p.

METCALFE, C. R. **Anatomy of monocotyledons**. Oxford: Clarendon Press, 1960. p. 425-430.

NEUFELD, H. S.; GRANTZ, D. A.; MEINZER, F. C.; GOLDSTEIN, G.; CRISOSTO, G. M.; CRISOSTO, C. Genotypic variability in vulnerability of leaf xylem to cavitation in water-stressed and well-irrigated sugarcane. **Plant Physiol.**, v. 100, n. 2, p. 1020-1028, 1992.

PRITCHARD, J. Turgor pressure. In: **Encyclopedia of life sciences**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2001. p. 1-3.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; PRADO, H.; MORETTI, F. C. Aspectos estruturais de raízes de cana-de-açúcar sob o efeito da compactação do solo. **Bragantia**, v. 57, n. 1, 1998.

SAGE, R. F.; KHOSHRAVESH, R.; SAGE, T. L. From proto-Kranz to C4 Kranz: building the bridge to C4 photosynthesis. **J Exp. Bot.**, v. 65, n. 13, p. 3341–3356, 2014.

SANTOS, A. B.; BOTTCHER, A.; KIYOTA, E.; MAYER, J. L. S.; VICENTINI, R.; BRITO, M. S.; CRESTE, S.; LANDELL, M. G. A. MAZZAFERA, P. Water stress alters lignin content and related gene expression in two sugarcane genotypes. **J. Agric. Food Chem.**, v. 63, n. 19, p. 4708–4720, 2015.

SILVA, L. M.; ALQUINI, Y.; CAVALLET, V. J. Inter-relações entre a anatomia vegetal e a produção vegetal. **Acta Bot. Bras.**, v. 19, n. 1, p. 183–194, 2005.

SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Res.**, v. 98 n. 2-3, p. 91–97, 2006.

SOCIAS, X.; CORREIA, M. J.; CHAVES, M.; MEDRANO, H. The role of abscisic acid and water relations in drought responses of subterranean clover. **J. Exp. Bot.**, v. 48, n. 311, p. 1281–1288, 1997.

SOUZA, V. C.; LORENZI, H. **Botânica sistemática**: guia ilustrado para identificação das famílias de fanerógamas nativas e exóticas no Brasil, baseado em APG III. 3 ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2012. 768 p.

TARATIMA, W.; RITMAHA, T.; JONGRUNGKLANG, N.; MANEERATTANARUNGROJ, P.; KUNPRATUM, N. Effect of stress on the leaf anatomy of sugarcane cultivars with different drought tolerance (*Saccharum officinarum*, Poaceae). **Rev. Biol. Trop.**, v. 68, n. 4, p. 1159–1170, 2020.

TARATIMA, W.; RITMAHA, T.; JONGRUNGKLANG, N.; RASO, S.; MANEERATTANARUNGROJ, P. Leaf anatomical responses to drought stress condition in hybrid sugarcane leaf (*Saccharum officinarum* ‘KK3’). **Malays. Appl. Biol.**, v. 48, n. 3, p. 181–188, 2019.

VAN DILLEWIJN, C. **Botany of sugarcane**. Waltham Mass: Chronica Botanica, 1952. 371p.

ZHANG, F. J.; ZHANG, K. K.; DU, C. Z.; LI, J.; XING, Y. X.; YANG, L. T.; LI, Y. R. Effect of drought stress on anatomical structure and chloroplast ultrastructure in leaves of sugarcane. **Sugar Tech**, v. 17, n. 1, p. 41-48, 2015.

ZHANG, Y. B.; YANG, S. L.; DAO, J. M.; DENG, J.; SHAHZAD, A. N.; FAN, X.; LI, R. D.; QUAN, Y. J.; BUKHARI, S. A. H.; ZENG, Z. H. Drought-induced alterations in photosynthetic, ultrastructural and biochemical traits of contrasting sugarcane genotypes. **PLoS ONE**, v. 15, n. 7, p. e0235845, 2020.

ROTAÇÃO DE CULTURA COM PLANTIO DE SOJA EM REFORMA DE CANAVIAL

Antonio Bestana Neto⁵

1. Introdução

A cultura da cana-de-açúcar tem uma grande importância para a economia brasileira, pois trata-se da matéria-prima estratégica na produção do açúcar e álcool, além de que seus subprodutos como bagaço, torta de filtro, vinhaça, palha, os quais são utilizados como adubos, fertirrigação e combustíveis, gerando também eletricidade. O volume da produção de cana-de-açúcar no ciclo 2020/21 totalizou 654,8 milhões de toneladas, 1,8% superior ao da safra 2019/20(Conab-Maio 2021). O crescimento não acompanhou o aumento na área colhida devido às condições climáticas adversas em algumas regiões produtoras. A área colhida ficou em 8,62 milhões de hectares, aumento de 2,1% se comparada a 2019/20. A região Sudeste, principal região produtora do país, manteve seu alto padrão de produção, alcançando 428,6 milhões de toneladas colhidas, indicando acréscimo de 3,3% em comparação a 2019/20. Os Estados de São Paulo e Minas Gerais são os grandes destaques da região Sudeste, o Estado de São Paulo é o maior produtor brasileiro do setor sucroalcooleiro com produção de 354 milhões de toneladas na safra 2020/2021.

A reforma dos canaviais é importante para manter elevada a média de produtividade agrícola de uma usina (SOARES *et al.*, 2011). Sistemas que adotam a diversificação de culturas promovem vários benefícios, já que os resíduos vegetais das culturas, ao se decomporem, alteram os atributos do solo e, como consequência pode influenciar o desempenho da cultura em sucessão (MARCELO *et al.*, 2009).

⁵ Engenheiro Agrônomo, Engenheiro de Segurança do Trabalho, Esp., Docente das Faculdades Gran Tietê e Faculdade de Tecnologia de Curitiba, nbestana@gmail.com

Desde o final da década de 80, a rotação de culturas tem sido uma opção sustentável, sobretudo com adubos verdes e culturas de leguminosas (SOARES, 2014). Dentre os benefícios do emprego da rotação de culturas, pode-se destacar; aumento em produtividade, auxílio no controle de pragas, doenças e plantas daninhas, melhoria na fertilidade e nas características físicas do solo, eficiência no uso da água e nutrientes, otimização do uso de máquinas na propriedade, promovendo diversificação e redução do risco da cultura (CHRISTOFFOLETI *et al.*, 2007).

Atualmente com a colheita mecanizada da Cana de açúcar, em praticamente 90% dos canaviais, os trabalhos de cultivo e preparo de solo se intensificaram, voltados principalmente na descompactação e fertilização. Outro fator importante é a vida útil do canavial que hoje está próximo de 4 até 5 anos em média, além de fatores financeiros inibindo investimentos em curto prazo. Dentre esses problemas observados, o uso eficiente do solo, vem ganhando destaque nos trabalhos de pesquisa no setor sucro-energético, o qual pode ser alcançado com a rotação de cultura utilizando espécies para adubação verde ou as oleaginosas, como a Soja, nas áreas de reforma de canavial, prática eficiente e com bons resultados na reposição dos nutrientes do solo e na melhoria da produtividade da cultura.

A região Centro-oeste do estado de São Paulo, municípios de Jaú, Barra Bonita, Igaracú do Tietê e Lençóis Paulista, a prática de rotação de cultura está em plena expansão. Na região situam-se as Usinas com as maiores produção de Cana-de-açúcar do estado, condições de fertilidade de solo excelente, predominando solos do tipo LV1 e NV1 caracterizados como Latossolo e Nitossolo Vermelho, a maioria dos parceiros/fornecedores são produtores rurais independentes e com boa aceitação na prática de manejo cultural como é a rotação de cultura.

Esse capítulo vem trazer informações atualizadas de pesquisas, resultados, bem como dados recentes coletados em campo dos benefícios e vantagem oferecida pelo método de cultivo, uma vez que requer planejamento e novos investimentos no setor.

2. Cultivo de leguminosas em reforma de canaviais

A utilização de plantas na reciclagem dos nutrientes e manutenção da fertilidade do solo, associadas às técnicas do plantio direto e do cultivo mínimo são opções para a obtenção de eficiência produtiva e conservação do solo e da água (Ambrosano et al., 1999). Em função de seu potencial de fixação de nitrogênio e recuperação da fertilidade do solo, as leguminosas (*Fabaceae*) representam uma alternativa ao suprimento, substituição ou complementação da adubação mineral e recomposição da fertilidade do solo (Scivittaro et al., 2000).

A utilização da adubação verde com leguminosas na cana-de-açúcar é recomendada quando se reforma o canavial. Essa prática não interfere na brotação da cana. Seu custo é relativamente baixo e promovem aumentos significativos nas produções de cana e de açúcar em pelo menos dois cortes. Adicionalmente, protege o solo contra a erosão e evita multiplicação de plantas espontâneas (Ambrosano et al., 2005). Com a prática da adubação verde, é possível recuperar a fertilidade do solo proporcionando aumento da capacidade de troca de cátions e da disponibilidade de macro e micronutrientes; formação e estabilização de agregados; melhoria da infiltração de água e aeração; diminuição diuturna da amplitude de variação térmica; controle dos nematoides e, no caso das leguminosas, incorporação ao solo do nutriente nitrogênio, efetuada através da fixação biológica (Igue, 1984). O aumento da Matéria orgânica no solo proporcionará ainda uma permeabilidade no solo, facilidade de crescimento das raízes, resistência a stress hídricos, menor toxidez por amônio e a exploração do solo em diferentes profundidades.

Os sistemas de rotação de cultura proporcionam ainda uma quebra de sequência em vários aspectos importantes no ciclo da cultura, entre eles o de pragas, principalmente as de solo, e plantas daninhas que são persistentes e até resistentes ao cultivo de Cana-de-açúcar. Analisando dados econômico-financeiros, a rotação de cultura em área de reforma de canavial, de acordo com Lima Filho et al (1987), registrou um aumento de aproximadamente 50% na renda líquida de pequenos agricultores que plantaram as culturas de milho e amendoim, respectivamente

(RODRIGUES, 1987; ALLEONI; BEAUCLAIR, 1995). Fica evidenciado que a adoção da prática da rotação de culturas com grãos como soja, girassol e amendoim em áreas de reforma do canavial, é economicamente vantajosa além de grandes ganhos ambientais (LIMA FILHO et al., 1987, LOMBARDI et al., 1982).

3. Cultivo de Soja em áreas de reforma de Canaviais

A reforma do canavial é praticamente obrigatória após um ciclo de produção, que atualmente varia de 4 a 5 cortes, em virtude da ampla extração de nutrientes e da compactação do solo causado pela circulação de máquinas e equipamento.

A produção de culturas oleaginosas, especialmente a **soja**, traz uma nova oportunidade no aumento da produtividade além de benefícios para o cultivo da cana-de-açúcar, como o controle de pragas, doenças e ervas daninhas com a quebra dos ciclos, fixação de nitrogênio e ciclagem dos nutrientes, bem como reduzir os custos de produção da cana-de-açúcar, possibilitando ainda receitas que diminuem o impacto financeiro na implantação de uma nova área. Objetivando essas receitas, a Empresa Brasileira de Agropecuária (EMBRAPA) vem estudando comportamento físico do solo-água, zoneamento climático e a seleção de áreas favoráveis para reforma de canaviais, a fim de fornecer subsídios para gerenciamento na produção das usinas e produtores rurais em cultivo de culturas anuais na reforma de canaviais.

O plantio direto de soja na reforma de canaviais já é uma realidade ajudando a reduzir a compactação do solo e degradação, as áreas de reforma de cana sofrem uma intensiva preparação do solo e correção da fertilidade, especialmente com calcário e gesso. Desse modo, é indicado que o cultivar recomendado, tenha um bom desempenho agrônômico, seja adaptado às condições de fertilidade do solo, em geral com PH mais ácido, tenha um bom desenvolvimento a fim de facilitar sua colheita e também ciclos irregulares compatíveis com a janela de plantio da cana-de-açúcar que geralmente gira em torno de 120 dias. A soja contribui para incorporar nitrogênio no solo, o que reduziria o uso de fertilizantes principalmente o N nas formulações, sendo uma boa opção, pois os fertilizantes químicos

estão associados às altas taxas de emissão de gases (MACEDO; SEABRA, 2008). O plantio da soja nas áreas de reforma de canaviais também reduz os processos erosivos, provocados pela exposição do solo, causados principalmente, pelas chuvas. A rotação é efetuada após o final da colheita de cana, nos meses de outubro e novembro, e a colheita da soja nos meses de janeiro e fevereiro, período ideal ao início do plantio de cana-de-açúcar que ocorre nos meses de março e abril (ciclo de 18 meses). Essa programação é muito importante pois o produtor deve estar atento e priorizar o plantio de cana de açúcar. Conforme já destacado, a rotação de cultura com a cana de açúcar pode conferir uma certa longevidade do canavial e aumento na produtividade. Alguns estudos anteriores atestam para os ganhos, como Salome et al. (2007), o qual mostra um aumento na produtividade da cana-de-açúcar até o terceiro corte. Segundo Luz et al (2005), uma das vantagens no uso de leguminosas, como a soja, está na capacidade da planta de fixar o N atmosférico através da simbiose com as bactérias do gênero *Rhizobium* presentes nas raízes, além de proporcionar um alto teor de compostos orgânicos nitrogenados e do sistema radicular bem profundo e ramificado, capaz de extrair nutrientes e água das camadas mais profundas do solo. Ainda, é capaz de disponibilizar produtos agrícolas e alimentos, como a soja, utilizada à produção de ração animal, produtos de consumo humano e insumo para a produção de biodiesel. Em resumo, a rotação de culturas promove melhorias importantes nos aspectos agronômicos e reduções nos custos da cultura da cana-de-açúcar, dentre eles a redução no uso de fertilizantes e melhor uso dos demais insumos. Além desses ganhos agronômicos, possibilita ao agricultor um maior volume de capital e conforto econômico financeiro. Por outro lado, o sistema de reforma é uma atividade complexa que requer conhecimentos técnicos, operacionais e financeiros das empresas e produtores, uma vez que altera o planejamento produtivo em diferentes modos, além de requerer mais investimentos em capital fixo, trabalho e tecnologia.

4. Imagens Fotográficas de campo

Fotografia 01 - Preparo solo convencional.

Fonte: Antonio Bestana Neto, 2021



Fotografia 02 - Plantio cultivo mínimo

Fonte: José Sahade Filho, 2021



Fotografia 03 - Avaliação de plantio.

Fonte: José Sahade Filho, 2021



Fotografia 04 - Visão de área de soja com estágio vegetativo V4.

Fonte: Cristiano Donizete Cecolin, 2020



Fotografia 05 e 06 - Estádio reprodutivo R2 (início florescimento).

Fonte: Antonio Bestana Neto, 2021



Fotografias 07 e 08 - Estádio reprodutivo R3(início formação vagens).

Fonte: Antonio Bestana Neto, 2021



Fotografia 09 - Estágio de desenvolvimento R4/R5(Início amadurecimento).

Fonte: José Sahade Filho, 2021



Fotografia 10 - Área pronta para colheita

Fonte: Cristiano Donizete Cecolin, 2020



Fotografia 11 - Carregamento de grãos.

Fonte: José Sahade Filho, 2020



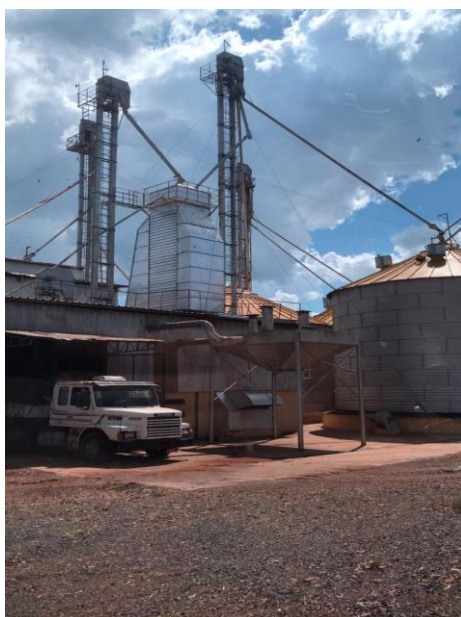
Fotografia 12 - Análise sementes.

Fonte: José Sahade Filho, 2020



Fotografia 13 - Infraestrutura regional.

Fonte: José Sahade Filho, 2021



Fotografia 14 - Infraestrutura de armazenamento.

Fonte: José Sahade Filho, 2020



Fotografia 15 - Investimento em tecnologias.

Fonte: José Sahade Filho, 2020



5. Conclusões finais

A rotação de culturas na reforma de cana de açúcar tem vários benefícios econômicos e agrônômicos para a indústria da cana, uma vez que melhora os aspectos físicos do solo através de ciclagem de nutrientes, ao passo que aumenta a fonte de renda do produtor no período de culturas de pousio. Dentre as Vantagens podemos destacar o ganho nas condições físicas e biológicas no solo, promovendo o aumento no ciclo da cultura com aumento de safras, controle de pragas e plantas daninhas através de utilização de práticas de cultivo diferenciadas bem como a ocupação da área com cultura alternativa. Ganho em economia de fertilizantes e preparo do solo para a implantação do canavial e finalmente o retorno financeiro com a produção de grãos.

Entendo que alguns ajustes ainda tem que ser efetuados para implantação do sistema em áreas de pequenos e médios produtores, através da sistematização das áreas adequando época de colheita e variedades de Cana-de-açúcar, proporcionando viabilidade nas práticas de preparo

necessárias no plantio da soja em rotação de cultura. Os entraves para a cultura da soja se consolidar em áreas de agricultores canavieiros são os investimentos em equipamentos de plantio e colheita e uma logística favorável para transporte, armazenamento e comercialização.

A seguir alguns depoimentos de produtores rurais da região que fazem a rotação de cultura em canaviais com a Soja:

“Tenho efetuado o plantio de soja em reforma de canavial desde 2019 e os resultados estão sendo satisfatórios, conseguindo uma produtividade de 50 sacos por hectare, além dos ganhos em preparo do solo para plantio da Cana-de-açúcar. O trabalho de colheita é terceirizado e os custos giram em torno de 19 sacos de soja” Wagner Boso, Produtor Rural e Engenheiro Agrônomo da Casa da Agricultura de Lençóis Paulista-SP;

“Estamos plantando Soja desde 2019 em propriedade localizada no município de Jaú-SP e em Igaracú da Tietê-SP e estamos entusiasmados com os resultados, não só pelo preço da Soja, mas pelos benefícios na implantação do canavial. Fizemos um investimento em máquinas e implementos e o plantio, colheita e armazenamento são realizados com recursos próprios, com plantio de 90ha, variedade de soja precoce com produção em média de 45sacos/ha e o custo em torno de 19 sacos. Previsão de plantio de 250ha para o ano de 2021. A avaliação de produção do Canavial em que fizemos a rotação com soja, teve uma produção de 190ton/ha.” José Sahade Filho, Engenheiro Agrônomo e Produtor Rural.

“O que mais chama atenção na rotação de cultura com a Soja é a longevidade maior do canavial e em canaviais com 4 a 5 cortes eu consigo até 6 a 7 cortes, outro benefício é o controle de pragas e plantas daninhas com o plantio da soja você consegue quebrar o ciclo. Ganho com a cana planta tem sido em torno de 10 a 15% na produção” Produtor rural, Fazenda Bela Vista, Jaú-SP.

6. Referências Bibliográficas

ALLEONI, L. R. F.; DE BEAUCLAIR, E. G. F. Sugarcane cultivated after corn and peanut, with diferente fertilizer levels. *Scientia Agricola*, v. 52, n. 3, p. 409-415, 1995.

AMBROSANO E. J., CANTARELLA H.; AMBROSANO G. M. B., et. al. Produtividade de Cana de açúcar após cultivo de Leguminosas. *Bragantia*, Campinas, v. 70, n. 4, p. 810-818, 2011.

AMBROSANO, E. J.; WUTKE, E. B.; BRAGA, N. R.; MIRANDA, M. A. C. Leguminosas: alternativas para produção ecológica de grãos em diferentes regiões agroecológicas do Estado de São Paulo. In: AMBROSANO, E.J. *Agricultura Ecológica*. 1.ed. Guaíba: Agropecuária, 1999. p.161-178.

AMBROSANO, E.J.; TRIVELIN, P.C.O.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.B.; SCHAMMASS, E.A.; GUIRADO, N.; ROSSI, F.; MENDES, P.C.D. MURAOKA, T. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. *Scientia Agricola*, v.62, p.534-542, 2005.

CHRISTOFFOLETI, P. J., DE CARVALHO, S. J. P., LÓPEZ-OVEJERO, R. F., NICOLAI, M., HIDALGO, E., DA SILVA, J. E. Conservation of natural resources in Brazilian agriculture: implication sonweed biology and management. *Crop Protection*, v. 26, p. 383- 389. 2007.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. v. 7 Safra 2020/21.

IGUE, K. Dinâmica da material orgânica e seus efeitos na propriedade do solo. In: FUNDAÇÃO CARGILL (Ed.). *Adubação verde no Brasil*. Campinas: Fundação Cargill, 1984. p.232-267.

LIMA D.L.S., BOTT R., BELLO R. D. et al, Desempenho Produtivo de Soja em áreas de rotação com Cana-de-açúcar, *Ciência & Tecnologia: FATEC-JB, Jaboticabal (SP)*, v. 11, n. 1, p. 33-40, 2019.

LIMA FILHO, S. A.; LOMBARDI, A. C.; GODOY, O. P. Agricultura energética e a produção de alimentos. I. Rotação de culturas (feijão, arroz, milho, soja e amendoim) com a cana-de-açúcar, no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 4., 1977, Olinda. Anais [...] Olinda: STAB, 1987, p. 127- 132.

LOMBARDI, A. C.; LIMA FILHO, S. A.; RUAS, D. G. G.; GODOY, O. P.; MINAMI, K.; LAVORENTI, N. A. Agricultura energética e produção de alimentos ?Avaliação preliminar de experimentação da cana-de-açúcar relacionada com milho, feijão, amendoim, arroz e soja no Estado de São Paulo. Brasil Açucareiro, v.99, n.1, p.29-44, 1982.

LUZ, P.H.C; VITTI, G.C.; QUINTINO, T.A.; OLIVEIRA, D.B. Utilização da Adubação Verde na Cultura da Cana-de-Açúcar. Piracicaba: ESALQ, GAPE - Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, 2005. 53p.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. Mitigation of GHG emissions using sugarcane bioethanol. In: ZUUBIER, P; VAN DE VOOREN, J. Sugarcane Ethanol: Contributions to climate change mitigation and the environment. Wageningen: Wageningen Academic Publishers. 2008. p. 95-111.

MARCELO, A. V.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C.; MARTINS, M. R.; JORGE, R. F. Crop Sequences in notillage system: Effects on soil fertility and soybean, maize and rice yield. Revista Brasileira de Ciências do Solo, Viçosa, v. 33, p. 417-428, 2009.

OLIVEIRA A. F.; PEREIRA C. N.; VIEIRA P. A. et al., Análise da Rotação de Grãos na área de reforma de canavial. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 50, 2012, Campinas. Anais [...] Campinas: UNICAMP, 2012.

RODRIGUES, R. A produção de alimentos em canaviais. In: PARANHOS, S.B. Cana-de-açúcar -cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987.

SALOMÉ, J. R.; SAKAI, R.H.; AMBROSANO, E.; BUENO, J. Viabilidade econômica da rotação de adubos verdes com cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Agroecologia, v. 2, n. 2, 2007.

SCIVITTARO, W. B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A. E.; TRIVELIN, P. C. O. Utilização de nitrogênio de adubos verdes e mineral pelo milho. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 24, p. 917-926, 2000.

SOARES, M. B. B. Sistemas de cultivo em área de reforma de cana-de-açúcar e a sucessão de culturas na composição da comunidade infestante. 2014. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

SOARES, M. B. B., FINOTO, E. L., BOLONHEZI, D., CARREGA, W. C., ALBUQUERQUE, J. A. A., PIROTTA, M. Z. Fitossociologia de plantas daninhas sob diferentes sistemas de manejo de solo em áreas de reforma de cana crua. Revista Agro@mbiente On-line, Boa Vista, v. 3, n.5, p

GANHOS COM A SISTEMATIZAÇÃO EM ÁREAS DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Alessandro Aparecido Felice⁶

Ivan Leandro Coletti⁷

Junior Cesar Souza e Silva⁸

Diego Antônio Biondo⁹

Alex Rodrigo Aguilera¹⁰

Alex dos Santos¹¹

Marcio Gonçalves Campos¹²

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma planta da família *Poaceae*, pertencente ao gênero *Saccharum* L., ordem *Gramineae*, classe *Monocotyledones*, tendo recebido a designação *Saccharum spp* (SANTANA, 2018).

As espécies que deram origem às cultivares atuais de cana-de-açúcar são oriundas do sudeste asiático. Acredita-se que a espécie *Saccharum officinarum* tenha sido cultivada desde a pré-história na região da Melanésia (Oceania), onde foi domesticada em torno de 6.000 A.C. e depois disseminada pelo homem por todo o sudeste asiático. A região tornou-se centro de diversidade, tendo como núcleo Papua Nova Guiné e Indonésia (MACHADO, 2003).

⁶ Estudante de Engenharia Agrônômica, Faculdade Gran Tietê, lecoelho felice@gmail.com

⁷ Estudante de Engenharia Agrônômica, Faculdade Gran Tietê, ivancoletti9@gmail.com

⁸ Estudante de Engenharia Agrônômica, Faculdade Gran Tietê, junior_helo_bia@outlook.com

⁹ Estudante de Engenharia Agrônômica, Faculdade Gran Tietê, biondo.diego@hotmail.com

¹⁰ Estudante de Engenharia Agrônômica, Faculdade Gran Tietê, alexaguilera.31@hotmail.com

¹¹ Estudante de Engenharia Agrônômica, Faculdade Gran Tietê, alex-santoss1@hotmail.com

¹² Engenheiro Agrônomo, Graduando em Pedagogia. Dr, Docente das Faculdades Galileu e Gran Tietê, marciocamposagronomo@gmail.com

A cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene. Seu ciclo produtivo é de, em média, seis anos, com cinco cortes; a propagação ocorre por meio de colmos, que são tipos de caules onde os nós e entrenós são bem visíveis; a gema axilar é a responsável por formar uma nova planta (TRONQUIN, 2013).

2. PANORAMA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

Atualmente, a maior parte dos canaviais do país localiza-se no interior do Estado de São Paulo. O etanol é o principal produto extraído desse vegetal, destacando-se economicamente como combustível alternativo, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento sustentável (SANTANA, 2018).

Com a expansão do setor sucroenergético, houve um significativo aumento da área cultivada com cana-de-açúcar e uma consequente escassez de mão-de-obra. O rigor das leis ambientais que proíbem a queima da palha tornou inviável o corte manual da cultura, o que levou o setor a buscar novas tecnologias, principalmente na mecanização do plantio e da colheita, por ocasião da necessidade de agilidade no processo.

Com o aumento significativo de equipamentos e máquinas com tecnologias avançadas, foi possível um entendimento diferente a respeito do cultivo da cana-de-açúcar. A chegada do sistema de piloto automático fez com que os produtores e as usinas tivessem que se adequar às mudanças cada vez mais frequentes.

Para auxiliar nessas demandas, veio o processo de sistematização da lavoura, que consiste em um conjunto de melhorias realizadas nas áreas que favorecem o desempenho das operações de plantio, tratos culturais e colheita, maximizando a eficiência operacional (maior rendimento com menor custo) e preservando a integridade do solo e a saúde do canavial. Com isso é possível produzir mais na mesma área, reduzir os custos com mecanização e aumentar a rentabilidade da lavoura.

Adaptando-se a todas essas mudanças, o Brasil é hoje o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo também líder na produção e exportação de açúcar e o segundo maior produtor e exportador de etanol,

que, por ser considerado um combustível limpo, possui ótima aceitação no mercado internacional.

3. SOLO

3.1 Conservação

Entende-se por manejo de solo toda atividade aplicada ao sistema solo-planta, com o intuito de aumentar a produtividade agrícola e evitar possível degradação ambiental. Todavia, as práticas de manejo dependem de níveis tecnológicos resultantes de conhecimento e de investimento. Para manejar adequadamente uma área são necessários conhecimentos sobre a cultura e o clima (ALFONSI, 2005).

Deste modo, a conservação do solo é de grande importância para o cultivo da cana-de-açúcar, pois ele permanece exposto por certo período, o que leva à necessidade da adoção de práticas conservacionistas que evitem corredeiras de água no talhão, deslocamento de solo e fertilizantes para os rios e assoreamentos de rios e áreas produtivas no talhão, resultando em menor produtividade e erosões, além do risco de o proprietário da área ser responsabilizado legalmente por danos ambientais. A fim de evitar esses danos, a aplicação de técnicas de terraceamento e o levantamento de curvas de nível e posição nos sulcos de plantio devem ser planejadas com antecedência, para serem implantadas antes do preparo de solo.

3.2 Preparo de solo convencional

É importante utilizar corretamente as técnicas de preparo do terreno para se evitar sua progressiva degradação física, química e biológica. O preparo do solo tem por objetivo básico otimizar as condições de brotamento, emergência e estabelecimento das plantas. O sistema deve, ainda, aumentar a infiltração de água, reduzindo a enxurrada e, por consequência, a erosão (ROSSETTO; SANTIAGO, 2005).

O plantio de cana-de-açúcar segue as mesmas orientações agrônômicas de décadas atrás, as quais se baseavam no rompimento da camada mais profunda do solo, em torno de 50 cm abaixo da superfície,

com arados ou subsoladores e, em seguida, uma sequência de gradagens, com a finalidade de incorporar toda a matéria vegetal seca e quebrar os torrões oriundos da operação anterior. O sistema de gradagem possui a seguinte ordem pré-estabelecida:

- Grade aradora ou “pesada”: possui a função de incorporação mais profunda e destruição da matéria vegetal seca;
- Grade intermediária: proporciona a “quebra” dos torrões;
- Grade niveladora: torna o solo bem homogêneo para receber a nova cultura, promove incorporação de corretivos e proporciona uma futura boa aplicação de herbicidas.

3.3 Preparo mínimo

A técnica de cultivo mínimo consiste em um preparo mínimo do solo: a soqueira da cana-de-açúcar é eliminada com o uso de herbicida e, em seguida, é feita a sulcação do solo para o novo plantio, nas entrelinhas e linhas antigas. Para a cana-de-açúcar, que permanece no mesmo local por vários anos sem que haja movimentação do solo (cana-planta e soqueiras), é praticamente imprescindível que se faça a subsolagem (ROSSETO; SANTIAGO, 2005).

4. CONTEXTUALIZAÇÃO ATUAL DA PRODUÇÃO E SISTEMATIZAÇÃO

Devido à crise que afeta o setor sucroenergético há vários anos, elevação nos custos de produção, incertezas comerciais e oscilações climáticas, o setor canavieiro busca alternativas que possibilitem aumento na produtividade, longevidade do canavial, conservação do solo e redução de custos. A sistematização possibilita a otimização na mecanização e conservação do solo com reflexos na produtividade, possibilitando:

- Otimização das operações de máquinas, diminuindo manobras e aumentando sua eficiência com consequência redução de custos;
- Aumento de linhas de plantio;

- Diminuição de pisoteio na lavoura;
- Conservação do solo;
- Melhoria dos aspectos físicos do solo;
- Aumento na produtividade.

O aumento da produtividade agrícola e a diminuição dos custos produtivos passaram a ser fundamentais após a globalização da economia. Dentre os diversos sistemas de produção, aquele que viabiliza potencializar a relação custo-benefício torna-se o de maior interesse.

A identificação das deficiências é importante para o planejamento das medidas técnicas, no sentido de aumentar o rendimento operacional sem prejudicar a conservação do solo na área. Todavia, rendimento e segurança têm importância econômica, tanto na ciência básica quanto na ciência aplicada.

No sentido de melhorar a execução das atividades na cadeia produtiva da cana-de-açúcar, a adoção de técnicas permite estabelecer um equilíbrio entre o uso eficiente das operações e a identificação das desordens no custo-benefício, em função de perdas na qualidade operacional. Neste contexto, tecnologia de sistematização é a prática mais sustentável da produção e preservação do solo, promovendo redução no tempo operacional de máquinas e implementos nas atividades ligadas à produção, além de possibilitar a retenção de água no solo e aumentar a segurança e a ergonomia do operador.

Diante da importância da permanência do setor sucroenergético para o desenvolvimento rural regional, da influência e contribuição da cana-de-açúcar na economia estadual e federal e frente ao imperativo da gestão ambiental, são necessários sistemas produtivos mais sustentáveis do ponto de vista energético, socioambiental e econômico para a região centro oeste paulista.

Neste cenário, a sistematização representa o conjunto de soluções práticas ao segmento pertinente de ampliação na região. Além disso, a redução do ônus ambiental por meio da conservação e preservação de recursos hídricos no solo representa uma justificativa plausível a

problemas enfrentados na produção de cana-de-açúcar no país. Deste modo, encontramos nos sistemas de produção mecanizados segurança, rendimento operacional e preservação do solo.

Em um estudo que realizamos em uma área de uma fazenda no município de São Manuel/SP, com clima característico pela estação chuvosa no verão e tempo seco no inverno, a sistematização proporcionou um aumento de 1,7% na área produtiva. Antes da sistematização, a área produtiva era de 122 ha e, após, passou para 124,2 ha.



Figura 01: Layout do monitor do piloto automático

Devido à sistematização na área, o número de sulcos de maior comprimento aumentou, resultando em um maior rendimento operacional durante a realização das operações mecanizadas.

A sistematização evidenciou ainda um maior rendimento operacional para os sulcos de menor tamanho, em função do aumento em seu comprimento. Esse melhor desempenho no rendimento das operações mecanizadas em função de uma maior velocidade no deslocamento e/ou menor tempo nas manobras contribuiu com a redução no consumo de combustível, resultando também em menor custo operacional.

A sistematização também aumentou a área útil e otimizou todas as manobras executadas, levando ao aumento no rendimento e à redução de custos no sistema operacional ao comprimento da linha de plantio.



Figura 02: plantio sendo realizado com tecnologia “RTK” com sulcos otimizados

O espaçamento em função do uso de terraços passantes, além de proporcionar segurança às operações, potencializou o layout no talhão também. Supõe-se que isso tenha contribuído com a manutenção da palha no solo, possibilitando obter maior relação custo-benefício no sistema de produção nas colheitas subsequentes.

A utilização de terraços passantes (técnica de conservação do solo) possibilita que as operações mecanizadas possam passar os terraços sem impactar em pisoteio na planta, colaborando em uma melhor drenagem na distribuição e infiltração das águas da chuva e em um tempo maior tempo para infiltração.

Onde a declividade ficou acima de 9 a 12% ou mais, preferiu-se usar terraços embutidos de 5 em 5 metros. Também é importante destacar a eficiência dos terraços passantes trabalhando no controle da velocidade das águas da chuva e colaborando no tempo de infiltração.

A sistematização, portanto, proporciona aumento na segurança e no rendimento das operações mecanizadas, melhora o layout da área com uniformidade das quadras, reduz e/ou substitui terraços, reduz manobras e sulcos mortos, aumenta a capacidade operacional e promove ganho de área produtiva.

REFERÊNCIAS

ALFONSI, R. R., *Árvore do conhecimento: cana-de-açúcar*. **Ageitec**, 2005. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_30_711200516717.html. Acesso em: 12 set. 2021.

MACHADO, F. de B. P., **Brasil, a doce terra – História do setor**, 2003. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/historia_da_cana_000fhc62u4b02wyiv80efhb2attuk4ec.pdf. Acesso em: 12 set. 2021.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Plantio da cana-de-açúcar**, 2005. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_33_711200516717.html. Acesso em: 12 set. 2021.

SANTANA, A. L. Cana-de-açúcar. **Infoescola**, 2018. Disponível em: <https://www.infoescola.com/plantas/cana-de-acucar/>. Acesso em: 12 set. 2021.

TRONQUIN, R. Análise revela arquitetura vegetativa da cana-de-açúcar. **Agência USP de notícias**, 2013. Disponível em: <http://www.usp.br/agen/?p=140884>. Acesso em: 12 set. 2021.

FAUNA E CONSERVAÇÃO NA PAISAGEM AGRÍCOLA PAULISTA

Carla Gheler-Costa¹³

Fábio H. Comin¹⁴

Gilberto Sabino-Santos Jr¹⁵

Luciano M. Verdade¹⁶

Histórico da cultura da cana-de-açúcar no Brasil

A cana-de-açúcar foi descrita pela primeira vez por Linnaeus, em 1753, com o gênero *Saccharum*, como sendo uma planta da família das gramíneas de regiões tropicais, com origem em ilhas da Polinésia ou na Indonésia. Estima-se que a planta seja usada pelo homem há cerca de 20.000 anos (D'AGOSTINI et al., 2009). Ela chegou na Europa por meio dos gregos e árabes a distribuíram por todo o Mediterrâneo, da Pérsia à Península Ibérica, de onde foi levada para a ilha da Madeira. De lá ela foi trazida ao Brasil em 1532, e chega no povoamento recém fundado de São Vicente (SP), onde os primeiros plantios foram estabelecidos e o primeiro engenho de açúcar local foi construído. No entanto, as condições climáticas, hidrológicas, geológicas e geográficas da ilha de São Vicente não foram favoráveis para o desenvolvimento da cultura na região. A escolha das áreas para o desenvolvimento da cultura canavieira era condicionada também pela proximidade de corpos d'água para facilitar o transporte, mover os moinhos, prover o abastecimento de água para os animais e todas as demais atividades do engenho. Um fato importante e fundamental para o bom funcionamento do engenho era a presença de vegetação florestal nas proximidades, pois muita madeira era necessária

¹³ Bióloga, Pedagoga, Dra., Assessora Técnica, Câmara dos Deputados, Brasília, cgheler@gmail.com

¹⁴ Biólogo, Dr., Pesquisador Sênior – Ecologia Aplicada, fhc.eco@gmail.com

¹⁵ Virologista e Ecólogo Viral, Dr., Pesquisador Associado na Tulane University School of Public Health and Tropical Medicine, gsabino@tulane.edu

¹⁶ Engenheiro Agrônomo, Dr., Docente na Universidade de São Paulo, lmverdade@usp.br

para as edificações e para suprir as fornalhas dos engenhos como lenha. À época, não havia o conceito e nem a preocupação com a conservação ambiental.

A partir daí a cultura da canavieira chegou à região Nordeste do Brasil, principalmente na Zona da Mata, por esta apresentar condições climáticas favoráveis, solos férteis e abundância hídrica (ANDRADE, 2005), o que fez com que a área ficasse conhecida, na época, como “Nordeste Açucareiro”. Segundo Melo (1962), a Zona da Mata compreendia a faixa úmida no baixo vale do rio Ceará-Mirim (Rio Grande do Norte), indo para o sul no Baixo Rio São Francisco e se alongando pelo Estado de Sergipe e norte da Bahia até o recôncavo da Baía de Todos os Santos. Essa faixa de terra tinha sua largura muito variável (50 a 120 km). Entre os séculos XVI e XIX, as capitanias de Pernambuco e da Baía de Todos os Santos (atual Estado da Bahia) foram as que mais se destacaram na produção do açúcar. Desta forma, por volta de 1535, são instalados os primeiros plantios e engenhos na capitania de Pernambuco, que, devido a um clima favorável e maior proximidade com a Europa, acabou por superar a produção de São Vicente (RODRIGUES; ROSS, 2020).

Durante as próximas décadas, o negócio açucareiro alcançou muito sucesso, incentivando uma migração de colonos para a região, sendo que, em 1585, a capitania de Pernambuco contava com 66 engenhos e com o principal porto para exportação da produção de açúcar, o Porto de Recife (ANDRADE, 1994). A capitania da Baía de Todos os Santos também apresentou um grande sucesso na produção açucareira, sendo que 75% da produção, na época, se concentrava nestas duas capitanias (SCHWARTZ, 1988). Essa região concentrou por anos a maior produção de cana-de-açúcar no Brasil, representada principalmente por açúcar, melaço, rapadura e aguardente (D’AGOSTINI et al., 2009). Desta forma, a cana-de-açúcar torna-se o produto a ser cultivado em terras brasileiras (FURTADO, 1969).

A produção canavieira na ilha de São Vicente (SP) entrou em crise em meados de 1568, devido às dificuldades de solo e geográficas que impediam sua expansão e também devido à Guerra dos 80 Anos (1568-

1648) para a independência das províncias dos Países Baixos em relação à Coroa Espanhola. As desavenças entre espanhóis e holandeses prejudicaram em grande escala o comércio e distribuição do açúcar na Europa, afetando, consequentemente, as relações comerciais entre Portugal e Espanha. Como consequência disso, os holandeses fundaram, em 1621, a Companhia das Índias Ocidentais, com o principal objetivo de romper o bloqueio espanhol e retomar os negócios com o açúcar nordestino do Brasil. Com a chegada do Conde de Nassau em 1637, os holandeses conseguem, então, expandir e recuperar a produção açucareira na capitania de Pernambuco, com a ajuda de mão-de-obra escrava (MELLO, 2012). Por cerca de duas décadas, os holandeses dominaram a produção de açúcar no Nordeste e implantaram um sistema semelhante em suas colônias no Caribe. Anos depois, a produção caribenha superou a brasileira e se impôs no mercado internacional, levando o Brasil a perder o monopólio açucareiro no final do século XVII e quase ao colapso no século XVIII (FURTADO, 1969).

Com a perda do monopólio do açúcar, a coroa Portuguesa se voltou à busca por metais, principalmente na região Centro-Sul do Brasil. No entanto, as propriedades rurais açucareiras continuaram produtivas, sobretudo no Nordeste. Segundo Schwartz (1988), em 1730 a produção de açúcar no país era de cerca de 2,5 milhões de arrobas (aproximadamente 36.700 toneladas) e, em 1776, a produção foi reduzida para cerca de 1,4 milhões de arrobas (aproximadamente 20.600 toneladas). Essa quantidade supria, à época, apenas 10% da necessidade do mercado internacional. Na segunda metade do século XVIII, o Brasil já era o principal produtor de açúcar novamente e os senhores de engenho tinham grande domínio e força regional, adaptando os engenhos para a produção de aguardente (moeda de troca na compra de escravos africanos), principalmente na região litorânea do Sudeste (RJ e SP). A cana-de-açúcar passa, então, a ser cultivada não apenas na região litorânea, avançando sobre a Mata Atlântica do interior e atendendo uma demanda por açúcar mascavo, melaço e aguardente (DEAN, 1996). Mesmo assim, os problemas econômicos, a negativa indígena de trabalho e questões de solo e clima resultam por acarretar a descontinuidade da produção canavieira no país, com exceção

das propriedades localizadas nas capitanias de São Vicente, Pernambuco e Baía de Todos os Santos (SCHWARTZ, 1988).

No final do século XVIII e século XIX, mudanças no país e no exterior, como a independência do Haiti, as guerras napoleônicas na Europa, a Revolução Francesa, o crescimento demográfico e a urbanização consequentes da Revolução Industrial, a queda na produção minerária no Brasil e o aumento na demanda por açúcar na Europa e demais países elevaram o valor do açúcar como produto e alavancaram novamente o setor açucareiro no Brasil (SIMONSEN, 2005). Desta forma, em meados de 1750 o açúcar passa a ser um produto importante para São Paulo, ocorrendo a expansão dos plantios e surgimento de mais e maiores engenhos e de grandes e importantes núcleos de produção de açúcar e aguardente, principalmente no Planalto Paulista. Durante a década de 1830, devido à qualidade do solo, relevo e clima do interior paulista, a cultura canavieira teve seu apogeu (RODRIGUES; ROSS, 2020). A partir do século XVIII, o Estado de São Paulo passa a ser um grande polo produtor de cana-de-açúcar, tanto que em meados do século XIX é criado o "quadrilátero do açúcar", área que ficava entre os municípios de Piracicaba, Sorocaba, Mogi Guaçu e Jundiaí. Nessa região há o predomínio de solos do tipo latossolo vermelho e argissolos (ROSS, 2006).

Atualmente o plantio de cana-de-açúcar no Brasil possui, ao todo, cerca de 10.063.739 ha, com maior concentração na região Centro-Sul do país (9.131.832 ha), com destaque para o Estado de São Paulo, que possui uma área de cerca de 5.555.502 ha de plantações. Em 2019/2020, o Brasil produziu 642.677 mil toneladas de cana-de-açúcar, sendo 29.606 mil toneladas de açúcar e 35.595 mil m³ de etanol, representando mais de 50% da produção de cana-de-açúcar brasileira (UNICA, 2021). Durante todo o processo de avanço da cultura canavieira, assim como em outros setores da agricultura, a fragmentação e redução dos habitats naturais também avançou, resultando hoje em paisagens que formam um mosaico onde temos as áreas naturais imersas em uma matriz agropecuária, com graus de isolamento e degradação bastante variados. E é nesse sentido que este capítulo aborda os aspectos e as perspectivas para conservação ambiental em áreas agrícolas no Estado de São Paulo.

Diversidade da fauna na paisagem agrícola

A fragmentação tem três grandes componentes: a perda de habitat original, a redução da área de habitat e o aumento do grau de isolamento entre os remanescentes, contribuindo, assim, para a queda da diversidade quando comparada com o habitat original (METZGER, 2000). O arranjo espacial dos remanescentes de vegetação nativa e a complexidade da matriz onde estão inseridos podem ser mais importantes do que a área e o isolamento do fragmento na sobrevivência de algumas espécies de animais e vegetais (METZGER; DECAMPS, 1997; GASCON et al., 1999). Em São Paulo, por meio do protocolo assinado entre os produtores de cana-de-açúcar e o Governo do Estado em 2017, desde então é proibido o uso do fogo no manejo do plantio. A suspensão do fogo trouxe muitos avanços positivos sobre a paisagem agrícola canavieira, principalmente no que tange à fauna e à flora nativas, uma vez que o fogo dos canaviais frequentemente acabava atingindo os remanescentes de vegetação nativa.

A vegetação que circunda os fragmentos é muito importante para a sobrevivência de uma metapopulação de fauna em uma paisagem fragmentada (METZGER; DECAMPS, 1997). Essa vegetação é chamada de matriz e, dependendo de suas características e qualidade, pode facilitar ou impedir a movimentação de certas espécies e servir de habitat alternativo para aquelas que originalmente ocupavam a vegetação nativa (MEDELLIN; EQUIHUA, 1998, GHELER-COSTA et al., 2012, 2013). Um outro aspecto é que a invasão de espécies exóticas ou não-florestais acelera as mudanças na estrutura das comunidades e é, muitas vezes, a causa do declínio das espécies nativas e tipicamente florestais de fauna e flora (RAMANAMANJATO; GANZHBORN, 2001).

Algumas espécies de vertebrados acabam se beneficiando e ocupando também a matriz agrícola, mostrando que o uso da paisagem varia dentro dos grupos animais e entre os grupos (DOTTA; VERDADE, 2011, MARTIN et al., 2012, GHELER-COSTA et al., 2012, 2013, VERDADE et al., 2014a, PENTEADO et al., 2016, GERHARD; VERDADE, 2016). A paisagem agrícola acaba por abrigar e manter uma importante diversidade de espécies e sua ecologia funcional (relações

ecológicas e tróficas). A permeabilidade da matriz agrícola varia entre as culturas agrícolas e entre as espécies. No entanto, mesmo que a matriz facilite a locomoção das espécies, a presença de corredores florestais ligando os remanescentes nativos deve ser priorizada, pois são um importante veículo para o movimento de indivíduos, favorecendo o fluxo gênico entre sub-populações (BOLGER et al., 2001; MECH; HALLETT, 2001) e o aumento em tamanho das populações (PARDINI et al., 2005; GHELER-COSTA et al., 2012, 2013).

A avifauna apresenta espécies mais dependentes de áreas nativas e espécies menos dependentes e mais plásticas com relação à estrutura e complexidade dessas áreas. Penteado et al. (2016), analisando uma paisagem agrícola composta por um mosaico de ambientes naturais e antrópicos no interior do Estado de São Paulo, detectou 3.679 indivíduos pertencentes a 224 espécies (181 gêneros e 44 famílias). Os remanescentes de floresta nativa foram os ambientes com maior riqueza e diversidade de espécies e apresentaram 70% do total das espécies registradas na paisagem agrícola. Nos canaviais analisados foram detectadas 52 espécies, o que representa 21% do total, sendo *Notiochelidon cyanoleuca*, *Phaeoprogne tapera*, *Zonotrichia capensis*, *Volatinia jacarina* e *Pseudoleistes guirahuro* as mais de maior ocorrência, todas comumente encontradas em ambientes abertos. Embora os autores tenham encontrado riqueza e abundância diferentes entre os remanescentes de vegetação nativa e os canaviais, não foi detectada diferença significativa entre os ambientes quanto ao número de categorias tróficas. Alexandrino et al. (2019), analisando canaviais em áreas próximas às analisadas por Penteado et al (2016), registraram 72 espécies de aves. Ambos os autores consideraram que a comunidade de aves utiliza a paisagem agrícola como um todo, com padrões específicos e diferentes de frequência de uso dos ambientes presentes na paisagem.

Como já sabemos, a paisagem agrícola, em especial a composta por uma matriz monocultural, acaba sendo homogênea em relação aos ambientes disponíveis para a fauna silvestre. No entanto, algumas culturas, como a cana-de-açúcar, devido a seu manejo, acabam criando um mosaico de ambientes com estágios de crescimento diferentes ao longo do ano e da

paisagem. Lukhele et al. (2021), analisando as mudanças da comunidade de aves entre quatro diferentes estágios do plantio de cana-de-açúcar (emergente, pequeno, médio e grande) e áreas-controle de savana nativa prioritárias típicas do Nordeste de Eswatini (África do Sul), detectaram 124 espécies de aves pertencentes a 58 famílias. Os resultados corroboram os encontrados por Penteado et al (2016), no qual a riqueza e diversidade de espécies foi maior em áreas de vegetação nativa, quando comparada às áreas de vegetação nativa. Contudo, segundo Lukhele et al. (2021), a diversidade funcional foi maior nas áreas de cana-de-açúcar do que nas áreas de savana. Os autores também observaram uma alta variabilidade temporal e espacial entre as comunidades de aves nos diferentes estágios de crescimento dos plantios analisados, promovendo a ocorrência de diferentes espécies e com funções tróficas diferentes.

Rivera-Pedroza et al. (2019), comparando a diversidade de formigas e aves na Colômbia, detectaram diferenças entre a riqueza de espécies de formigas e aves em diferentes faixas de distância entre vegetação nativa e cana-de-açúcar. Segundo os autores, a riqueza de espécies diminui à medida que a distância entre a vegetação nativa e a cana-de-açúcar aumenta. Entretanto, existe um grande compartilhamento de espécies entre os ambientes, o que mostra que a matriz de cana-de-açúcar pode ser favorável para uma grande parte das espécies de formigas e outros insetos generalistas e, conseqüentemente, para espécies de aves insetívoras e generalistas que forrageiam pela vegetação herbácea e que podem, portanto, sobreviver e se adaptar na matriz (LANG-OVALLE et al., 2011).

O grupo dos mamíferos é um dos mais diversos em relação ao uso e ocupação de habitats, uma vez que podemos encontrar mamíferos terrestres, dulcícolas, marinhos, escansoriais e voadores. Os mamíferos também apresentam uma variada ecologia trófica, já que podemos encontrar animais estritamente carnívoros, onívoros, frugívoros, nectarívoros, insetívoros, piscívoros, herbívoros, folívoros e muitas outras interações entre essas principais categorias. Assim, essas espécies possuem um importante papel na manutenção, restauração e sucessão ecológica nos ambientes naturais, pois apresentam funções ecológicas essenciais e podem ser consideradas espécies-chave na estruturação de

muitas comunidades (DOTTA; VERDADE, 2011). A comunidade de mamíferos de médio e grande porte em paisagens agrícolas, em sua grande maioria, foi alterada com a perda e/ou declínio nas populações de predadores de topo, como a onça-pintada, a onça-parda e o lobo-guará. E quando essas espécies estão presentes, muitas vezes podem estar associadas a conflitos com proprietários rurais devido à predação de animais domésticos como bovinos, caprinos, ovinos e aves. Estudos relatam que a comunidade de mamíferos de grande e médio porte em paisagens agrícolas, de forma geral, é composta por espécies generalistas capazes de utilizar diversos tipos de habitats e itens alimentares disponíveis.

Dotta e Verdade (2011), estudando uma paisagem agrícola com matriz de cana-de-açúcar, registraram 25 espécies de mamíferos de médio e grande porte nativas e duas espécies exóticas, além de 6 espécies domésticas. Das 25 espécies de mamíferos nativas registradas em toda a paisagem, 20 foram registradas em canaviais, sendo o cachorro-do-mato (*Cerdocyon thous*) e a lebre europeia (*Lepus europaeus*) as de maior ocorrência, ambas com hábitos generalistas. Soares e Peña (2015), estudando uma paisagem também com matriz de canaviais no Estado de Goiás, registraram 36 espécies de mamíferos, com predomínio de espécies onívoras. Esses resultados corroboram os encontrados por Dotta e Verdade (2011), demonstrando que algumas espécies têm maior plasticidade e capacidade adaptativa quanto ao uso e ocupação de ambientes diversificados e alterados na paisagem agrícola. Muitas espécies de mamíferos de médio e grande porte usam os canaviais para forragear e até se reproduzir, pois ali há uma grande quantidade de recursos alimentares (insetos e pequenos vertebrados).

Com relação a pequenos mamíferos, estudos conduzidos em paisagens agrícolas têm constatado que, embora os remanescentes de vegetação nativa sejam, em algumas situações, estruturalmente alterados, a abundância total e a riqueza de espécies de pequenos mamíferos são significativas e meritórias de estudos, monitoramento e ações de conservação (PARDINI et al., 2005; GHELER-COSTA et al., 2012, 2013, MARTIN et al., 2012, ROSALINO et al., 2013, 2014). Gheler-Costa et al.

(2012) registraram 8 espécies de pequenos mamíferos em uma paisagem agrícola sob domínio de canaviais, sendo 4 espécies de roedores silvestres registradas em canaviais e com grandes populações. Gheler-Costa et al. (2013), estudando apenas plantios de cana-de-açúcar com diferentes manejos (com e sem uso do fogo), registraram 399 indivíduos pertencentes a 6 espécies de roedores e uma de marsupial. Apesar de algumas espécies de pequenos mamíferos serem beneficiadas com as alterações ambientais (GHELER-COSTA et al., 2012, 2013, MARTIN et al., 2012, ROSALINO et al., 2013, 2014), a maioria das espécies tem uma relação clara com a floresta, desempenhando papel importante nesses ambientes por meio da predação e dispersão de sementes (VIEIRA et al., 2003; PARDINI et al., 2005). De forma geral, os canaviais são ambientes utilizados para residência, abrigo, reprodução e forrageamento por diversas espécies de aves e mamíferos mais generalistas e menos exigentes quanto à estrutura e composição do ambiente (DOTTA; VERDADE, 2011, GHELER-COSTA et al., 2012, 2013, SOARES; PEÑA, 2015, PENTEADO et al., 2016, ALEXANDRINO et al., 2019).

No caso das paisagens agrícolas, esses animais podem estar se beneficiando das atividades antrópicas da agrossilvicultura, onde encontram abrigo e oferta de alimento em abundância. Diante desse cenário, podemos concluir que os canaviais podem fornecer fonte complementar de alimento para diversas espécies de mamíferos e aves. Os estudos referentes à abundância de determinadas espécies de roedores silvestres podem nos levar a responder não somente questões ecológicas, mas também questões pertinentes na área da saúde pública e epidemiologia.

Saúde Única em paisagens dominadas por canaviais

Descrever os processos de Saúde Única em paisagens agrícolas pode trazer à tona diversos temas. Neste tópico abordaremos doenças zoonóticas em face das rápidas mudanças da paisagem realizadas pela ação humana em nosso mundo moderno. A Saúde Única é a área da pesquisa que conceitua a saúde como um processo transdisciplinar que conecta a saúde das pessoas e dos animais ao contexto do meio ambiente. A Saúde Única

postula que alcançar resultados ideais de saúde depende da interconexão entre pessoas, animais e seu ambiente compartilhado (KELLY et al., 2017). Zoonoses consistem em microrganismos que podem ser transmitidos aos seres humanos e possuem sua origem no mundo animal. A transmissão de doenças zoonóticas pelos animais silvestres ocorre principalmente por contato direto, mordidas, contato indireto com objetos contaminados, ingestão oral ou inalação de partículas do patógeno em aerossóis, fezes e urina (TAYLOR et al., 2013; AYRAL et al., 2015).

A perda acelerada da diversidade biológica é um processo com consequências profundas, pois inviabiliza os ecossistemas com notável prejuízo para a sociedade humana. Os benefícios dos ecossistemas ao homem são diversos e incluem, principalmente, o fornecimento de alimentos e a prevenção de inundações por drenagem de água das chuvas. Contudo, tais benefícios são reduzidos, tornando-se quase inexistentes, com a acelerada mudança da paisagem natural prestes a ser convertida em áreas fragmentadas (DEARING; DIZNEY, 2010; MILHOLLAND et al., 2017, 2018). Essas mudanças da paisagem natural e a degradação ambiental estão associadas ao risco elevado de doenças zoonóticas ao homem, pois influenciam negativamente a diversidade de roedores (STREICKER et al., 2016; JOHNSON et al., 2020). Um importante atributo da paisagem que pode influenciar a incidência de um patógeno é a composição e arranjo das áreas de contato entre hospedeiros e humanos, uma vez que pode modular a intensidade com que os hospedeiros usam e se movem através da matriz agrícola (WILKINSON et al., 2018). A estrutura da paisagem pode ser avaliada de maneiras diferentes, por meio da cobertura florestal, densidade de borda, isolamento e conectividade. A fragmentação, por sua vez, tende a separar populações pequenas em fragmentos isolados, acarretando uma maior susceptibilidade a doenças pela redução da variabilidade genética (KEESING et al., 2010; STEPHENS et al., 2016) e aumentando o “efeito de borda”, que promove maior interação entre patógenos, vetores e hospedeiros, incluindo os seres humanos (GUBLER et al., 2001; LUIS et al., 2013).

A cana-de-açúcar é uma dessas paisagens modificadas que favorece a fragmentação e a paisagem de mosaicos com perda da diversidade de espécies (GHELER-COSTA et al., 2013). A expansão da cana-de-açúcar tem sido relacionada com uma maior abundância de roedores hospedeiros infectados com microrganismos potencialmente patogênicos (PRIST et al., 2017a, 2017b; MUYLAERT et al., 2019a, 2019b). No Brasil muitas espécies de roedores silvestres são reservatórios naturais de microrganismos causadores de várias doenças humanas. Roedores da família *Cricetidae*, subfamília *Sigmodontinae*, habitam intensamente esses ambientes modificados e possuem uma plasticidade que os permite adaptar-se facilmente aos ambientes agrícolas. *Akodon montensis*, *A. serrensis*, *A. azarae*, *A. paranaenses*, *Calomys tener*, *C. callosus*, *C. laucha*, *Holochilus sciureus*, *Necomys lasiurus*, *Oligoryzomys nigripes*, *O. fornesi*, *O. utiaritensis*, *O. moojeni*, *O. flavesceus*, *Oxymycterus nasutus* e *O. dasytrichus* são hospedeiros de diversas espécies de hantavírus (MUYLAERT et al., 2019^a, 2019b). Da mesma forma, os roedores *C. tener*, *N. lasiurus* e *Rhipidomys mastacalis* são hospedeiros de arenavírus (BISORDI et al., 2015; SABINO-SANTOS et al., 2016). Os hantavírus nas Américas podem causar síndrome pulmonar e cardiovascular com taxa de mortalidade de até 50%. Por outro lado, os arenavírus causam febre hemorrágica letal. Ambos os vírus não possuem ainda tratamento eficaz e a possibilidade de cura é praticamente inexistente (CHUNG et al., 2007; BISORDI et al., 2015; SABINO-SANTOS et al., 2016). Esses roedores que habitam a cana-de-açúcar também podem transmitir doenças bacterianas como salmonelose, infecções patogênicas por *E. coli*, campilobacteriose e leptospirose (MARKOTIC et al., 2002). Doenças por protozoários que podem ser transmitidas por esses roedores incluem a giardíase e a amebíase. Ainda, o contato com pulgas e carrapatos desses animais pode transmitir outras doenças, como a peste bubônica e a febre maculosa (MATHISON; PRITT, 2014).

Os roedores hospedeiros desses patógenos parecem ser influenciados de uma maneira negativa pela percentagem de cobertura florestal nativa, como os roedores generalistas *A. montensis*, *C. tener*, *N. lasiurus*, e *O. nigripes*, que se favorecem da degradação ambiental e se

adaptam rapidamente em matrizes agrícolas (PRIST et al., 2017a; MUYLAERT et al., 2019a). Níveis intermediários de diversidade da paisagem podem refletir uma combinação de diferentes habitats que podem fornecer áreas adequadas para nidificação e alimentação, principalmente para espécies que não residem estritamente na floresta. Por exemplo, esses roedores generalistas utilizam plantações de cana-de-açúcar para nidificação, forrageamento e corredores, onde o risco de transmissão por patógenos pode aumentar para quem trabalha ou passa por esses locais (GOTTDENKER et al., 2014; MUYLAERT et al., 2019a). A expansão de monoculturas como a cana-de-açúcar pode ser um fator de risco para a infecção por hantavírus em humanos (PRIST et al., 2017b; MUYLAERT et al., 2019b). Gheler-Costa et al. (2021) sugerem que a prevalência de hantavírus em roedores da cana-de-açúcar está mais relacionada com o crescimento populacional de roedores do que com a densidade desses roedores.

Diante disso, entender a relação ecológica entre fragmentação florestal, desenvolvimento agrícola sustentável, perda de biodiversidade e prevalência de patógenos é importante para a compreensão integral do elo entre as mudanças antrópicas do ambiente e a saúde das populações como um todo. Para tal, mostra-se necessária a visão transdisciplinar da Saúde Única para o desenvolvimento sustentável. Dessa forma, é necessário criar medidas que favoreçam o manejo e o uso da terra e que possibilitem mais cobertura florestal, com conectividade entre os fragmentos florestais e a utilização de técnicas que sejam “amigáveis” para a vida selvagem, com o intuito de mitigar a mortalidade dos predadores desses roedores hospedeiros de microrganismos patogênicos.

Gestão da fauna em paisagens dominadas por canaviais

Paisagens agrícolas passaram a ocupar áreas comparáveis ou mesmo maiores do que os biomas que as antecederam. Essa expansão agrícola resultou na extinção local de uma parcela expressiva da fauna e flora. No entanto, parte delas tem conseguido adaptar-se a tais ambientes novos. Considerando que não há em nenhum país do mundo sistemas de unidades de conservação (ex.: parques nacionais, reservas biológicas, etc.) que

consigam prover conservação na íntegra das espécies silvestres, paisagens agrícolas paradoxalmente ganharam um papel não apenas ligado à produção biológica, mas também à sua conservação (VERDADE et al., 2016). Tal papel pode ser aprimorado em paisagens agrícolas multifuncionais que, além da missão primária ligada à produção agrícola (i.e., agricultura, pecuária e silvicultura), têm também a missão secundária, mas não menos importante, de prover conservação biológica (MARTINELLI et al., 2010).

A divisão do uso da terra entre produção agrícola e conservação biológica está no cerne do debate não tão recente chamado em inglês de “*land sharing versus land sparing*” (GREEN et al., 2005). Ele trata da disposição espacial entre áreas agrícolas e áreas de conservação, qual seja imbricada (i.e., *land sharing*) ou apartada (i.e., *land sparing*). A origem desse debate é um debate anterior quanto ao papel da distribuição espacial de áreas de conservação na efetiva conservação das espécies silvestres. Sua sigla em inglês era SLOSS (i.e., *single large or several small*) (TJØRVE, 2010). Nesse contexto, a manutenção de pequenas áreas de conservação em meio a uma matriz formada por plantações agrícolas (i.e., *land sharing*) teria derivado da ideia de pequenas áreas múltiplas de conservação (i.e., *several small*), em contraposição ao estabelecimento de áreas grandes e isoladas de conservação (i.e., *single large*) apartadas de paisagens dominadas por monoculturas. Na verdade, a diferença entre ambas é uma questão de escala. Por exemplo, uma propriedade pode estar inserida em uma paisagem *land sharing* (VERDADE et al., 2014a). Além disso, em uma abordagem prática vale mais a pena conservar, sempre que possível, áreas de vegetação nativa já existentes, sejam elas grandes ou pequenas, isoladas ou não (SOULE; SIMBERLOFF, 1986). Surpreendentemente ou não, essa abordagem prática é que norteou a elaboração do Código Florestal Brasileiro (CFB) décadas antes desse debate (STICKLER et al., 2013). No entanto, a pressão histórica de setores agrícolas – e agora dos setores agroindustriais – sobre o CFB foi no sentido de mudar sua abordagem *land sharing* para *land sparing*, com o argumento de desonerar os setores produtivos (METZGER et al., 2010). O setor canavieiro não foi exceção (JOLY et al., 2015).

Em complemento à recuperação de áreas de proteção permanente (APP) e reserva legal (RL), exigidas pelo CFB, mas nem sempre cumpridas pelo setor canavieiro (VERDADE et al., 2012), o uso de práticas agrícolas amigáveis à fauna pode ser decisivo à sua conservação (VERDADE et al., 2015). O plantio direto e o uso racional de agroquímicos têm-se ampliado no setor com a consequente redução da perda de solo e contaminação ambiental (KARP et al., 2015). Além disso, a suspensão da queima pré-colheita tende a reduzir a mortalidade de mesopredadores (GHELER-COSTA et al., 2013) e a consequente prevalência de hantavírus em pequenos roedores (GHELER-COSTA et al. *no prelo*) e em seres humanos (PRIST et al., 2016).

Em paisagens agrícolas multifuncionais, o processo de tomada de decisões, tanto quanto ao uso da terra quanto ao de práticas agrícolas amigáveis à fauna, deve basear-se no monitoramento do sistema, incluindo sua fauna e flora (VERDADE et al., 2014b). Tal programa deve levar em conta, de um lado, os valores históricos culturais e socioeconômicos ligados à agricultura e, de outro, os processos ecológicos e evolutivos que determinem os padrões de diversidade biológica presentes em paisagens agrícolas (Figura 1). O programa de monitoramento da fauna e flora em paisagens agrícolas, incluindo aquelas dominadas por canaviais, deve ser de longa duração e escala espacial cruzada, a fim de permitir a detecção de impactos antrópicos da escala local à regional (VERDADE et al. 2014b). Para isso, é necessário o estabelecimento de uma rede de sítios de estudos de campo com um banco único de dados que sejam interoperáveis (i.e., compatíveis e comparáveis) (MAGNUSSON et al., 2013, 2014). Dessa forma, será possível assegurar os valores tangíveis e intangíveis ligados às paisagens agrícolas dominadas por canaviais, tanto do ponto de vista da produção agrícola quanto da conservação biológica.

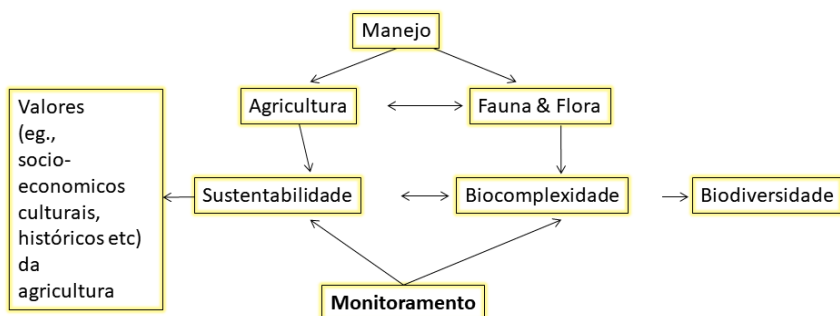


Figura 1. Estrutura de monitoramento de paisagens agrícolas multifuncionais.

A evolução e expansão da cultura canavieira no país e, principalmente, em terras paulistas nos faz reconhecer os avanços tecnológicos e econômicos, bem como refletir sobre a conservação da biodiversidade na matriz agrícola e suas consequências para a própria produção e saúde humana. De modo geral, há um avanço significativo no sistema de produção, com o fim das queimadas, a adequação ambiental e cumprimento do código florestal, além de monitoramentos de fauna já realizados por muitos grupos na indústria canavieira, em sua maioria devido a pressões externas e/ou por exigência de selos ambientais, como o Bonsucro. São inegáveis os benefícios dos serviços ecossistêmicos que a paisagem agrícola produz para toda a sociedade. Torna-se necessário, portanto, que se mude o paradigma e a visão sobre essas paisagens, incluindo-as nas tomadas de decisões conservacionistas, seja na conservação da fauna ou pelo aspecto de Saúde Única. Observar as questões aqui apresentadas reforçam ainda mais a ideia de modelos sustentáveis para conservação da fauna silvestre e de toda a biodiversidade brasileira.

Referências Bibliográficas

ALEXANDRINO, E. R. et al. Highly disparate bird assemblages in sugarcane and pastures: implications for bird conservation in agricultural landscapes. *Neotropical Biology and Conservation*, v. 14, p. 169, 2019.

ANDRADE, M. C. **A terra e o homem no Nordeste**: contribuição ao estudo da questão agrária no Nordeste. 7. ed. São Paulo: Cortez, 2005.

ANDRADE, M. C. **Modernização e pobreza**: a expansão da agroindústria canavieira e seu impacto ecológico e social. São Paulo: Unesp, 1994.

AYRAL, F. et al. The relationship between socioeconomic indices and potentially zoonotic pathogens carried by wild Norway rats: a survey in Rhône, France (2010–2012). **Journal of Epidemiology and Infection**, v. 143, p. 586–599, 2015.

BISORDI, I. et al. *Pinhal* Virus, a New Arenavirus Isolated from *Calomys tener* in Brazil. **Vector borne and zoonotic diseases**, v. 15, n. 11, p. 694–700, 2015.

BOLGER, D. T.; SCOTT, T. A.; ROTENBERRY, J. T. Use of corridor-like landscape structures by bird and small mammals species. **Biological Conservation**, v.102, p.213-224, 2001.

CHUNG, D.-H. et al. Ribavirin reveals a lethal threshold of allowable mutation frequency for Hantaan virus. **Journal of virology**, v. 81, n. 21, p. 11722–9, 2007.

D'AGOSTINI, S.; REBOUÇAS, M. M.; BATISTA FILHO, A.; VITIELLO, N. **Revista Páginas do Instituto Biológico**, vol. 5, n.1, pp. 1-30, 2009.

DEAN, W. **A ferro e fogo**. A história e a devastação da Mata Atlântica brasileira. São Paulo: Companhia das Letras, 1996.

DEARING, M. D.; DIZNEY, L. Ecology of hantavirus in a changing world. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1195, p. 99–112, 2010.

DOTTA, G.; VERDADE, L. M. Medium to large-sized mammals in agricultural landscapes of south-eastern Brazil. **Mammalia**, v. 75, n. 4, p. 345-352, 2011.

FURTADO, C. **Formação econômica do Brasil**. São Paulo: Nacional, 1969.

GASCON, C.; LOVEJOY, T. E.; BIERREGAARD, R. O.; MALCOLM, J. R.; STOUER, P. C.; VASCONCELOS, H. L. Matrix habitat and species richness in tropical forest remnants. **Biological Conservation**, v. 91, 223–229, 1999.

GERHARD, P.; VERDADE, L. M. Stream Fish Diversity in an Agricultural Landscape of Southeastern Brazil. In: Gheler-Costa et al. **Biodiversity in agricultural landscapes of southeastern Brazil**. De Gruyter Open: Poland, 2016. p. 206-224.

GHELER-COSTA, C. et al. The influence of sugarcane pre-harvest fire on hantavirus prevalence in Neotropical small mammals. **Ecosphere**, 2021 (*in press*).

GHELER-COSTA, C.; SABINO-SANTOS JÚNIOR, G.; AMORIM, L. S.; ROSALINO, L. M.; FIGUEIREDO, L. T. M.; VERDADE, L. M. The effect of pre-harvest fire on the small mammal assemblage in sugarcane fields. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 171, p. 85–89, 2013.

GHELER-COSTA, C.; VETTORAZZI, C. A.; PARDINI, R.; VERDADE, L. M. The distribution and abundance of small mammals in agroecosystems of southeastern Brazil. **Mammalia**, v. 76, n. 2, p. 185-191, 2012.

GOTTDENKER, N. L.; STREICKER, D. G.; FAUST, C. L.; CARROLL, C. R. Anthropogenic Land Use Change and Infectious Diseases: A Review of the Evidence. **EcoHealth**, n. May, p. 619–632, 2014.

GREEN, R. E.; CORNELL, S.J.; SCHARLEMANN, J.P.W.; BALMFORD, A. Farming and the Fate of Wild Nature. **Science**, v. 307, n. 5709, p. 550-555, 2005.

GUBLER, D. J. et al. Climate variability and change in the United States: potential impacts on vector- and rodent-borne diseases. **Environmental health perspectives**, v. 109 Suppl, n. May, p. 223–33, 2001.

JOHNSON, C. K. et al. Global shifts in mammalian population trends reveal key predictors of virus spillover risk. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 287, n. 1924, 2020.

JOLY, C. A. et al. Biofuel impacts on biodiversity and ecosystem services. In: SOUZA, G. M.; VICTORIA, R. L.; JOLY, C. A.; VERDADE, L. M. [Eds.]. **Bioenergy & Sustainability: Bridging the Gaps**. v. 72. SCOPE: Paris, p. 548-574, 2015.

KARP, A. et al. Environmental and Climate Security. In: SOUZA, G. M.; VICTORIA, R. L.; JOLY, C. A.; VERDADE, L. M. [Eds.]. **Bioenergy & Sustainability: Bridging the Gaps**. v. 72. SCOPE: Paris. p.136-178, 2015.

KEESING, F. et al. Impacts of biodiversity on the emergence and transmission of infectious diseases. **Nature**, v. 468, n. 7324, p. 647–652, 2010.

KELLY, T. R. et al. One Health proof of concept: Bringing a transdisciplinary approach to surveillance for zoonotic viruses at the human-wild animal interface. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 137, p. 112–118, 2017.

LANG-OVALLE, F. P. A. et al. Macrofauna edáfica asociada a plantaciones de mango y caña de azúcar. **Terra Latinoam**, v.29, p. 169–177, 2011.

LUIS, A. D. et al. A comparison of bats and rodents as reservoirs of zoonotic viruses: are bats special? **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 280, n. 1756, p. 20122753, 2013.

LUKHELE, S. M. et al. Influence of sugarcane growth stages on bird diversity and community structure in an agricultural-savanna environment. **Heliyon**, v. 7, n. 3, p. e06563, 2021.

MAGNUSSON, W. E. et al. **Biodiversidade e monitoramento ambiental integrado**. Áttema Editorial: Santo André, Brasil, 2013.

MAGNUSSON, W. E. et al. Multi-taxa surveys: integrating ecosystem processes and user demands. In: VERDADE, L.M.; LYRA-JORGE, M.C.; PIÑA, C.I. [Eds.]. **Applied ecology and human dimensions on biological conservation**. Springer-Verlag: Germany, p.177-187, 2014.

MARKOTIC, A. et al. Double trouble: hemorrhagic fever with renal syndrome and leptospirosis. **Scand J Infect Dis**, v. 34, n. 3, p. 221–224, 2002.

MARTIN, P. S. et al. Terrestrial non-volant small mammals in agro-silvicultural landscapes of Southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 282, p. 185-195, 2012.

MARTINELLI, L. A. et al. A falsa dicotomia entre a preservação da vegetação natural e a produção agropecuária. **Biota Neotropica** 10:323-330, 2010.

MATHISON, B. A.; PRITT, B. S. Laboratory identification of arthropod ectoparasites. **Clinical Microbiology Reviews**, v. 27, n. 1, p. 48–67, 2014.

MECH, S.G.; HALLETT, J.G. Evaluating the effectiveness of corridors: a genetic approach. **Conservation Biology**, v.15, p.467-474, 2001.

MEDELLIN, R. A.; EQUIHUA, M. Mammal species richness and habitat use in rainforest and abandoned agricultural fields in Chiapas, Mexico. **Journal of Applied Ecology**, v. 35, p.13-23, 1998.

MELO, M. L. Bases geográficas dos problemas do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia**, n. 4, p. 503-541, 1962.

MELLO, E. C. **O bagaço da cana**. São Paulo; Cia. Das Letras, 2012.

METZGER, J.P. et al. Brazilian Law: Full Speed in Reverse? **Science**, v. 329, p. 276-277, 2010.

METZGER, J.P. Tree functional group richness and landscape structure in a Brazilian tropical fragmented landscape. **Ecological Application**, v.10, p. 1147- 1161, 2000.

METZGER, J.P.; DECAMPS, H. The structural connectivity threshold: An hypothesis in conservation biology at the landscape scale. **Acta Oecologica**, v. 18, n. 1, p. 1- 12, 1997.

MILHOLLAND, M. T. et al. Global Diversity and Distribution of Hantaviruses and Their Hosts. **EcoHealth**, v.15, n.1, p. 163-208, 2018.

MILHOLLAND, M. T. et al. Species Identity Supersedes the Dilution Effect Concerning Hantavirus Prevalence at Sites across Texas and México. **ILAR Journal**, v. 58, n. 3, p. 401–412, 2017.

MUYLAERT, R. L. et al. Hantavirus host assemblages and human disease in the Atlantic Forest. **PLoS Neglected Tropical Diseases**, v. 13, n. 8, 2019a.

MUYLAERT, R. L. et al. Spatiotemporal dynamics of hantavirus cardiopulmonary syndrome transmission risk in Brazil. **Viruses**, v. 11, n. 11, 2019b.

PARDINI, R.; SOUZA, M.S.; BRAGA-NETO, R.; METZGER, J.P. The role of forest structure, fragment size and corridors in maintaining small mammal abundance and diversity in an Atlantic Forest landscape. **Biological Conservation**, v. 124, n. 2, p. 253-266, 2005.

PENTEADO, M. et al. 15. Bird Diversity in Relation to Land Use in Agricultural Landscapes of Southeastern Brazil. In: GHELER-COSTA et al. **Biodiversity in agricultural landscapes of southeastern Brazil**. De Gruyter Open: Poland, p. 243-268, 2016.

PRIST, P. R. et al. Landscape, environmental and social predictors of Hantavirus risk in São Paulo, Brazil. **PloS one**, v.11, n. 10, e0163459, 2016.

PRIST, P. R. et al. Using different proxies to predict hantavirus disease risk in São Paulo state, Brazil. **Oecologia Australis**, v. 21, n. 1 Special Issue, p. 42–53, 2017a.

PRIST, P. R. et al. Climate change and sugarcane expansion increase Hantavirus infection risk. **PLoS Neglected Tropical Diseases**, v. 11, n. 7, 2017b.

RAMANAMANJATO, J.B.; GANZHORN, J.U. Effects of forest fragmentation, introduced *Rattus rattus* and the role of exotic tree plantations and secondary vegetation for the conservation of an endemic rodent and a small lemur in littoral forest of southeastern Madagascar. **Animal Conservation**, v.4, p. 175-183, 2001.

RIVERA-PEDROZA, L. F. et al. The role of natural vegetation strips in sugarcane monocultures: Ant and bird functional diversity responses. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 284, p. 106603, 2019.

RODRIGUES, G. S. S. C.; ROSS, J. L. S. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental**. Uberlândia: EDUFU, 2020.

ROSALINO, L. M. et al. Allometric relations of Neotropical small rodents (Sigmodontinae) in anthropogenic environments. **Zoological science**, v. 30, n. 7, p. 585-590, 2013.

ROSALINO, L. M. et al. Neotropical small mammals' diversity in the early cycle of commercial Eucalyptus plantations. **Agroforestry Systems**, v. 88, n. 3, p. 427-436, 2014.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para planejamento ambiental**. Oficina de Textos: São Paulo, 2006.

SABINO-SANTOS, G. et al. Serologic evidence of mammarenaviruses among wild rodents in Brazil. **Journal of Wildlife Diseases**, v. 52, n. 3, 2016.

SCHWARTZ, S. B. **Segredos internos: engenhos e escravos na sociedade colonial**. São Paulo: Companhia das Letras, 1988.

SIMONSEN, R. **História Econômica do Brasil**. 1500-1820. Brasília, DF: Senado Federal, 2005.

SOARES, V. C. N.; PEÑA, A. P. Ocorrência de mamíferos terrestres em canaviais no estado de Goiás, Brasil. **Bioikos**, v. 29, n. 1, p. 1-12, 2015.

SOULE, M. E.; SIMBERLOFF, D. **What do genetics and ecology tell us about the design of nature reserves?** *Biological Conservation*, v. 5, p. 759-778, 1986.

STEPHENS, P. R. et al. The macroecology of infectious diseases: a new perspective on global-scale drivers of pathogen distributions and impacts. *Ecology letters*, v. 19, p. 1159-1171, 2016.

STICKLER, C. M. et al. Defending public interests in private lands: compliance, costs and potential environmental consequences of the Brazilian Forest Code in Mato Grosso. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 368, n. 1619, p. 20120160, 2013.

STREICKER, D. G. et al. Host–pathogen evolutionary signatures reveal dynamics and future invasions of vampire bat rabies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, n. 39, 2016.

TAYLOR, L. H. et al. Risk factors for human disease emergence. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, v. 356, n. 1411, p. 983–989, 2013.

TJØRVE, E. How to resolve the SLOSS debate: lessons from species-diversity models. *Journal of Theoretical Biology*, v. 264, n. 2, p. 604-612, 2010.

UNICA - União da Indústria de cana-de-açúcar. Observatório da cana. Disponível em: <https://unica.com.br/sobre-a-unica/historico-e-missao/> Acesso em: junho de 2021.

VERDADE, L. M. et al. The Impacts of sugarcane expansion on wildlife in the state of São Paulo, Brazil. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, v. 2, p. 138-144, 2012.

VERDADE, L. M. et al. The conservation value of agricultural landscapes. In: VERDADE, L. M.; LYRA-JORGE, M. C.; PIÑA, C. I. [Eds.]. **Applied Ecology and Human Dimensions in Biological Conservation**. Springer-Verlag: Germany, p. 91-102, 2014a.

VERDADE, L. M.; LYRA-JORGE, M. C.; PIÑA, C. I. Redirections in conservation biology. In: VERDADE, L. M.; LYRA-JORGE, M. C.; PIÑA, C. I [Eds.]. **Applied Ecology and Human Dimensions in Biological Conservation**. Springer-Verlag: Germany, p. 3-17, 2014b.

VERDADE, L. M.; PIÑA, C.I.; ROSALINO, L.M. Biofuels and biodiversity: Challenges and opportunities. **Environmental Development**, v. 15, p. 64-78, 2015.

VERDADE, L. M.; GHELER-COSTA, C.; LYRA-JORGE, M.C. The multiple facets of agricultural landscapes. In: GHELER-COSTA, C. [Eds.]. **Biodiversity in Agricultural Landscapes of Southeastern Brazil**. De Gruyter: Berlin. p. 2-13, 2016.

VIEIRA, E.M.; PIZO, M.A.; IZAR, P. Fruit and seed exploitation by small rodents of the Brazilian Atlantic Forest. **Mammalia**, v.67, p.533-539, 2003.

WILKINSON, D. A. et al. Habitat fragmentation, biodiversity loss and the risk of novel infectious disease emergence. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 15, n. 149, 2018.

INSETOS-PRAGA NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Vinícius Fernandes Canassa¹⁷

1. Introdução

O setor sucroalcooleiro brasileiro desempenha um papel importante na economia do país, com destaque para produção de açúcar e fontes de bioenergia, especialmente o etanol. A cana-de-açúcar é considerada uma das alternativas para a produção de biocombustíveis e, atualmente, o aumento da demanda mundial por combustíveis provenientes de fontes renováveis, como o etanol, vem aumentando (OLIVEIRA, 2016). As condições edafoclimáticas favoráveis à cana-de-açúcar, aliadas às áreas cultiváveis, fizeram do Brasil o maior produtor mundial dessa *commodity* e o segundo em produção de etanol (CONAB, 2020).

Com o aumento de investimentos em novas usinas sucroalcooleiras para atender ao crescente uso de etanol em veículos *flex fuel*, a crescente demanda de açúcar por parte do mercado internacional e, conseqüentemente, o crescente aumento em áreas cultivadas (CORDELLINI, 2018), torna-se mais comum a presença de patógenos e insetos-pragas nas lavouras de cana-de-açúcar, causando redução na quantidade e qualidade da produção de açúcar e etanol produzidos, sendo os insetos-praga como a broca-da-cana-de-açúcar (*Diatraea saccharalis*) (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae), bicudo-da-cana-de-açúcar (*Sphenophorus levis*) (Vaurie, 1978) (Coleoptera: Curculionidae) e cigarrinha-das-raízes (*Mahanarva* spp.). (Hemiptera: Cercopidae) os grandes responsáveis pelas perdas no campo.

Diante do exposto, este capítulo tem como objetivo demonstrar, através de descrições e imagens, as principais características biológicas de três dos principais insetos-pragas presentes na cultura da cana-de-açúcar, bem como os principais danos ocasionados durante a alimentação de cada inseto.

¹⁷ Engenheiro Agrônomo, Dr., Docente da Faculdade Gran Tietê, vf.canassa@unesp.br

2. Principais insetos-praga na cultura da cana-de-açúcar

2.1. Broca-da-cana-de-açúcar, *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae)

2.1.1. Bioecologia

A broca-da-cana-de-açúcar, *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) é uma das pragas-chaves da cana-de-açúcar nas Américas (BOTELHO, 1992). No Brasil, o inseto ocorre em todas as regiões onde a planta é cultivada, alimentando-se não apenas da cana-de-açúcar, mas também do milho (*Zea mays* L.), do sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) e do arroz (*Oryza sativa* L.), causando prejuízos economicamente significativos (SOLIS; METZ, 2016).

O desenvolvimento de *D. saccharalis* é do tipo holometabólico, passando pelas fases de ovo, lagarta, pupa e adulto. Seu ciclo biológico depende da temperatura e pode variar de 4 a 12 dias na fase de ovo, de 20 a 90 dias no estágio larval, de 7 a 14 dias no pupal e de 3 a 15 dias no estágio adulto (PINTO et al., 2009). O ciclo completo do inseto varia de 53 a 60 dias, dependendo das condições climáticas. Esses insetos podem ter, ao longo do ano, de 4 a 5 gerações (PINTO et al., 2018) (Figura 1).

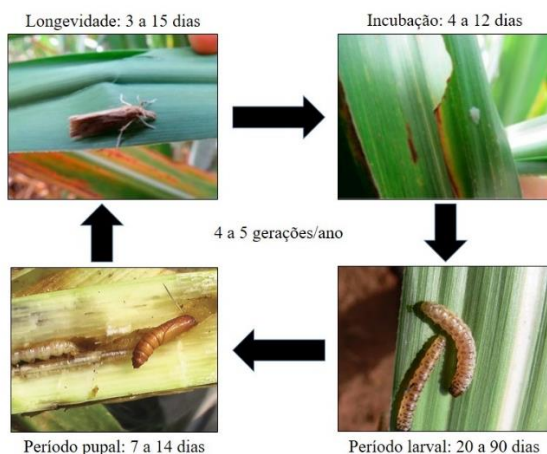


Figura 1. Ciclo de vida da broca-da-cana-de-açúcar, *Diatraea saccharalis*.
Imagens: Centro de Tecnologia Canavieira (editadas pelo autor).

Após emergirem, as fêmeas levam de um até dois dias para começar a ovipositar (MELO; PARRA, 1988). Ao longo da vida de adulto, cada fêmea deposita entre 300 e 780 ovos, colocando-os de forma agrupada (5 a 50 ovos por postura) (PARRA et al., 1999) nas folhas verdes, tanto na face superior como inferior do limbo foliar (HAMM et al., 2012). Baixas umidades causam ressecamento dos ovos, comprometendo, dessa forma, a sua sobrevivência (PINTO et al., 2006).

As lagartas, quando recém-eclodidas, alimentam-se do parênquima das folhas, convergindo, a seguir, para a bainha foliar, onde sofrem uma primeira ecdise e procuram a região mais tenra do colmo, onde penetram abrindo galerias transversais e longitudinais no interior dos colmos. Durante a fase larval, a lagarta passa por cinco a seis ínstaes (MELO; PARRA, 1988; BOTELHO; MACEDO, 2002), medindo, no final dessa fase, aproximadamente 25 mm e possui coloração amarelo-pálida e cápsula cefálica marrom (Figura 2). Ao se aproximar a fase de pupação, as larvas fazem um orifício para o exterior do colmo, fechando-o com fios de seda e serragem provinda de restos de sua alimentação. Entram, então, na fase de pupa, ainda no interior de sua planta hospedeira, e completam sua metamorfose (PINTO et. al, 2006).



Figura 2. Lagartas de *Diatraea saccharalis* (L2) iniciando alimentação no local de entrada no colmo da cana-de-açúcar (esquerda); orifício de entrada da broca-da-cana-de-açúcar (direita). Imagens: Centro de Tecnologia Canavieira.

Os adultos apresentam uma longevidade média de aproximadamente cinco a sete dias. A principal característica do adulto desta espécie é a coloração amarelo-parda das asas anteriores, com cerca de 25 mm de envergadura. As asas posteriores são esbranquiçadas. Apresentam dimorfismo sexual à medida que os machos são geralmente menores que as fêmeas, e possuem maior pigmentação nas asas e cerdas no último par de pernas (BOTELHO; MACEDO, 2002). Machos e fêmeas emergem em momentos distintos, sendo que os machos saem da fase pupal entre 2 e 5 dias antes das fêmeas. A longevidade dos adultos é de 8 a 16 dias, sendo as fêmeas mais longevas do que os machos (PINTO et al., 2018).

A *D. saccharalis* passa por quatro a cinco gerações por ano (MELO; PARRA, 1988), sendo a sua densidade populacional maior durante os meses de verão (CARBOGNIN, 2016), principalmente em virtude das condições climáticas mais favoráveis ao desenvolvimento da praga (PINTO et al., 2018). Os primeiros ataques ocorrem na fase de perfilhamento, após a formação dos primeiros entrenós basais, aproximadamente a partir do terceiro mês após o plantio ou corte da cana-de-açúcar.

A maior parte dos inseticidas químicos não tem apresentado resultados satisfatórios no controle desse inseto, pois o comportamento críptico dessa praga, que passa a maior parte da sua fase larval no interior do colmo, torna-a um alvo difícil para a maioria dos inseticidas (PAULI et al., 2018). Atualmente, 62 inseticidas são registrados para o controle de *D. saccharalis* em cana-de-açúcar no Brasil, dos quais 21 são oriundos de agentes biológicos (AGROFIT, 2020).

2.1.2. Danos causados pela broca-da-cana-de-açúcar

A *D. saccharalis* causa danos diretos e indiretos na cana-de-açúcar, sendo os primeiros caracterizados pelas construções de galerias no interior dos colmos, perda de peso do colmo, perfilhamento lateral, enraizamento aéreo e “coração-morto”, caracterizado pela morte da gema apical (DINARDO-MIRANDA et al., 2013). Os danos indiretos são provocados por fungos dos gêneros *Colletotrichum* sp. (Glomerellales:

Glomerellaceae) e *Fusarium* sp. (Hypocreales: Nectriaceae) que penetram os entrenós pelos orifícios abertos pela lagarta, causando infecções fúngicas, popularmente chamadas de podridão-vermelha e fusariose, respectivamente (DINARDO-MIRANDA et al., 2013). A infecção patogênica causa inversão de sacarose armazenada na planta, o que resulta em perda de produção no processo industrial, devido à contaminação do caldo que compromete a fermentação alcoólica e à dificuldade de cristalização do açúcar (DINARDO-MIRANDA et al., 2012) (Figura 3).



Figura 3. Detalhe da *Diatraea saccharalis* alimentando-se no interior do colmo de cana-de-açúcar e presença da podridão-vermelha na galeria de alimentação (esquerda); sintoma de coração morto em touceiras jovens de cana-de-açúcar após alimentação da *Diatraea saccharalis* (direita). Imagens: Centro de Tecnologia Canavieira.

Estima-se os danos causados pela praga através do índice de intensidade de infestação (I.I.I.), coletando-se 20 colmos por unidade amostral e abrindo-os longitudinalmente para contagem do número total de entrenós, assim como os entrenós brocados. O I.I.I. representa a porcentagem dos entrenós brocados em relação ao total de entrenós (PINTO, 2019). Dependendo da variedade da cana-de-açúcar, a média de perdas a cada 1% de I.I.I. é de 1,14% na produção agrícola, adicionando as perdas no processamento industrial de 0,42% na produção de açúcar e 0,21% na produção de etanol.

2.2. Bicudo-da-cana-de-açúcar (*Sphenophorus levis*) (Vaurie, 1978) (Coleoptera: Curculionidae)

2.2.1. Bioecologia

O gênero *Sphenophorus* está presente em vários continentes e compreende diferentes espécies que causam danos em diversas culturas de importância agrícola, especialmente gramíneas. Na América do Norte e na Ásia estão descritas 75 espécies, na África e Pacífico, 26 espécies, e na América do Sul, 18 espécies, dentre essas, 14 no Brasil (LEITE et al., 2005).

No Brasil, o bicudo-da-cana-de-açúcar (*Sphenophorus levis* - Coleoptera: Curculionidae) (Vaurie, 1978) foi detectado em 1977, sendo descrito como uma nova espécie em 1978 (VANIN, 1988) e inicialmente restrito à região de Piracicaba-SP. Entretanto, em 2010 constatou-se a presença do inseto em outros 124 municípios do estado de São Paulo, além de Minas Gerais, Paraná e Mato Grosso do Sul (MORAES; ÁVILA, 2013).

No Brasil ocorrem duas gerações anuais da praga em épocas bem definidas (PRECETTI; ARRIGONI, 1990). Os adultos apresentam dois picos populacionais no ano, sendo o principal nos meses de fevereiro e março, enquanto o pico menor ocorre entre os meses de outubro e novembro. As larvas ocorrem em maior intensidade nos meses de junho e julho e, em menor número, em dezembro (DEGASPARI et al., 1987). Em razão das larvas serem as responsáveis pelos danos à cultura, os maiores ataques às plantas ocorrem de maio a novembro (ALMEIDA; STINGEL 2005). O bicudo-da-cana-de-açúcar tem capacidade restrita de voo, com duração de duas horas, tendo baixa capacidade de dispersão. Desse modo, seu deslocamento realiza-se por caminharmento, caracterizando a presença do inseto e os danos às plantas em reboleiras (LEITE et al., 2005).

Os adultos apresentam coloração castanho-escuro, com manchas pretas no dorso do tórax e listras longitudinais nos élitros. Machos (7,70 a 11,20 mm) e fêmeas (10,50 a 13,30 mm) podem ser diferenciados pelo tamanho (PRECETTI; ARRIGONI, 1990). Em ambientes controlados (T=

27 a 30°C e fotofase de 12 horas), o ciclo biológico de *S. levis* varia de 50 a 307 dias, sendo a média de 173,2 dias (DEGASPARI et al., 1987). Os adultos apresentam hábito noturno, são pouco ágeis e, quando manipulados, simulam estar mortos (PINTO et al., 2006). O acasalamento ocorre em qualquer horário do dia e o período ótimo para reprodução e acasalamento é de 21 a 35 dias após a emergência (BARRETO-TRIANA, 2009).

As fêmeas perfuram as cascas dos colmos e os perfilhos com as mandíbulas e, em seguida, depositam os ovos próximos ao nível do solo. Ao longo do ciclo, as fêmeas ovipositam de 40 a 70 ovos (DEGASPARI et al., 1987; PRECETTI; ARRIGONI, 1990). Os ovos apresentam coloração branco-leitosa no momento da postura e escurecem à medida que a eclosão das larvas se aproxima. O período de incubação varia de 7 a 14 dias e a viabilidade é de 47,16% (DEGASPARI et al., 1987).

As larvas recém-eclodidas possuem coloração branco-leitosa e se tornam amareladas conforme seu desenvolvimento. A coloração da cabeça é castanho-avermelhada e as mandíbulas são bem desenvolvidas, além de apresentarem espiráculos visíveis no abdome (PRECETTI; ARRIGONI, 1990). São ápodas e se locomovem apoiando-se nas paredes das galerias abertas durante a alimentação (DEGASPARI et al., 1987). O estágio larval varia de 30 a 60 dias (PRECETTI; ARRIGONI, 1990), com viabilidade de 93,5% (DEGASPARI et al., 1987). As larvas, ao se aproximarem do completo desenvolvimento, ampliam a galeria, a fim de preparar a câmara pupal, e cessam seus movimentos e alimentação, passando ao estágio pupal (DEGASPARI et al., 1987).

A coloração das pupas no início do estágio é branco-leitosa e, conforme a emergência do adulto vai se aproximando, adquirem coloração castanha. As pupas podem ser encontradas dentro de casulos feitos com serragem fina. O período pupal, em condições de laboratório varia de 5 a 13 dias, sendo a média de 10,5 dias (DEGASPARI et al., 1987) (Figura 4).

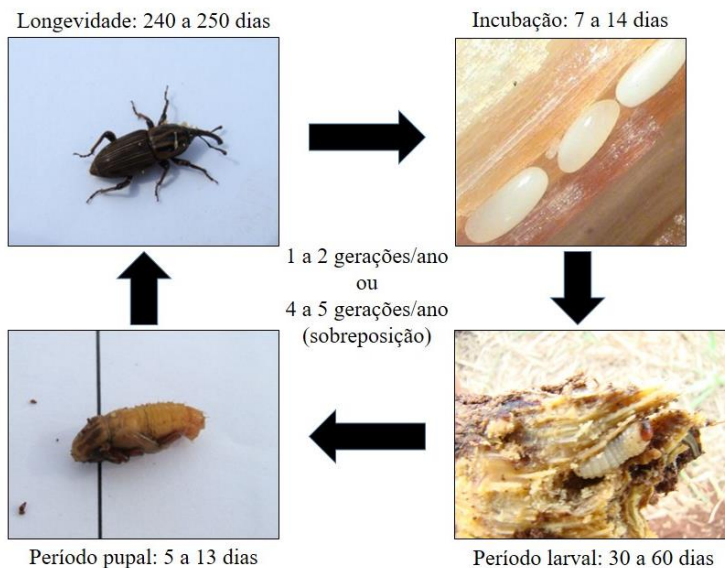


Figura 4. Ciclo de vida do bicudo-da-cana-de-açúcar (*Sphenophorus levis*). Imagens: autor e Centro de Tecnologia Canavieira (editadas pelo autor).

2.2.2. Danos causados pelo bicudo-da-cana-de-açúcar

Os danos podem ser verificados abaixo do nível do solo e na base das brotações. São causados pelas larvas, que atacam a porção basal das plantas, onde iniciam a construção de galerias nos colmos, causando a morte das touceiras (DINARDO-MIRANDO et al., 2006). As galerias podem ser circulares ou longitudinais, a altura média das galerias no interior dos colmos é de 7,5 cm de comprimento e a altura máxima observada acima do nível do solo é de 21 cm de comprimento (Figura 5).



Figura 5. Detalhe da touceira de cana-de-açúcar com sintoma de ataque de *Sphenophorus levis* em área comercial (esquerda). Detalhe da touceira de cana-de-açúcar morta após alimentação de larvas de *Sphenophorus levis* (direita). Imagens do autor.

Os danos diretos causados pelas larvas aos tecidos dos colmos ocorrem principalmente nas épocas mais secas do ano (junho a agosto), levando à morte das touceiras e, conseqüentemente, falhas na rebrota, o que promove, ainda, danos indiretos, como o aumento no número de plantas invasoras que competem com a cultura (DINARDO-MIRANDA et al., 2006). O ataque dos perfilhos acarreta o secamento progressivo das folhas externas, que pode ser confundido com fitotoxicidade causada por herbicidas, efeito da seca prolongada, dano mecânico por ferramentas ou aplicação excessiva de vinhaça (Figura 6).



Figura 6. Detalhe da larva de *Sphenophorus levis* alimentando-se no interior do colmo da cana-de-açúcar (esquerda); detalhe do dano causado pela larva *Sphenophorus levis* na região do colo da touceira (direita). Imagens do autor.

Os danos diretos e indiretos do ataque das larvas de *S. levis* podem causar a diminuição da produtividade e longevidade do canavial, resultando, conseqüentemente, na redução da produção em tonelada de

cana-de-açúcar por hectare, chegando a atingir 50 a 60% dos perfilhos ainda na cana-planta e ocasionando perdas de 20 a 30 ton ha ano⁻¹ (DEGASPARI et al., 1987; DINARDO-MIRANDA et al., 2006).

2.3. Cigarrinha-das-raízes, *Mahanarva* spp. (Hemiptera: Cercopidae)

2.3.1. Bioecologia

A cigarrinhas-das-raízes (*Mahanarva* spp. - Hemiptera: Cercopidae) representa uma importante praga agrícola da cultura da cana-de-açúcar (DINARDO-MIRANDA, 2014). O gênero foi relatado desde os Estados Unidos até o sudeste do Brasil (PECK et al., 2004) e pode ser responsável por perdas de até 44,8% na produtividade agrícola (DINARDO-MIRANDA et al., 2001) e na qualidade da matéria-prima, com reduções de até 30% no teor de sacarose (DINARDO-MIRANDA et al., 2000).

A mudança do sistema de colheita da cana-de-açúcar manual com a queima da palha para o mecanizado favoreceu o inseto, permitindo a não eliminação. A palha contribui para a manutenção da umidade do solo, para a sobrevivência de ovos em diapausa no inverno e, consequente, para o aumento populacional (DINARDO-MIRANDA, 2003; DINARDO-MIRANDA, 2004). Em decorrência do aumento da colheita mecanizada nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, a quantidade de matéria seca depositada na superfície do solo aumentou consideravelmente, alterando o perfil de insetos-praga da cultura, principalmente na composição das diferentes espécies e densidades populacionais (DINARDO-MIRANDA, 2002). Dessa maneira, em um curto espaço de tempo, a cigarrinha-das-raízes tornou-se praga-chave da cultura (MACEDO et al., 1997). O principal fator que beneficiou o inseto nesse novo ambiente foi a maior quantidade de raízes superficiais, que proporcionou mais locais de alimentação para as ninfas. A palha, além de conferir maior proteção das formas imaturas contra o ressecamento, também mantém a temperatura mais estável e eleva a umidade do solo, o que favorece o desenvolvimento deste inseto (DINARDO-MIRANDA, 2003).

A principal espécie de cigarrinha-da-raiz relatada na região centro-sul do país é *M. fimbriolata* (DINARDO-MIRANDA, 2014) e foi relatada com este único nome até recentemente. Entretanto, já existem relatos da ocorrência de espécies de *M. spectabilis* (Distant, 1909) e *M. litura* (Le Peletier e Serville, 1825) em estados da mesma região (ALVES; CARVALHO, 2014; DINARDO-MIRANDA, 2014).

Nos últimos 10 anos, verifica-se que a espécie *M. fimbriolata* é a menos comum nos canaviais brasileiros e muitos trabalhos científicos a citam como única espécie de cigarrinha-das-raízes como praga da cana-de-açúcar (ALVES; CARVALHO, 2014; DINARDO-MIRANDA, 2014). No entanto, a confirmação da espécie deve ser feita através do teste de Proteína C-Reativa (PCR) nas populações de cigarrinha-das-raízes em estudo ou tratá-las como complexo de espécies.

A cigarrinha-das-raízes passa por três estágios biológicos, apresentando desenvolvimento hemimetabólico (TERÁN, 1987). Os ovos são pouco visíveis a campo, pois são diminutos e ovipositados em locais protegidos no solo. São de coloração amarela e medem aproximadamente 1 mm de comprimento (TERÁN, 1987). O período de incubação quando os ovos não estão em diapausa varia de 15 a 25 dias.

As ninfas, ao eclodirem, deslocam-se para as raízes e radículas da planta para se alimentar e permanecem assim durante todo o período de desenvolvimento, que pode durar 20 a 70 dias, dependendo das condições microclimáticas do ambiente do solo e da espécie de cigarrinha (STINGEL, 2005). As ninfas medem 1 mm de comprimento ao eclodirem e atingem cerca de 10 mm de comprimento, após passarem por cinco instares (TERÁN, 1987). A ninfa das cigarrinhas-das-raízes fica envolta por uma espuma formada pelos líquidos eliminados pelo ânus e por substâncias expelidas pelas glândulas hipodérmicas localizadas nos 7º e 8º urômeros, denominadas de glândulas de “Bateli”. Esse aspecto de espuma é devido às bolhas de ar formadas pelo canal respiratório localizado na região ventral da ninfa e se espalha por todo o corpo do inseto por movimentos circulares na extremidade do abdome (FEWKES, 1969) (Figura 7). A espuma deixa de ser produzida pouco antes da última ecdise

e forma uma cavidade no interior em função da evaporação do líquido, quando a ninfa passa para a fase adulta (GUAGLIUMI, 1973). A espuma é citada como proteção das ninfas contra dessecação e contra inimigos naturais (GUAGLIUMI, 1973).



Figura 7. Touceira de cana-de-açúcar com presença de espuma de *Mahanarva* spp. removida do campo (esquerda). Ninfas de *Mahanarva* spp. alimentando-se das raízes da cana-de-açúcar (direita). Imagens do autor.

Os adultos podem variar de 11 a 13 mm de comprimento, sendo as fêmeas maiores que os machos (GUAGLIUMI, 1973), e apresentam pernas posteriores adaptadas para saltar, utilizando esse recurso para o deslocamento entre plantas. Os adultos são encontrados na parte aérea das plantas e se alimentam da seiva das folhas e das partes verdes do colmo (GUAGLIUMI, 1973). O acasalamento ocorre a qualquer hora do dia (FEWKES, 1969) e se inicia poucas horas após a emergência dos adultos (FREIRE et al., 1968). Na época úmida do ano, as fêmeas têm as touceiras das plantas, bainhas secas e até o solo próximo aos colmos como substratos para oviposição, podendo uma fêmea colocar de 120 a 147 ovos (FREIRE et al., 1968; GUAGLIUMI, 1973). A longevidade média dos adultos varia de 8 a 23 dias (FREIRE et al., 1968; GARCIA, 2002) (Figura 8).

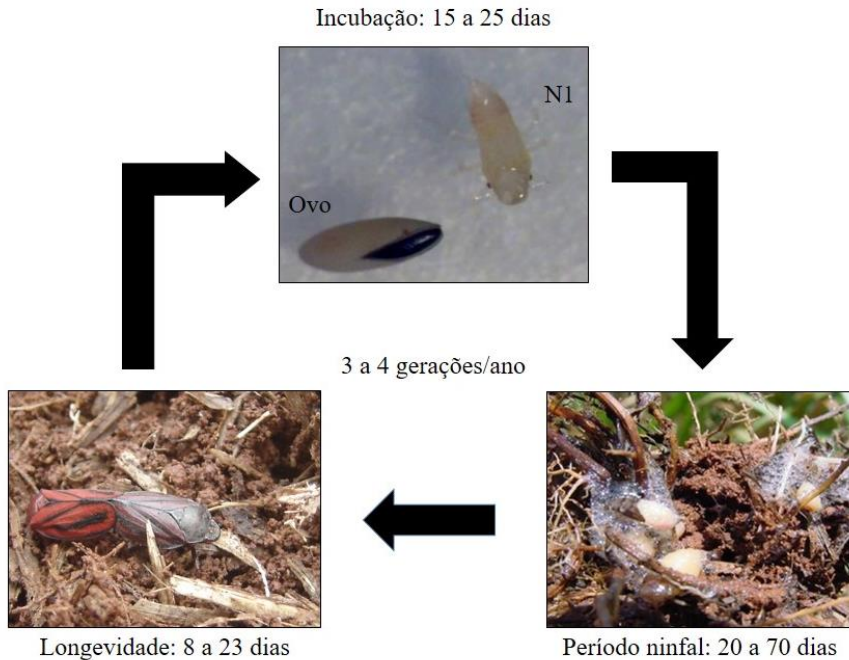


Figura 8. Ciclo de vida da cigarrinha-das-raízes (*Mahanarva* spp.).
Imagens: Centro de Tecnologia Canavieira (editada pelo autor).

2.3.2. Danos causados pelo bicudo-da-cana-de-açúcar

Os adultos das cigarrinhas-das-raízes têm preferência por introduzir o estilete através dos estômatos e assim atingir o xilema nos feixes vasculares (GARCIA, 2002). No momento da sucção de seiva ocorre a injeção de enzimas e aminoácidos juntamente com a saliva, o que facilita a quebra da estrutura da seiva e, conseqüentemente, a assimilação dos nutrientes pelo inseto (MENDONÇA et al., 1996). Estas substâncias destroem os cloroplastos, entopem vasos do xilema e causam a morte dos tecidos (GUAGLIUMI, 1973). Desta forma, os sintomas são caracterizados pela necrose do local da alimentação e pela formação de manchas longitudinais cloróticas, que podem provocar morte das folhas (Figura 9). Com isso há redução da área foliar com interrupção do fluxo de seiva, levando à diminuição do armazenamento da sacarose no colmo (GUAGLIUMI, 1973).



Figura 9. Folhas de cana-de-açúcar com sintoma de estrias cloróticas após a alimentação do adulto de *Mahanarva* spp. (esquerda). Detalhe da folha de cana-de-açúcar com sintomas mais severos (estrias avermelhadas e necrose) após a alimentação do adulto de *Mahanarva* spp. Imagens: Centro de Tecnologia Canavieira – CTC.

As ninfas se alimentam por meio da sucção de seiva do floema (GARCIA, 2002). Desta forma, há uma destruição dos tecidos dos vasos condutores e morte das raízes. O fluxo de água e nutrientes do solo que deveria ir para a parte aérea das plantas é bloqueado. Assim, as plantas apresentam desidratação, folhas amareladas e secas, entrenós mais curtos e os colmos finos, ocos e enrugados (DINARDO-MIRANDA, 2014).

Os danos causados pela cigarrinha-das-raízes podem afetar tanto a produtividade agrícola como a qualidade da matéria prima que chega na indústria. A menor produtividade é decorrente do murchamento de colmos, entrenós mais curtos e brotação de gemas laterais, além da morte de perfilhos e colmos (DINARDO-MIRANDA, 2014) (Figura 10). Na qualidade da matéria prima, reduzem, por exemplo, a quantidade e qualidade do açúcar recuperável, além de elevar o teor de fibras e impurezas (MACEDO et al., 1997). Na produtividade agrícola, as reduções variam de 23,6 a 72%. A qualidade da matéria prima também é afetada, com reduções de até 30% da sacarose (DINARDO-MIRANDA et al., 2000).



Figura 10. Detalhe de colmos de cana-de-açúcar saudáveis e com sintoma de murchamento ocasionado após a alimentação de ninfas da cigarrinha-das-raízes. Imagens do autor.

3. Considerações finais

A correta identificação das espécies de insetos-praga é um dos pilares preconizados do Manejo Integrado de Pragas (MIP), que, através do reconhecimento de seus danos às plantas, pode auxiliar produtores e acadêmicos em seu reconhecimento. Por meio da identificação e monitoramento desses insetos a campo, podemos recomendar um método de controle adequado, baseado nos níveis de ação avaliados. Apesar de serem encontrados outros insetos-pragas de importância econômica na cultura da cana-de-açúcar, tais como *Telchin licus* (Drury, 1773) (Lepidoptera: Castniidae) e *Migdolus fryanus* (Westwood, 1863) (Coleoptera: Cerambycidae), este capítulo traz informações relevantes sobre biologia e danos de *D. saccharalis*, *S. levis* e *Mahanarva* spp. que podem ser consultados através de meios eletrônicos por produtores, acadêmicos e pesquisadores.

4. Referências bibliográficas

AGROFIT – **Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários**. Disponível em < http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons >. Acesso em: 12 mai. 2021.

ALMEIDA, L.C; STINGEL, E. **Curso de monitoramento e controle de praga da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira, 2005. 32p.

ALVES, R. T.; CARVALHO. G. S. Primeiro registro das espécies de cigarrinhas-da-raiz da cana-de-açúcar *Mahanarva spectabilis* (Distant) e *Mahanarva liturata* (Le Peletier & Serville) atacando canaviais na região de Goianésia (GO), Brasil. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 81, n. 1, p. 83-85, 2014.

BARRETO-TRIANA, N. **Comportamento sexual e reprodutivo de *Sphenophorus levis* Vaurie, 1978 (Coleoptera: Curculionidae) em cana-de-açúcar**. 2009. 97 f. Tese (Doutorado) – Programa em entomologia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba, Brasil, 2009.

BOTELHO, P. S. M. Quinze anos de controle biológico da *Diatraea saccharalis* utilizando parasitoides. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 27, n. 13, p. 255-262, 1992.

BOTELHO, P. S. M.; MACEDO, N. *Cotesia flavipes* para o controle de *Diatraea saccharalis*. In: PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; BENTO, J. M. S. (Orgs.). **Controle biológico no Brasil: parasitoides e predadores**. São Paulo: Manole, 2002. p. 409-425.

CARBOGNIN, E. R. **Modelos de previsão de ocorrência de adultos de *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2016. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Programa em Entomologia Agrícola, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Jaboticabal, Brasil, 2016.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim da Safra de Cana-de-Açúcar, Safra 2020/2021**, v. 7, n. 2, 2020.

CORDELLINI, D. F. O etanol na estrutura dos biocombustíveis no Brasil. **Revista FAE**, v. 21, n.1, p.19-35, 2018.

DEGASPARI, N.; BOTELHO, P. S.; ALMEIDA, L. C.; CASTILHO, H. J. Biologia de *Sphenophorus levis* (Vaurie, 1978) (Coleoptera: Curculionidae) em dieta artificial e no campo. **Pesquisa Agropecuária do Brasil**, Brasília, v. 22, n. 6, p. 556-558, 1987.

DINARDO-MIRANDA, L. L. **Cigarrinha-das-raízes em cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2003.

DINARDO-MIRANDA, L. L. Cigarrinha-das-raízes em cana-de-açúcar. In: SALVADORI, J. R.; ÁVILA, C. J.; SILVA, M. T. B. (Orgs.). **Pragas de solo no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa, 2004. p. 495-516.

DINARDO-MIRANDA, L. L. **Nematoides e pragas da cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2014.

DINARDO-MIRANDA, L. L. O papel da retirada da palha no manejo da cigarrinha das raízes. **Revista STAB**, v. 20, n. 5, p. 23, 2002.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; FERREIRA, J. M. G.; DURIGAN, A. M. P. R.; BARBOSA, V. Eficiência de inseticidas e medidas culturais no controle de *Mahanarva fimbriolata* em cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 18, n. 3, p. 34-6, 2000.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; FRACASSO, J. V.; ANJOS, I. A.; COSTA, V. P. Influência da infestação de *Diatraea saccharalis* (Fabr.) sobre parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 71, n. 3, p. 342-345, 2012.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; FRACASSO, J. V.; CABRAL, S. B.; VALÉRIO, W.; GONÇALVES, R. D.; BELTRAME, J. A. Eficiência de inseticidas aplicados em soqueiras de cana-de-açúcar no controle de *Sphenophorus levis*. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 24, n. 5, p. 34-37, 2006.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; FRACASSO, J. V.; COSTA, V. P.; ANJOS, I. A.; LOPES, D. O. P. Reação de cultivares de cana-de-açúcar à broca do colmo. **Bragantia**, v. 72, n. 1, p. 29-34, 2013.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; GARCIA, V.; COELHO, A. L. Eficiência de inseticidas no controle da cigarrinha das raízes, *Mahanarva fimbriolata*, em cana-de-açúcar. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 20, n. 1, p. 30-33, 2001.

FEWKES, D. W. The biology of sugarcane froghoppers. In: WILLIAMS, J. R.; METCALFE, J. R.; MUNGOMERY, R. W.; MATHES, R. (Orgs.). **Pests of sugarcane**. Amsterdam: Elsevier Publishing, 1969. p. 283-307.

FREIRE, A. M.; SOUTO, C. E. R.; MARQUES, E. J. Combate biológico das cigarrinhas da cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, v. 71, n. 4, p. 41-44, 1968.

GARCIA, J. F. **Técnica de criação e tabela de vida de *Mahanarva fimbriolata* (Stal, 1854) (Hemiptera: cercopidae)**. 2002. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Programa em entomologia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba, Brasil, 2002.

GUAGLIUMI, P. Cigarrinha da raiz. In: GUAGLIUMI, P. (Org.). **Pragas da cana-de-açúcar**. Nordeste do Brasil. Rio de Janeiro: IAA, 1973. p. 69-103.

HAMM, J. C.; SIDHU, J. K.; STOUT, M.; HUMMEL, N. A.; REAGAN, T. E. Oviposition behavior of *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) on different rice cultivars in Louisiana. **Environmental Entomology**, v. 41, n. 3, p. 571-577, 2012.

LEITE, L. G.; BATISTA FILHO, A.; GINARTI, A. M. A.; TAVARES, F. M.; ALMEIDA, L. C.; BOTELHO, P. S. M. Alternativa de controle: Bicudo da cana-de-açúcar. **Revista Cultivar**, Pelotas, n. 83, p. 40-43, 2005.

MACEDO, N.; CAMPOS, M. B. S.; ARAUJO, J. R. Insetos nas raízes e colo da planta, perfilhamento e produtividade em canaviais colhidos com e sem queima. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 15, n. 3, p. 18-21, 1997.

MELO, A. B. P.; PARRA, J. R. P. Exigências térmicas e estimativa do número de gerações anuais da broca-da-cana-de-açúcar em quatro localidades canavieiras de São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 23, n. 7, p. 691-696, 1988.

MENDONÇA, A. F.; BARBOSA, G. F. S.; MARQUES, J. E. As cigarrinhas da cana-de-açúcar (Hemiptera: Cercopidae) no Brasil. In: MENDONÇA, A. F. (Org.). **Pragas da cana-de-açúcar**. Maceió: Edição do autor, 1996. p.171-192.

MORAES, G. C.; ÁVILA, C. J. *Sphenophorus levis* detected in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Agricultural Science Research Journals**, v. 3, n. 1, p. 36-37, 2013.

OLIVEIRA, E. C. Brazilian sugarcane sector: an economic and environmental approach. **Latin american journal management for sustainable development**, v.3, n.1, p. 35-46, 2016.

PARRA, J. R. P.; MILANO, P.; CÔNSOLI, F.L.; ZÉRIO, N.G.; HADDAD, M. L. Efeito da nutrição de adultos e da umidade na fecundidade de *Diatraea saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Crambidae). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 28, n. 1, p. 49-57, 1999.

PAULI, G.; MASCARIN, G. M.; EILENBERG, J.; DELALIBERA JÚNIOR, I. Within-host competition between two entomopathogenic fungi and a granulovirus in *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae). **Insects**, v. 9, n. 64, p. 1-11, 2018.

PECK, D. C.; MORALES, A.; CASTRO, U. Alternative methods for rearing grassfeeding spittlebugs (Hemipeta: Cercopidae). **Neotropical Entomology**, v. 33, n. 3, p. 307-314, 2004.

PINTO, A. S. Sucesso do controle biológico de pragas da cana-de-açúcar. **Informe Agropecuário**, v. 40, n. 305, p. 57-65, 2019.

PINTO, A. S.; BOTELHO, P. S. M.; OLIVEIRA, H. N. **Guia ilustrado de pragas e insetos benéficos da cana de açúcar**. Piracicaba, 2009.

PINTO, A. S.; GARCIA, J. F.; OLIVEIRA, H. N. Manejo das principais pragas da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Orgs.). **Atualização em Produção de Cana-de-Açúcar**. Piracicaba: Fealq, 2006, p. 257–280.

PINTO, A. S.; RODRIGUES, L. R.; OLIVA, M. B. **Uso de armadilhas de feromônio para a broca-da-cana, *Diatraea* spp. em canaviais**. Piracicaba: Occasio, 2018.

PRECETTI, A.A.C.M.; ARRIGONI, E.B. **Aspectos bioecológicos e controle do besouro *Sphenophorus levis* Vaurie, 1978 (Coleoptera: Curculionidae) em cana-de-açúcar**. São Paulo: Copersucar, 1990.

SOLIS, M. A.; METZ, M. A. An illustrated guide to the identification of the known species of *Diatraea* Guilding (Lepidoptera: Crambidae: Crambinae) based on genitalia. **ZooKeys**, v. 565, n. 1, p. 73-121, 2016.

STINGEL, E. **Distribuição espacial e plano de amostragem para a cigarrinha-das-raízes, *Mahanarva fimbriolata* (Stål, 1954), em cana-de-açúcar**. 2005. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Programa em entomologia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba, Brasil, 2005.

TERÁN, F. O. Pragas da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Org.). **Cana-de-açúcar cultivado e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 2, p. 601-6

VANIN, S. A. **A new species of *Sphenophorus* Schoenher from Brazil (Coleoptera, Curculionidae, Rhynchophorinae)**. São Paulo: Departamento de Zoologia, Instituto de Biociências - USP, 1988.

MICRORGANISMOS NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Daniele Scudeletti¹⁸

Elisa Fidêncio de Oliveira¹⁹

Erilene Romeiro Alves²⁰

1. Introdução

O Brasil é um dos principais produtores mundiais de cana-de-açúcar, cultura com importância para o agronegócio brasileiro, devido à produção de açúcar, etanol e bioeletricidade. É considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis, graças aos seus subprodutos, que auxiliam na redução dos custos de produção e contribuem para a sustentabilidade da atividade (CONAB, 2017).

A primeira estimativa da safra 2021/22 da área cultivada com cana-de-açúcar é de cerca de 8.422,8 mil hectares colhidos neste ciclo, indicando diminuição percentual de 2,2% (193,3 mil hectares) em relação à safra passada (2020/21). O mesmo ocorre para a produção de cana-de-açúcar, cuja estimativa é de que sejam colhidos 628,1 milhões de toneladas, representando um volume 4% menor (CONAB, 2021).

A perspectiva de redução é devido à grande concorrência de cultivos anuais, como soja e milho, que adquiriram ótima rentabilidade e podem influenciar diretamente na destinação da área para cana-de-açúcar. Além disso, as condições climáticas não favoráveis, principalmente no que se refere às precipitações e à regularidade de distribuição das chuvas e oscilações durante o ciclo, impactam o potencial produtivo em consequência do déficit hídrico em algumas localidades, prejudicando os potenciais produtivos. Com isso, espera-se que haja redução na produtividade média de colmos em uma comparação com a safra anterior, podendo ficar em torno de 74 t ha⁻¹ (diminuição de 1,8%) (CONAB, 2021).

¹⁸ Engenheira Agrônoma, Dra., Desenvolvimento Técnico de Mercado – BIOTROP, daniele.scudeletti@hotmail.com

¹⁹ Engenheira Agrônoma, Dra., elisa_oliveiraagro@hotmail.com

²⁰ Engenheira Agrônoma, Dra., erilene.romeiro@hotmail.com

Contudo, há uma grande demanda pelo aumento da produção agrícola em consequência do crescimento populacional acelerado e contínuo nas próximas décadas, o que deve elevar o consumo de alimentos em geral. De acordo com a ONU (2012), a população mundial em 2024 será superior a 8 bilhões de pessoas e, em 2050, superior a 9,5 bilhões. Esse aumento representa um crescimento de 34,90% entre 2012 e 2050. Além do aumento populacional e da consequente necessidade de aumento da produção de alimentos, existe a preocupação de como esses alimentos serão produzidos, principalmente no que se refere ao uso de fertilizantes e pesticidas sintéticos, sendo este um grande desafio na atualidade.

O uso de novas tecnologias e a grande demanda por tecnologias sustentáveis, como o uso de microrganismos na produção, tem-se destacado nos últimos anos. O mercado de biofertilizantes, por exemplo, tem aumentado ano após ano. Em uma estimativa realizada pelos Estados Unidos, a demanda do mercado de biofertilizantes em 2016 foi de 162.5 kg ton⁻¹, em 2017 o valor chegou a 224.7 kg ton⁻¹ e estima-se que, para o ano de 2027, esse mercado praticamente dobre de tamanho (BIOFERTILIZERS MARKET SIZE, 2020).

As interações entre plantas e microrganismos são conhecidas há muito tempo, principalmente no que se refere ao conceito da formação de lesões nos tecidos vegetais. No entanto, estudos têm mostrado que esse conceito depende dos microrganismos e sua interação, com aspectos positivos em relação ao seu uso, abrindo novas perspectivas para o estudo da interação planta/microrganismo (EMBRAPA, 2020).

A utilização de microrganismos tem diversos efeitos e mecanismos de ação na planta, como: regulação da produção de hormônios (BHARDWAJ et al., 2014; XIE et al., 2016), solubilização de nutrientes na solução do solo (SINGH et al., 2015; RASHID et al., 2016; SANTOYO et al., 2016; SHAMEER; PRASAD, 2018), indução de resistência contra patógenos (DINARDO-MIRANDA et al., 2003; BARROS et al., 2000), resistência a estresse hídrico (GOWTHAM et al., 2020; SCUDELETTI et al., 2021; TIWARI et al., 2018; SINGH et al., 2019) e promoção de crescimento vegetal (MORETTI et al., 2020; SCUDELETTI et al., 2021),

podendo reduzir os custos de produção, aumentando a produtividade e a rentabilidade no agronegócio (MORETTI et al., 2020, OLIVEIRA et al., 2006; SCHULTZ et al., 2012, 2014, MENDES et al., 2011; COLEMAN-DERR; TRINGE, 2014; COMPANT et al., 2010; SANTI FERRARA et al., 2012).

Com a crescente preocupação com a segurança alimentar e a busca por uma produção mais sustentável, o uso de microrganismos em práticas de manejo das culturas tem mostrado grandes resultados, o que deve impulsionar ainda mais o mercado de microrganismos no mundo todo.

2. Efeitos da utilização dos microrganismos em cana-de-açúcar e seu modo de ação

Nas últimas décadas, diversas pesquisas se voltaram para o potencial de microrganismos, como fungos e bactérias, na promoção do crescimento e desenvolvimento de plantas. Neste contexto, a importância do desenvolvimento de novas tecnologias e a utilização de microrganismos benéficos à agricultura se apresentam como alternativas eficientes, sustentáveis e financeiramente viáveis (KHAN et al., 1997).

Para a agricultura, os microrganismos considerados benéficos são aqueles capazes de fixar o nitrogênio atmosférico, decompor resíduos culturais favorecendo a ciclagem de nutrientes, suprimir doenças de plantas e patógenos transmitidos pelo solo e produzir compostos bioativos, como hormônios e os solubilizadores de fosfatos (SINGH et al., 2008).

Diversos microrganismos vêm sendo estudados e aplicado nas culturas. Com base nisso, a tabela abaixo mostra os microrganismos mais utilizados em cana-de-açúcar.

Tabela 1. Microrganismos mais utilizados em cana-de-açúcar.

Microrganismo	Classificação	Modo de ação	Referências
<i>Azospirillum</i> sp	Bactéria	FBN	Okon et al., 1983; Matoso et al., 2021; Martins et al., 2020
		Estresse hídrico	Moutia et al., 2010
		Hormonal	Tien et al., 1979; Bashan; Levanony, 1990; Spaepen; Vanderleyden 2015
<i>Bacillus</i> sp	Bactéria	FBN	Araújo et al., 2005
		Controle biológico	Ali et al., 2014; Hanif et al., 2015; Oslizlo et al., 2015
		Hormonal – ácido indolbutírico (AIB)	Araújo et al., 2005
		Estresse hídrico	Suman et al., 2016
<i>Trichoderma</i> sp	Fungo	Estresse hídrico	Scudeletti et al., 2021

2.1 Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN) e ação hormonal

O nitrogênio é constituinte indispensável para a adequada nutrição das plantas, pois está presente na composição das mais importantes biomoléculas (ATP, NADH, NADPH, clorofila, proteínas e inúmeras enzimas) (MIFLIN; LEA, 1976; HARPER, 1994). Na agricultura, esse elemento é determinante na produção das culturas, sendo um dos nutrientes que mais participa do sistema de produção agrícola. O suprimento do N ao solo se faz necessário para aumentar a absorção e utilização do nutriente, levando, conseqüentemente, à obtenção de maiores produtividades.

Na cana-de-açúcar, o nitrogênio é o segundo macronutriente exigido em maior quantidade, depois do potássio (SPIRONELLO et al., 1996). Grandes quantidades de nitrogênio são demandadas anualmente, via fertilização artificial. Uma alternativa ao uso de adubos químicos é o uso de microrganismos, como bactérias fixadoras de nitrogênio (FBN). Esses microrganismos são normalmente utilizados como inoculantes ou biofertilizantes. Os únicos seres vivos capazes de converter o N-atmosférico em N-combinado são as bactérias conhecidas como diazotróficas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). O metabolismo dessas

bactérias produz um complexo enzimático denominado nitrogenase, que atua na redução do N atmosférico em amônio assimilável pelas plantas (VITOUSEK et al., 2013).

As rizobactérias têm como característica a correlação com a produção de auxinas (PRINSEN et al., 1993; SPAEPEN; VANDERLEYDEN, 2015), citocininas (TIEN et al., 1979), giberelinas (BOTTINI et al., 1989), etileno (STRZELCZYK et al., 1994) e outros reguladores de crescimento de plantas, como o ácido abscísico (COHEN et al., 2008; COHEN et al., 2015), o óxido nítrico (CREUS et al., 2005) e as poliaminas, como a espermidina, a espermina e a diamina cadaverina (CASSAN et al., 2009). Os microrganismos também apresentam papel importante na mineralização da matéria orgânica (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006) e na solubilização de fosfatos (MASSENSINI et al., 2015), favorecendo a liberação dos nutrientes ao solo e a assimilação destes pelas raízes das plantas.

Azospirillum sp. é um dos gêneros de bactérias mais estudados quando se refere ao crescimento vegetal. Este microrganismo é capaz de colonizar mais de cem espécies de plantas, com efeito no crescimento, desenvolvimento e, principalmente, no aumento da produtividade no campo (BASHAN; DE-BASHAN, 2010). O primeiro mecanismo proposto para explicar a capacidade do *Azospirillum* sp. de promover o crescimento da planta foi a fixação do nitrogênio biológico (OKON et al., 1983). Outro mecanismo tem sido relacionado à sua capacidade de produzir e metabolizar vários fitormônios e outras moléculas reguladoras do crescimento das plantas (TIEN et al., 1979; BASHAN; LEVANONY, 1990).

Estima-se que a contribuição da FBN para a nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar no Brasil pode contribuir com pelo menos 40 kg ha⁻¹ de N (URQUIAGA et al., 2012). Os autores conduziram experimento utilizando o método de diluição isotópica de ¹⁵N e balanço de N para quantificar a contribuição da FBN em dez variedades de cana-de-açúcar, e obtiveram valores superiores a 60% de N, absorvido pela planta, proveniente das bactérias. Essa variação pode estar relacionada com o genótipo da planta

e, principalmente, com as condições da fertilidade do solo. Porém, tratando-se de uma cultura que ocupa milhões de hectares, o suprimento de cerca de 30% da demanda de N pela FBN certamente trará benefícios ambientais e econômicos para essa cultura.

Estudos como o de Martins et al. (2020) deixam poucas dúvidas de que alguns cultivares de cana-de-açúcar foram capazes de obter grandes contribuições de N através da FBN. Após 18 meses de crescimento, o nitrogênio fixado totalizou o equivalente de 139 a 166 kg N ha⁻¹ em plantas não inoculadas, enquanto nas plantas inoculadas com uma mistura de cinco bactérias diazotróficas, esse valor totalizou entre 205 a 215 kg N ha⁻¹.

Os efeitos da interação entre variedades de *Azospirillum* inoculadas e o substrato usado na produção de mudas de cana-de-açúcar indicaram que o uso das bactérias promoveu aumento no acúmulo de nitrogênio, o que resultou em maior diâmetro do caule, além de aumentar o índice de velocidade de germinação, altura, comprimento da raiz, peso fresco e seco. No entanto, as respostas à inoculação diferem de variedade para variedade e dependem do substrato utilizado, com melhores resultados observados no substrato comercial e nas misturas de substratos com maior proporção de composto orgânico. Compreender a interação entre a variedade e o substrato com a inoculação bacteriana é essencial para o sucesso da produção de mudas de cana-de-açúcar inoculadas (MATOSO et al., 2021). O mesmo foi observado por Oliveira et al. (2006), em decorrência das características genéticas das variedades utilizadas. Fatores como temperatura e umidade também podem influenciar na inoculação dessas bactérias (COMPAGNON et al., 2017).

Outro microrganismo que também afeta diretamente a promoção do crescimento da planta é *Bacillus* e seus isolados, especialmente *Bacillus subtilis*, com potencial para ser usado como promotor de crescimento de plantas, principalmente por meio de mecanismos como a FBN (ARAÚJO et al., 2005). Esse microrganismo inoculado pode promover o crescimento e o desenvolvimento de mudas de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias endofíticas, podendo produzir auxina, secretar sideróforo e

solubilizar fósforo (WANG et al., 2019). Vários isolados de *Bacillus*, especialmente *Bacillus subtilis*, afetam diretamente a produção de ácido indolbutírico (AIB) (ARAÚJO et al., 2005).

A associação de *Bacillus subtilis* e *Bacillus pumilus*, combinados com fertilização mineral e açúcar e subprodutos da indústria do álcool, inoculados em mudas de cana, permitiu observar-se resultados até 23% maiores no crescimento de raiz e de matéria seca total, em comparação com o controle, na fase de crescimento das mudas de cana-de-açúcar.

Já na segunda fase de avaliação, com a cana-de-açúcar já em fase de maturação (colheita), o uso da inoculação de *B. pumilus*, combinado com fertilização mineral, aumentou a matéria seca total em 13%, o número de perfilhos em 37% e o diâmetro dos perfilhos, em 48%. Foi observado também o aumento no teor de fósforo em 13%, com a inoculação de combinada de *B. subtilis* e *B. pumilus* em solo tratado com fertilizante e torta de filtro. A utilização de *B. subtilis* e *B. pumilus*, bem como o uso de subprodutos da cana-de-açúcar, podem melhorar a fertilidade do solo, reduzir os efeitos adversos associados à fertilização com vinhaça e melhorar o rendimento da produção de cana-de-açúcar, com benefícios ambientais (SANTOS et al., 2018).

2.2 Controle biológico

O termo “controle biológico” consiste em reduzir a população de um organismo alvo por outro organismo vivo. Este apresenta uma série de vantagens em relação ao controle químico, pois não contamina o solo, não desequilibra o meio ambiente e nem deixa resíduos, além de ser barato e de fácil aplicação (STIRLING, 1991).

Métodos alternativos no controle de pragas e insetos têm sido adotados por vários laboratórios ao redor do mundo, em vista da necessidade de uma agricultura mais sustentável, no que o Brasil se destaca. Microrganismos endofíticos têm mostrado resultados positivos a esse controle (LANNA-FILHO et al., 2017; SHAHZAD et al., 2017; WANG et al., 2019). As bactérias endofíticas têm grande contribuição para o controle de pragas (BENSIDHOUM et al., 2016; SCHELLENBERGER

et al., 2016). *Bacillus* é uma das bactérias mais utilizadas no controle biológico de pragas (BRAVO et al., 2017), respondendo por 53% do mercado de biopesticidas (POLANCZYK et al., 2017). Vários isolados de *Bacillus*, especialmente *Bacillus subtilis*, têm efeitos direto no biocontrole (ALI et al., 2014; HANIF et al., 2015; OSLIZLO et al., 2015).

Vários microrganismos também se têm mostrado promissores no controle biológico de nematoides. Esses organismos são capazes de repelir, inibir ou mesmo levar à morte os fitonematoides. Mais de 200 inimigos naturais de fitonematoides têm sido reportados, tais como fungos, bactérias, nematoides predadores e ácaros, sendo que os de maior potencial como agentes de controle biológico são as bactérias e os fungos (STIRLING, 1991). Dentre eles, podemos citar *Trichoderma*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Pythium*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Agrobacterium* e *Streptomyces* como os gêneros mais estudados (MELO; AZEVEDO, 1998).

Cerca de 75% dos antagonistas de nematoides identificados são fungos que habitam normalmente o solo, podendo ser parasitas de ovos, predadores de juvenis, adultos ou cistos, ou ainda produzirem metabólitos tóxicos aos nematoides (JATALA, 1986). Alguns fungos nematófagos também podem ser capazes de colonizar endofiticamente raízes de plantas e, além disso, controlar doenças causadas por fungos de solo (MONFORT et al., 2005).

2.3 Ação Antiestresse

O estresse hídrico também é outro assunto que tem preocupado o mundo todo, pois afeta diretamente a produtividade. Diversos microrganismos vêm sendo estudados como indutores de tolerância ao estresse hídrico, como *Trichoderma* (SCUDELETTI et al., 2021), *Azospirillum* (NADEEM et al., 2015; NGUMBI; KLOEPPER, 2016) e *Bacillus* (GOWTHAM et al., 2020).

Em um trabalho realizado por Scudeletti et al. (2021), a inoculação de *Trichoderma asperellum* em cana-de-açúcar em casa de vegetação na presença de estresse hídrico não apenas melhorou as condições da planta, como também alterou a nutrição da cultura e as concentrações de clorofila

e carotenoide, resultando em aumento da taxa de fotossíntese, da condutância estomática e da eficiência do uso de água, em comparação com as plantas não inoculadas. Houve melhorias também no metabolismo antioxidante, aumentando as atividades das enzimas superóxido dismutase e peroxidase e a concentração de prolina e açúcares na planta. Consequentemente, melhorou o desenvolvimento radicular e do colmo, comprovando os benefícios de seu uso, diminuindo os efeitos de estresse hídrico em cana-de-açúcar.

3. Considerações finais

A utilização de microrganismos é uma situação atual que a cada dia vem sendo mais aceita e adotada por produtores na busca pelo aumento da produtividade através do controle biológico de pragas e resistência das plantas por fatores ambientais.

4. Referências

- ALI, S.; CHARLES, T. C.; GLICK, B. R. Amelioration of high salinity stress damage by plant growth-promoting bacterial endophytes that contain ACC deaminase. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 80, p. 160-167, 2014
- ARAÚJO, F. F.; HENNING, A. A.; HUNGRIA, M. Phytohormones and antibiotics produced by *Bacillus subtilis* and their effects on seed pathogenic fungi and on soybean root development. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 21, n. 8, p. 1639-1645, 2005.
- BARROS, A. C. B.; MOURA, R. M.; PEDROSA, E. M. R. Aplicação de Terbufós no controle de *Meloidogyne incognita* Raça 1 e *Pratylenchus zae* em cinco variedades de cana-de-açúcar no nordeste. **Nematologia Brasileira**, v. 24, n. 1, p. 73-78, 2000.
- BASHAN, Y., DE-BASHAN, L. E. How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth — a critical assessment. **Advances in agronomy**, v. 108, p. 77-136, 2010.

BASHAN, Y., LEVANONY, H. Current status of *Azospirillum* inoculation technology: *Azospirillum* as a challenge for agriculture. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 36, n. 9, p. 591-608, 1990.

BENSIDHOUM, L.; NABTI, E.; TABLI, N.; KUPFERSCHMIED, P.; WEISS, A.; ROTHBALLER, M.; SCHMID, M.; KEEL, C.; HARTMANN, A. Heavy metal tolerant *Pseudomonas protegens* isolates from agricultural well water in northeastern Algeria with plant growth promoting, insecticidal and antifungal activities. **European Journal of Soil Biology**, v. 75, p. 38-46, 2016.

BHARDWAJ, D.; ANSARI, M.W.; SAHOO, R. K.; TUTEJA, N. Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. **Microbial cell factories**, v. 13, n. 1, p. 1-10, 2014.

BIOFERTILIZERS MARKET SIZE. **Share & Trends Analysis Report By Product (Nitrogen Fixing, Phosphate Solubilizing), By Application (Seed Treatment, Soil Treatment), By Crop Type, By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027**. Jun, 2020.

BOTTINI, R.; FULCHIERI, M.; PEARCE, D.; PHARIS, R., Identification of gibberellins A₁, A₃, and iso-A₃ in cultures of *Azospirillum lipoferum*. **Plant Physiology**, v. 90, n. 1, p. 45-47, 1989.

BRAVO, A.; PACHECO, S.; GÓMEZ, I.; GARCIA-GÓMEZ, B.; ONOFRE, J.; SOBERÓN, M. Insecticidal proteins from *Bacillus thuringiensis* and their mechanism of action. In: FIUZA, L. M.; POLANCZYK, R. A.; CRICKMORE, N. ***Bacillus Thuringiensis* and *Lysinibacillus Sphaericus***: Characterization and use in the field of biocontrol. Springer International Publishing, 2017. p. 53–66.

CASSAN, F.; MAIALE, S.; MASCIARELLI, O.; VIDAL, A.; LUNA, V.; RUIZ, O. Cadaverine production by *Azospirillum brasilense* and its possible role in plant growth promotion and osmotic stress mitigation. **European journal of soil biology**, v. 45, n. 1, p. 12-19, 2009.

COHEN, A.; BOTTINI, R.; PICCOLI, P. *Azospirillum brasilense* Sp 245 produces ABA in chemically-defined culture medium and increases ABA content in arabidopsis plants. **Plant Growth Regulation**, v. 54, n. 2, p. 97-103, 2008.

COHEN, A.; BOTTINI, R.; PONTIN, M.; BERLI, F.; MORENO, D.; BOCCANLANDRO, H.; TRAVAGLIA, C.; PICCOLI, P. *Azospirillum brasilense* ameliorates the response of *Arabidopsis thaliana* to drought mainly via enhancement of ABA levels. **Physiologia Plantarum**, v. 153, n. 1, p. 79-90, 2015.

COLEMAN-DERR, D.; TRINGE, S. G. Building the crops of tomorrow: advantages of symbiont-based approaches to improving abiotic stress tolerance. **Frontiers in Microbiology**, v. 5, p. 1–6, 2014.

COMPAGNON, A. M.; SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A.; CAVICHIOLI, F. A.; ARRIEL, F. H. Operational uniformity for a sugarcane planter. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 12, p. 953-962, 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**: Safra 2020/21. Brasília, [s.n.], v. 8, n. 1, 56 p. Mai./ 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**: Safra 2017/18. Brasília, [s.n.], v. 4, n. 3, 77 p. Dez./ 2017.

COMPANT, S.; CLÉMENT, C.; SESSITSCH, A. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 669–678, 2010.

CREUS, C.; GRAZIANO, M.; CASANOVAS, E.; PEREYRA, A.; SIMONTACCHI, M.; PUNTARULO, S.; BARASSI, C.; LAMATTINA, L. Nitric oxide is involved in the *Azospirillum brasilense*-induced lateral root formation in tomato. **Planta**, v. 221, n. 2, p. 297-303, 2005.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; GIL, M. A.; MENEGATTI, C. C. Danos causados por nematoides a variedades de cana-de-açúcar em cana planta. **Nematologia Brasileira**, v. 27, n. 1, p. 69-73, 2003.

EMBRAPA. **Microrganismos Endofíticos**: fungos, bactérias e actinomicetos que vivem no interior de plantas, sistemicamente, sem causar danos. Jornal do Endofítico. EMBRAPA Meio Ambiente. Setembro, 2020.

GOWTHAM, H. G.; SINGH, S. B.; MURALI, M.; SHILPA, N.; PRASAD, M.; AIYAZ, M.; NIRANJANA, S. R. Induction of drought tolerance in tomato upon the application of ACC deaminase producing plant growth promoting rhizobacterium *Bacillus subtilis* Rhizo SF 48. **Microbiological research**, v. 234, p. 126422, 2020.

HARPER, J. E. Nitrogen metabolism. In: BOOTE, K. J.; BENNETT, J. M.; SINCLAIR, T. R.; PAULSEN, G. M. **Physiology and determination of crop yield**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1994. p.285-302.

HANIF, M. K.; HAMEED, S.; IMRAN, A.; NAQQASH, T.; SHAHID, M.; VAN ELSAS, J. D. Isolation and characterization of a β -propeller gene containing phosphobacterium *Bacillus subtilis* strain KPS-11 for growth promotion of potato (*Solanum tuberosum* L.). **Frontiers in Microbiology**, v. 6, p. 583, 2015.

KHAN, T. A.; SAXENA, S. K. Integrated management of root knot nematode *Meloidogyne javanica* infecting tomato using organic materials and *Paecilomyces lilacinus*. **Bioresource technology**, v. 61, n. 3, p. 247-250, 1997.

JATALA, P. Biological control of plant-parasitic nematodes. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 24, p. 453-489, 1986.

LANNA-FILHO, R.; SOUZA, R. M.; ALVES, E. Induced resistance in tomato plants promoted by two endophytic bacilli against bacterial speck. **Tropical Plant Pathology**, v. 42, n. 2, p. 96-108, 2017.

MARTINS, D. S.; REIS, V. M.; SCHULTZ, N.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; PEREIRA, W.; SOUSA, J. S.; BODDEY, R. M. Both the contribution of soil nitrogen and of biological N₂ fixation to sugarcane can increase with the inoculation of diazotrophic bacteria. **Plant and Soil**, v. 454, n. 1, p. 155-169, 2020.

MASSENSINI, A. M.; TÓTOLA, M. R.; BORGES, A.C.; COSTA, M.D. Potential phosphate solubilization mediated by rhizospheric microbiota of eucalyptus cultivated in a typical toposequence of the zona da mata, Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 692-700, 2015.

MATOSO, E. S.; REIS, V. M.; AVANCINI, A. R.; SIMON, E. D. T.; MARCO, E. D.; SILVA, S. D. dos A. E. Diazotrophic bacteria and substrates in the growth and nitrogen accumulation of sugarcane seedlings. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 1, e20190035, 2021.

MELO, I. S.; AZEVEDO, J. L. **Ecologia Microbiana**. Jaguariúna: Embrapa-DNPMA, 1998. p. 393-419.

MENDES, R.; KRUIJT, M.; de BRUIJN, I.; DEKKERS, E.; van DER VOORT, M.; SCHNEIDER, J. H. M.; PICENO, Y. M.; RAAIJMAKERS, J. M. Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria. **Science**, v. 332, p. 1097–1100, 2011.

MIFFLIN, B. J.; LEA, P. J. The pathway of nitrogen assimilation in plants. **Phytochemistry**, New York, v.15, p.873-885, 1976.

MONFORT, E.; LOPEZ-LLORCA, L.V.; JANSSON, H.B.; SALINAS, J.; PARK, J.O.; SIVASITHAMPARAM, K. Colonisation of seminal roots of wheat and barley by egg-parasitic nematophagous fungi and their effects on *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* and development of root-rot. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, n. 7, p. 1229-1235, 2005.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.

MORETTI, L. G.; CRUSCIOL, C. A. C.; BOSSOLANI, J. W.; MOMESSO, L.; GARCIA, A.; KURAMAE, E. E.; HUNGRIA, M. Bacterial consortium and microbial metabolites increase grain quality and soybean yield. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 1923-1934, 2020.

MOUTIA, J. F.Y.; SAUMTALLY, S.; SPAEPEN, S.; VANDERLEYDEN, J. Plant growth promotion by *Azospirillum* sp. in sugarcane is influenced by genotype and drought stress. **Plant and soil**, v. 337, n. 1, p. 233-242, 2010.

NADEEM, S. M.; NAVEED, M.; AHMAD, M.; ZAHIR, Z. A. Rhizosphere bacteria for crop production and improvement of stress tolerance: mechanisms of action, applications, and future prospects. In: ARORA, N. K. **Plant microbes symbiosis: applied facets**. New Delhi: Springer, 2015. p. 1-36.

NGUMBI, E.; KLOEPPER, J. Bacterial-mediated drought tolerance: current and future prospects. **Applied Soil Ecology**, v. 105, p. 109-125, 2016.

OKON, Y.; HEYTLER, P.; HARDY, W. N₂ fixation by *Azospirillum brasilense* and its incorporation into host *Setaria italica*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 46, n. 3, p. 694-697, 1983.

OLIVEIRA; A.L.M.; CANUTO, E.L.; URQUIAGA, S., REIS, V.M.; BALDANI, J.I. Yield of micropropagated sugarcane varieties in different soil types following inoculation with diazotrophic bacteria. **Plant Soil**, v. 284, p. 23–32, 2006.

ONU, United nations, department of economic and social affairs The United Nations, Population Division, **Population Estimates and Projections Section**, 2012.

OSLIZLO, A.; STEFANIC, P.; VATOVEC, S.; BEIGOT GLASER, S.; RUPNIK, M.; MANDIC-MULEC, I. Exploring ComQXPA quorum-sensing diversity and biocontrol potential of *Bacillus* spp. isolates from tomato rhizoplane. **Microbial Biotechnology**, v. 8, n. 3, p. 527-540, 2015.

POLANCZYK, R. A.; VAN FRANKENHUYZEN, K.; PAULI, G. The American *Bacillus thuringiensis* based biopesticides market. In: FIUZA, L. M.; POLANCZYK, R. A.; CRICKMORE, N. ***Bacillus Thuringiensis and Lysinibacillus Sphaericus***: Characterization and use in the field of biocontrol. Springer International Publishing, 2017. p. 173-184.

PRINSEN, E.; COSTACURTA, A.; MICHIELS, K.; VANDERLEYDEN, J.; VAN ONCKELEN, H. *Azospirillum brasilense* indole-3-acetic acid biosynthesis: evidence for a non-tryptophan dependent pathway. **Molecular Plant Microbe Interactions**, v. 6, p. 609-609, 1993.

RASHID, M. I.; MUJAWAR, L. H.; SHAHZAD, T.; ALMEELBI, T.; ISMAIL, I. M.; OVES, M. Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. **Microbiological research**, v. 183, p. 26-41, 2016.

SHAHZAD, F.; XIU, G.; SHAHBAZ, M. Organizational culture and innovation performance in Pakistan's software industry. **Technology in Society**, v. 51, p. 66-73, 2017.

SANTI FERRARA, F. I.; OLIVEIRA, Z. M.; GONZALES, H. H. S.; FLOH, E. I. S.; BARBOSA, H. R. Endophytic and rhizospheric enterobacteria isolated from sugar cane have different potentials for producing plant growth-promoting substances. **Plant Soil**, v. 353, p. 409–417, 2012.

SANTOS, R. M.; KANDASAMY, S.; RIGOBELLO, E. C. Sugarcane growth and nutrition levels are differentially affected by the application of PGPR and cane waste. **MicrobiologyOpen**, v. 7, n. 6, p. e00617, 2018.

SANTOYO, G.; MORENO-HAGELSIEB, G.; del CARMEN OROZCO-MOSQUEDA, M.; GLICK, B.R. Plant growth-promoting bacterial endophytes. **Microbiological research**, v. 183, p. 92-99, 2016.

SHELLENBERGER, U.; ORAL, J.; ROSEN, B. A.; WEI, J.-Z.; ZHU, G.; XIE, W.; ... LIU, L. A selective insecticidal protein from *Pseudomonas* for controlling corn rootworms. **Science**, v. 354, n. 6312, p. 634-637, 2016.

SCHULTZ, N.; da SILVA, J. A.; SOUSA, J. S.; MONTEIRO, R. C.; OLIVEIRA, R. P.; CHAVES, V. A.; PEREIRA, W.; SILVA, M. F.; da REIS, V. M.; URQUIAGA, S. Inoculation of sugarcane with diazotrophic bacteria. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.I.], v. 38, n. 2, p. 359-371, 2014.

SCHULTZ, N.; DE MORAIS, R. F.; DA SILVA, J. A.; BAPTISTA, R. B.; OLIVEIRA, R. P.; LEITE, J. M.; PEREIRA, W.; CARNEIRO JÚNIOR, J. de B.; ALVES, B. J. R.; BALDANI, J. I.; BODDEY, R. M. Avaliação agronômica de variedades de cana-de açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas e adubadas com nitrogênio **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 2, p. 261-268, fev. 2012.

SCUDELETTI, D.; CRUSCIOL C. A. C.; BOSSOLANI J. W.; MORETTI L.G.; MOMESSO, L.; SERVÁZ, T. B.; DE CASTRO S. G. Q.; DE OLIVEIRA, E. F.; HUNGRIA, M. *Trichoderma asperellum* inoculation as a tool for attenuating drought stress in sugarcane. **Frontiers in plant science**, v. 12, p. 570, 2021.

SHAMEER, S.; PRASAD, T. Plant growth promoting rhizobacteria for sustainable agricultural practices with special reference to biotic and abiotic stresses. **Plant Growth Regulation**, v. 84, n. 3, p. 603-615, 2018.

SINGH, M.; AWASTHI, A.; SONI, S. K.; SINGH, R.; VERMA, R. K.; KALRA, A. Complementarity among plant growth promoting traits in rhizospheric bacterial communities promotes plant growth. **Scientific reports**, v. 5, n. 1, p. 1-8, 2015.

SINGH, P.; SUMAN, A.; TIWARI, P.; ARYA, N.; GAUR, A.; SHRIVASTAVA, A. K. Biological pretreatment of sugarcane trash for its conversion to fermentable sugars. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 24, n. 5, p. 667-673, 2008.

SINGH, S. B.; GOWTHAM, H. G.; MURALI, M.; HARIPRASAD, P.; LAKSHMEESHA, T. R.; MURTHY, K. N.; AMRUTHESH, K. N.; NIRANJANA, S. R. Plant growth promoting ability of ACC deaminase producing rhizobacteria native to Sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 18, p. 101089, 2019.

SPAEPEN, S.; VANDERLEYDEN, J. Auxin and plant-microbe interactions. **Cold Spring Harbor perspectives in biology**, v. 3, n. 4, p. a001438, 2011.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. V.; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETTO, R. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico/Fundação IAC, 1996. p.237-239. (Boletim Técnico, 100).

STIRLING, G. R. **Biological control of plant parasitic nematodes**: progress, problems and prospects. Wallingford: CAB International, 1991, 282 p.

STRZELCZYK, E.; KAMPER, M.; LI, C. Cytokinin-like substances and ethylene production by *Azospirillum* in media with different carbon sources. **Microbiological Research**, v. 149, n. 1, p. 55-60, 1994.

SUMAN, A.; YADAV, A. N.; VERMA, P. Endophytic microbes in crops: diversity and beneficial impact for sustainable agriculture. In: SINGH, D. P.; SINGH, H. B.; PRABHA, R. **Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity**. Maunath Bhanjan: Springer, 2016. p. 117-143.

TIEN, T.; GASKINS, M.; HUBBELL, D. Plant growth substances produced by *Azospirillum brasilense* and their effect on the growth of pearl millet (*Pennisetum americanum* L.). **Applied and environmental microbiology**, v. 37, n. 5, p. 1016-1024, 1979.

TIWARI, G.; DURAIVADIVEL, P.; SHARMA, S.; HARIPRASAD, P. 1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase producing beneficial rhizobacteria ameliorate the biomass characters of *Panicum maximum* Jacq. by mitigating drought and salt stress. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 1-12, 2018.

URQUIAGA, S.; XAVIER, R. P.; DE MORAIS, R. F.; BAPTISTA, R. B.; SCHULTZ, N.; LEITE, J. M.; MAIA E SÁ, J.; BARBOSA, K. P.; DE RESENDE, A. S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Evidence from field nitrogen balance and ^{15}N natural abundance data for the contribution of biological N_2 fixation to Brazilian sugarcane varieties. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 356, p. 5 - 21, 2012.

VITOUSEK, P. M.; MENGE, D. N.; REED, S. C.; CLEVELAND, C. C. Biological nitrogen fixation: rates, patterns and ecological controls in terrestrial ecosystems. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 368, n. 1621, p. 20130119, 2013.

WANG, Z.; YU, Z. X.; SOLANKI, M. K.; YANG, L. T.; XING, Y. X.; DONG, D. F. Diversity of sugarcane root-associated endophytic *Bacillus* and their activities in enhancing plant growth. **Journal of applied microbiology**, v. 128, n. 3, p. 814-827, 2019.

XIE, J.; SHI, H.; DU, Z.; WANG, T.; LIU, X.; CHEN, S. Comparative genomic and functional analysis reveal conservation of plant growth promoting traits in *Paenibacillus polymyxa* and its closely related species. **Scientific reports**, v. 6, n. 1, p. 1-12, 2016.

BIOETANOL A PARTIR DA BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR

Carlos Alves de Oliveira²¹

Dile Pontarolo Stremel²²

Victor Gonçalves Cremonez²³

1 PERSPECTIVAS DO BIOETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

O Bioetanol de segunda geração, também conhecido como etanol celulósico, apresenta-se como uma tecnologia promissora e sustentável com vantagens sobre os biocombustíveis de primeira geração, tanto em termos de eficiência do uso da terra quanto ao desempenho ambiental. Devido ao desenvolvimento tecnológico, o desempenho ambiental dos combustíveis de segunda geração pode beneficiar o emprego de elevadas quantidades de resíduos e rejeitos lignocelulósicos que estão atualmente disponíveis (RODRIGUES, 2011). No Brasil, a cana-de-açúcar é o insumo amplamente utilizado para produção de bioetanol empregando os resíduos bagaço ou palha que são descartados no processo de primeira geração.

Uma desvantagem da produção de bioetanol de primeira geração, é a concorrência com a questão da produção de alimentos. A produção de bioetanol através do caldo de cana extraído diretamente da moagem, por exemplo, pode impactar diretamente o mercado do açúcar, especialmente em tempos de pandemia com a elevada demanda por alimentos. Com a perspectiva de recuperação econômica advinda do relaxamento das restrições sociais em importantes países consumidores e o avanço da vacinação contra a doença, a tendência é um aumento nas exportações da

²¹ Engenheiro químico, M. Sc., Docente da Faculdade de Tecnologia de Curitiba, carlos.fatecpr@gmail.com

²² Engenheiro químico, Dr., Docente da Universidade Federal do Paraná, dile.stremel@gmail.com

²³ Engenheiro Industrial Madeireiro, Dr., Docente da Faculdade de Tecnologia de Curitiba, victor.cremonez@gmail.com

commodity e atendimento a demanda interna mais alta. Por conta disso, muitas vezes, os produtores são incentivados a maximizar a produção de açúcar ao invés de bioetanol, resultando em uma alteração na disponibilidade e no consequente aumento no preço do biocombustível, podendo acarretar impacto na economia.

Com base em questões econômicas globais como estas apresentadas, inclusive desvalorização da moeda local em relação ao dólar americano, a obtenção de bioetanol de segunda geração, principalmente a partir dos resíduos da biomassa da cana é uma visão estratégica e deve ser prioridade, visando diminuir os impactos do petróleo e concorrência dos biocombustíveis pelos alimentos, além de contribuir significativamente com a redução emissões de gases de efeito estufa. O Renovabio que representa a Política Nacional dos Biocombustíveis (Lei nº 13.546/2017), surgiu para resolver uma parte deste problema e tem como objetivo amparar o governo brasileiro diante do compromisso assumido na assinatura do Acordo de Paris em 2016 (MME, 2021). Neste acordo, o Brasil se comprometeu a aumentar a participação dos biocombustíveis na matriz energética brasileira, e reduzir em 37% as emissões de carbono até 2025, baseadas em dados de 2005. Com base neste aspecto é visível a expectativa de oportunidades na produção de biocombustíveis no Brasil, principalmente nas tecnologias de segunda geração a partir da cana-de-açúcar no Brasil

2 PRODUÇÃO DE BIOETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO A PARTIR DA BIOMASSA CANA-DE-AÇÚCAR

O bagaço da cana-de-açúcar é, do ponto de vista técnico-econômico, uma das mais promissoras matérias-primas para a produção de etanol de segunda geração (E2G), pois já foi coletado no campo, estando disponível na indústria para processamento (FURLAN et al., 2012).

Isto traz uma grande possibilidade de ganho para as indústrias de etanol, já que um subproduto do processo original se torna matéria-prima para a fabricação do produto final. Dessa maneira, pode-se chegar a aumentar a produção de etanol por hectare de área plantada em até 26%

(GALDOS et al., 2013), diminuindo-se a pressão sobre a produção de alimentos conforme já comentado anteriormente.

A rede do etanol de segunda geração no Brasil envolve diversos setores (parte do setor sucroenergético, fornecedores de equipamentos, instituições governamentais de financiamento e pesquisa, empresas de tecnologia e melhoramento genético, etc.), além de fornecedores de material, equipamentos e tecnologias de outros países (LORENZI; DE ANDRADE, 2019).

Do ponto de vista industrial, as empresas GranBio, Raízen e o CTC são as aquelas que atualmente se destacam em plantas de bioetanol de segunda geração no Brasil. Juntas, possuem plantas com uma capacidade instalada de 125 milhões de litros de E2G por ano, o que torna o Brasil o quarto país do mundo em capacidade instalada de segunda geração, atrás somente dos Estados Unidos, China e Canadá. Entretanto, apenas uma pequena fração (cerca de 10% ou menos) desse potencial anual foi produzido até agora, pois o maior problema para a operação dessas plantas ainda são as dificuldades na etapa de pré-tratamento. (LORENZI; DE ANDRADE, 2019)

3 BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA PARA PRODUÇÃO DE BIOETANOL

A biomassa lignocelulósica constitui a maior fonte de carboidratos do mundo. A dificuldade de converter a biomassa lignocelulósica em bioetanol é atribuída às suas características químicas e morfológicas. Esses materiais lignocelulósicos são constituídos de fibras de celulose envolvidas em uma matriz amorfa de polioses e lignina (SANTOS et al., 2012). A Tabela 1 mostra o percentual dos componentes químicos presentes na palha e bagaço de cana. Nas plantas, as cadeias lineares de celulose promovem a rigidez, a lignina atua como barreira física contra o ataque dos microrganismos, e a hemicelulase proporciona a ligação entre a celulose e a lignina formando uma complexa rede fibrosa (Figura 1). Assim, os dois maiores obstáculos à hidrólise da celulose dos materiais lignocelulósicos, etapas limitantes na produção de etanol, são a recalcitrância da celulose cristalina (proveniente da estrutura linear das

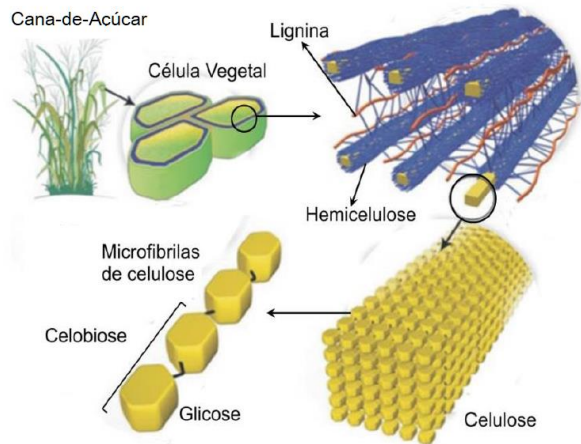
cadeias de celulose compactadas em microfibrilas) e a alta proteção que a lignina oferece à estrutura celulósica, servindo de defesa ao ataque das enzimas hidrolíticas.

Tabela 1 – Biomassa Lignocelulósica da cana-de-açúcar

Biomassa Lignocelulósica	% Celulose	% Hemicelulose	% Lignina
Palha de cana	40-44	30-32	22-25
Bagaço de cana	32-48	19-24	23-32

Fonte: Modificado de Santos (2012)

Figura 1 – Estrutura recalcitrante da celulose presente na cana-de-açúcar.



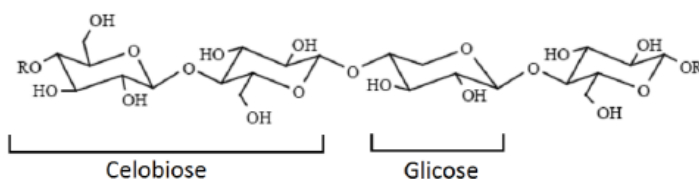
Fonte: Modificado de Santos (2012)

3.1 CELULOSE

A celulose, pode ser classificada em três níveis organizacionais (Figura 2). O primeiro é definido pela sequência de resíduos β -D-glicopiranosídicos unidos por ligações covalentes, formando o homopolímero de anidroglicose com ligações β -D (1 $\rightarrow$ 4) glicosídicas, de fórmula geral $(C_6H_{10}O_5)_n$. O segundo nível descreve a conformação

molecular, isto é, a organização espacial das unidades repetitivas, e é caracterizado pelas distâncias das ligações e respectivos ângulos e pelas ligações de hidrogênio intramoleculares. O terceiro nível define a associação das moléculas, formando agregados com uma determinada estrutura cristalina. Estes agregados conferem elevada resistência à tensão, tornando a celulose insolúvel em água e em um grande número de outros solventes (SANTOS et al., 2012)

Figura 2 – Estrutura da celulose.

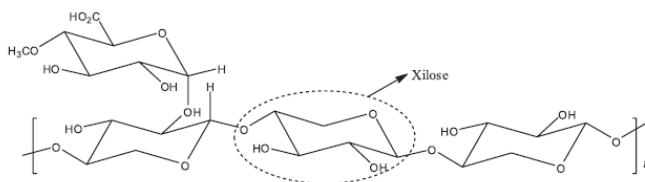


Fonte: Modificado de Santos (2012)

3.2 HEMICELULOSE

Hemicelulose é o segundo material orgânico renovável mais abundante na terra depois da celulose. As hemiceluloses são heteropolissacarídeos complexos compostos por D-glucose, D-galactose, D-manose, D-xilose, L-arabinose, ácido D-glucurônico e ácido 4-O-metilglucurônico (Figura 3). São estruturalmente mais semelhantes à celulose do que a lignina. A estrutura apresenta ramificações que interagem facilmente com a celulose, dando estabilidade e flexibilidade ao agregado. Comparadas com a celulose, as hemiceluloses apresentam maior susceptibilidade à hidrólise ácida, pois oferecem uma maior acessibilidade aos ácidos minerais comumente utilizados como catalisadores (SANTOS et al., 2012).

Figura 3 – Estrutura da Hemicelulose.

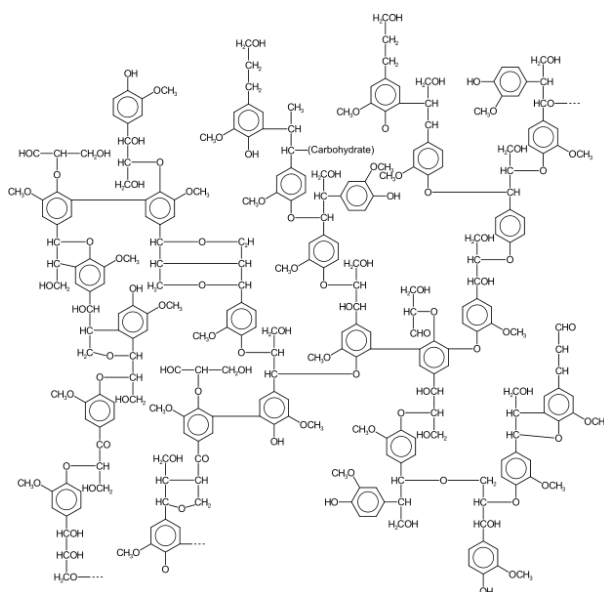


Fonte: Santos (2012)

3.3 LIGNINA

A lignina é uma macromolécula orgânica mais complexa e menos caracterizada na biomassa lignocelulósica e é também um “gargalo” na produção de bioetanol por hidrólise enzimática. Depois da celulose, é a macromolécula mais abundante dentre as biomassas lignocelulósicas (Figura 4). É um heteropolímero amorfo que consiste em três diferentes unidades de fenilpropanos: álcool p-cumarílico, álcool coferílico e álcool sinapílico. A estrutura da lignina não é homogênea, possui regiões amorfas e estruturas globulares. A composição e a organização dos constituintes da lignina variam de uma espécie para outra, dependendo da matriz de celulose-hemicelulose. No processo de hidrólise enzimática dos materiais lignocelulósicos, a lignina atua como uma barreira física para as enzimas que podem ser irreversivelmente capturadas pela lignina e, conseqüentemente, influenciar na quantidade de enzima requerida para a hidrólise, assim como dificultar a recuperação da enzima após a hidrólise (SANTOS et al., 2012).

Figura 4 – Estrutura da Lignina

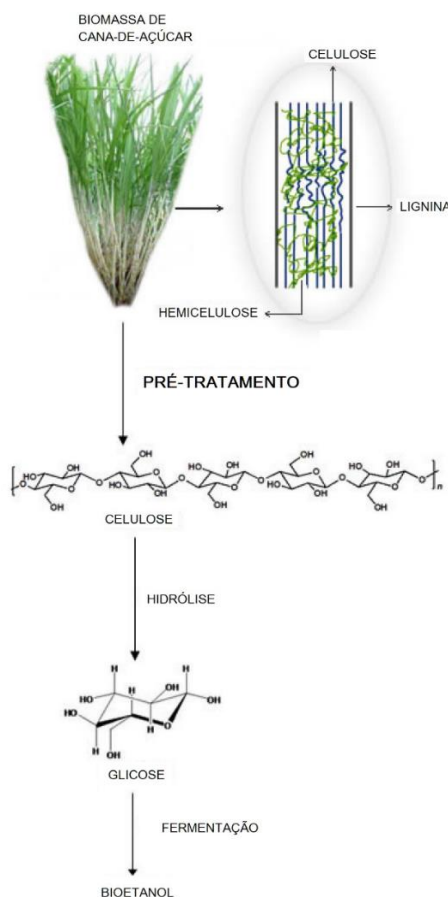


Fonte: Maestrovirtuale(2021)

4 ETAPAS NA PRODUÇÃO DE BIOETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

Um dos principais gargalos que envolvem a produção de etanol celulósico é “desmontar” a parede celular liberando os polissacarídeos como fonte de açúcares fermentescíveis (glicose) de forma eficiente e economicamente viável. A Figura 5 ilustra de forma resumida as etapas, sendo as mais críticas o pré-tratamento da biomassa e a hidrólise da celulose.

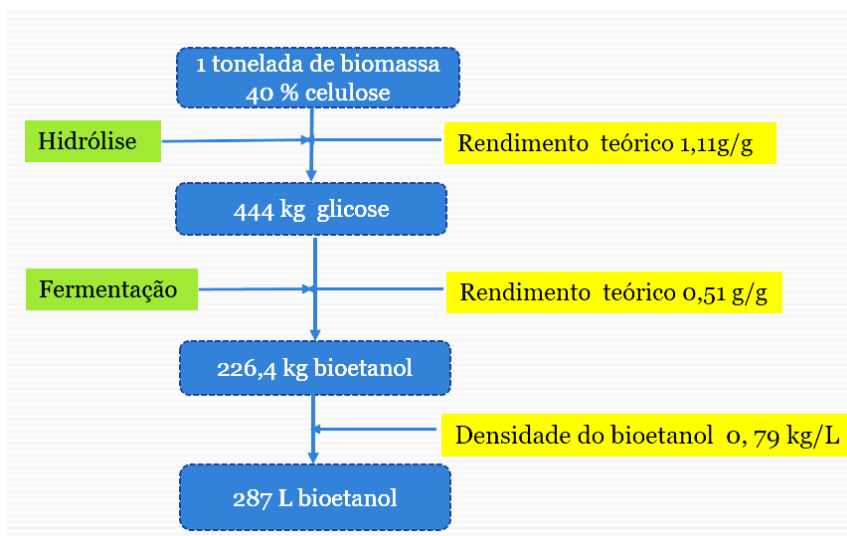
Figura 5- Representação esquemática da produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica



Fonte Modificado de Santos (2012).

Considerando o levantamento realizado por Santos et al. (2012), no caso da cana-de-açúcar no Brasil, a produtividade é de 85 toneladas por hectare, sendo que para cada tonelada de cana processada são gerados cerca de 140 kg de palha e 140 kg de bagaço em base seca, ou seja, 12 toneladas de palha e 12 toneladas de bagaço. Considerando que toda glicose vai ser convertida em bioetanol, o aproveitamento integral da cana-de-açúcar (colmo, palha e bagaço) poderá aumentar significativamente a produção de bioetanol por hectare, passando dos atuais 7.000 L para aproximadamente 14.000 L, sem necessidade de expansão da área cultivada. A Figura 6 mostra as etapas do balanço de massa para 1 tonelada de biomassa de cana-de-açúcar.

Figura 6- Rendimento teórico da produção de bioetanol



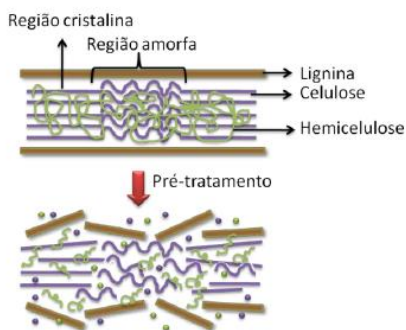
Fonte Modificado de Santos (2012).

4.1 PRÉ-TRATAMENTO DA BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

O pré-tratamento visa remover a lignina e a hemicelulose da biomassa, reduzir a cristalinidade da celulose e aumentar a porosidade do material para melhorar o acesso das enzimas à celulose e, assim aumentar a conversão dos polissacarídeos em açúcares fermentáveis (MOSIER et al., 2005). Na Figura 7 é possível observar um esquema do pré tratamento. A eficiência de remoção de lignina depende do tipo empregado e das condições ideais mantidas durante o procedimento. Os processos de pré-tratamento, que são os mais onerosos na conversão da biomassa à açúcares fermentescíveis, podem ser físicos, químicos, biológicos ou podem ser uma combinação desses métodos. Na Tabela 2 pode-se observar os diferentes pré tratamentos possíveis para a biomassa. Embora diferentes métodos estejam disponíveis, o desenvolvimento desta etapa com menos formação de inibidores é um desafio na produção de bioetanol. (MOSIER et al., 2005; RABELO et al., 2011; NIJU; SWATHIKA, 2019).

Um pré-tratamento efetivo deve obedecer a uma série de características, tais como resultar em uma elevada recuperação de todos os carboidratos, e elevada digestibilidade da celulose na hidrólise enzimática subsequente, elevada concentração de sólidos e elevada concentração de açúcares livres na fração líquida. Além disso, deve possuir uma baixa demanda energética, evitar a formação de subprodutos e ter investimento e custo operacional baixos.

Figura 7- Esquema do complexo celulose-hemicelulose-lignina no pré-tratamento.



Fonte Modificado de Mosier (2004)

Tabela 2 – Pré Tratamentos

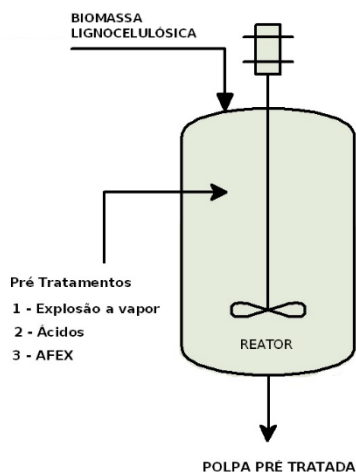
Pré-tratamento		Características composicionais			Vantagens	Desvantagens
		Celulose	Hemicelulose	Lignina		
Físico	Moinho de bolas	Intensiva diminuição do grau de cristalinidade	Não remove	Não remove	Redução de cristalinidade	Alto consumo de energia
	Ácido diluído	Pouca despolimerização	80-100% de remoção	Pouca remoção, mas ocorre mudança da estrutura	Condições médias, altas produção de xilose	Difícil recuperação do ácido, corrosivo e relativamente custoso
Químico	Hidróxido de sódio	Inchaço significativa	Considerável solubilidade	Considerável solubilização, >50%	Remoção efetiva de ésteres	Reagente caro, recuperação alcalina
	ARP	Menor que 5% de despolimerização	~50% de solubilidade	~70% de solubilização	Efetiva deslignificação	Recuperação alcalina, relativamente caro
	Hidróxido de cálcio	Pouca despolimerização	Significativa solubilização	Solubilização parcial (~40%)	Efetiva remoção de lignina e acetil, baixo custo	Menor efetividade devido a pouca solubilidade da cal
	Ozonólise	Não foi observada despolimerização	Pequena solubilização	Solubilização acima de 70%	Efetiva deslignificação em condições suaves	Caro, necessidade de mais ozônio
	Organosolv	Considerável inchaço	Significativo, quase completa	Significativo, pode ser quase completa	Alta produção de xilose, efetiva deslignificação	Recuperação de solvente cara
Biológico	Biológico	20-30% de despolimerização	Acima de 80% de solubilização	~40% de deslignificação	Baixo requerimento de energia, efetiva deslignificação	Perda de celulose, baixa taxa de hidrólise
	Explosão a vapor	Pouca despolimerização	80-100% de remoção	Pouca remoção, mas ocorre mudança da estrutura	Energia eficiente, nenhum custo de reciclagem	Degradação da xilana como produto inibitório
Combinado	AFEX	Diminuição do grau de cristalinidade	Acima de 60% de solubilidade	10-20% de solubilização	Menor perda de xilanas, não formação de inibidores	Recuperação de amônia, não é efetivo para alta concentração de lignina

Fonte: Santos et al. (2013)

Os pré-tratamentos químicos e combinados têm recebido uma maior atenção, já que removem a lignina sem degradar a cadeia celulósica. Pelo fato da lignina estar quimicamente ligada às hemiceluloses, uma degradação parcial das hemiceluloses ocorre no processo de pré-tratamento químico. Dentre estas técnicas de pré-tratamento da biomassa lignocelulósica, pode-se destacar a explosão a vapor, expansão da fibra de amônia (AFEX) e utilização de ácido diluído como os métodos mais estudados e promissores no processo de obtenção de etanol a partir da biomassa lignocelulósica (SANTOS et al., 2012).

A Figura 8 ilustra a representação do dos pré-tratamentos: (1) explosão a vapor: vapor saturado (160-240 °C) no tempo (2-30 min); (2) ácido: solução com ácido (sulfúrico, clorídrico, fosfórico ou nítrico), temperatura (140-200 °C), tempo (10-60 min) e pressão (9-17 bar); (3) AFEX: amônia líquida, temperatura (100-180 °C), tempo (10-60 min) e pressão (9-17 bar). (SANTOS et al., 2012).

Figura 8- Esquema do pré tratamento



Fonte Modificado de Santos (2012)

Atualmente, várias metodologias de pré-tratamento estão sendo investigadas, no entanto, cada uma tem suas vantagens e desvantagens, uma vez que as mesmas dependem da natureza do material lignocelulósico e sua posterior aplicação. São vários fatores a serem analisados como rendimento, consumo de energia, formação de inibidores tóxicos, corrosão, custo de reagentes e enzimas, recuperação do solvente, etc. A escolha deve ser baseada em critérios tanto técnicos quanto econômicos já que o pré-tratamento é uma das etapas mais custosas na produção de bioetanol de segunda geração.

4.2 HIDRÓLISE

A hidrólise propriamente dita, ocorre após a etapa de pré tratamento e tem como objetivo converter a celulose em glucose, após quebrar as ligações glicosídicas, ou seja, produzir açúcares diretamente fermentescíveis. É a rota com maior potencial de promover o incremento da produção de bioetanol (sem expandir a fronteira agrícola), bem como aumentar a eficiência de conversão de energia primária da cana-de-açúcar (SANTOS et al., 2013). Nesta etapa a hidrólise pode ser catalisada por ácidos ou enzimas. A hidrólise ácida, utiliza um ácido como catalisador, pode ser ácido diluído ou concentrado, já a hidrólise enzimática é feita com um complexo enzimático. A hidrólise enzimática apresenta algumas vantagens em comparação à ácida como, maior especificidade do biocatalisador e menores taxas de degradação da glicose, também apresenta um custo menor, pois é conduzida em condições moderadas (pH 4,8 e Temperaturas de 45 - 50 ° C), além de não ter problemas de corrosão (SUN; CHENG, 2002).

4.2.1 Hidrólise Ácida

Os processos de hidrólise ácida podem envolver duas situações: aqueles que utilizam ácidos concentrados e os que utilizam ácidos diluídos. A hidrólise ácida, feita com catalisadores ácidos, tem o ácido sulfúrico como o ácido mais utilizado. Porém, há casos onde pode ser encontrada a utilização de outros ácidos inorgânicos, como o ácido clorídrico, o ácido nítrico e o fosfórico. Problemas com a hidrólise ácida consistem no fato da necessidade de recuperação ou neutralização dos ácidos antes de efetuar-se a fermentação e também na grande quantidade de resíduos produzidos (ZABED et al., 2016).

O processo com ácido diluído é o mais antigo. Este processo envolve duas reações de hidrólise; na primeira a fração de hemicelulose é convertida em açúcares e outros coprodutos por meio da utilização de ácido diluído e vapor. A temperatura do processo está na faixa de 130 - 190 °C, com tempo de 10-30 min. O segundo estágio de hidrólise também é realizado com ácido diluído e vapor, mas as temperaturas são mais severas, entre 190 e 265 °C, e com tempo de residência muito curto, só

alguns segundos. Os açúcares no segundo estágio são tratados com hidróxido de cálcio e, algumas vezes, com uma pequena adição de sulfato de sódio antes da fermentação. Esse tratamento neutraliza os hidrolisados e remove as substâncias inibidoras. Em média, os rendimentos são de 89% para manose, 82% para galactose, mas apenas 50 % para glicose (HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005).

O processo com ácido concentrado requer, primeiramente, um pré-tratamento com um ácido (diluído ou concentrado), a fim de liberar os açúcares da hemicelulose. Em seguida, é requerida uma segunda etapa, com a adição de ácido sulfúrico concentrado (70-90%). A segunda etapa tem como objetivo converter a celulose em glicose, e é feita a temperaturas moderadas, levando a pouca degradação (HAYES, 2009). A hidrólise com ácido concentrado tem um alto rendimento (90%) e o procedimento dura, por volta de 10 a 12 horas no total (HAMELINCK; VAN HOOIJDONK; FAAIJ, 2005).

4.2.2 Hidrólise Enzimática

A hidrólise enzimática da celulose utiliza enzimas denominadas celulasas, as quais são altamente específicas. Consiste em um complexo enzimático representado pelas endoglucanases, exoglucanases e β -glicosidades.

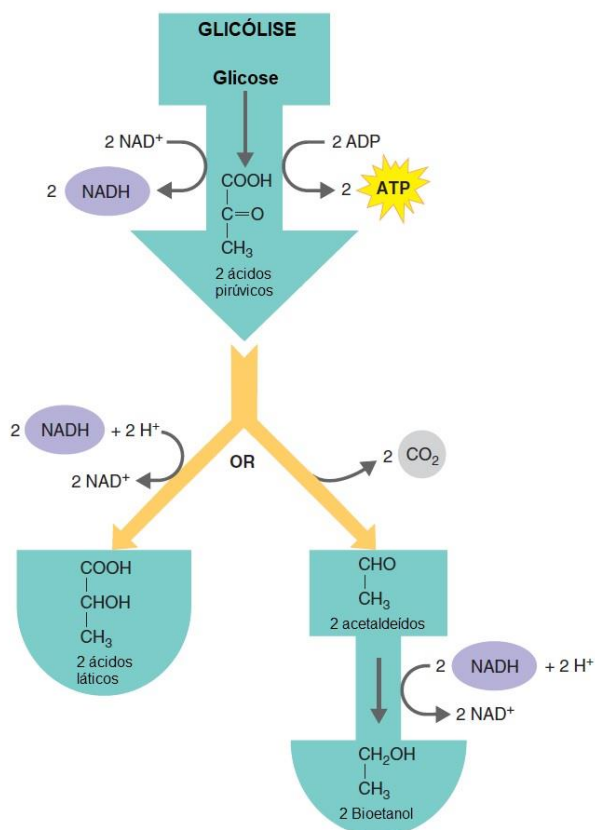
As endoglucanases hidrolisam randomicamente as regiões internas da estrutura amorfa da celulose, liberando oligossacarídeos menores. Essas enzimas são responsáveis pela rápida solubilização da fibra de celulose. Os produtos gerados pelas endoglucanases, tornam-se então substrato para as exoglucanases as quais clivam os oligossacarídeos, liberando principalmente celobiose. As principais representantes das exoglucanases são as celobiohidrolases, que podem atuar tanto na extremidade redutora quanto na não redutora da celulose. As β -glicosidades impedem a acumulação da celobiose, realizando a quebra dela em glicose. A celobiose é um inibidor mais forte do que a glicose, sendo interessante que ela seja rapidamente hidrolisada em glicose pelas β -glicosidades (SUN; CHENG, 2002).

Os fatores que afetam a hidrólise enzimática da celulose incluem substratos (concentração e características estruturais), concentração de celulase e condições de reação (temperatura e pH). Com base na complexidade da hidrólise enzimática, busca-se sempre melhorar o rendimento e a taxa de hidrólise, mas para isto, são necessários extensos estudos de otimização do processo, o que resultará em um aumento da atividade da celulase e consequentemente na produção de açúcares fermentescíveis.

4.3 FERMENTAÇÃO

A fermentação alcoólica inicia-se com a glicólise, também chamada de via Embden-Meyerhof, na qual ocorre a oxidação da glicose em dois ácidos pirúvicos em duas etapas, podendo ocorrer na presença de oxigênio ou não. Na primeira etapa, duas moléculas de ATP são utilizadas enquanto uma molécula de glicose é fosforilada, reestruturada e quebrada em dois compostos de três carbonos: gliceraldeído 3-fosfato (GP) e diidroxiacetona fosfato (DHAP), que é imediatamente convertida em GP. Na segunda etapa, as duas moléculas de GP são oxidadas, em muitos passos, em duas moléculas de ácido pirúvico. Nessas reações, duas moléculas de NAD⁺ são reduzidas a NADH e quatro moléculas de ATP (adenosina trifosfato) são formadas pela fosforilação em nível de substrato, com saldo final positivo de duas moléculas de ATP para cada molécula de glicose que é oxidada. Após a glicólise, as duas moléculas de ácido pirúvico são convertidas em duas moléculas de acetaldeído e duas moléculas de CO₂. As moléculas de acetaldeído são então reduzidas por duas moléculas de NADH para formar duas moléculas de bioetanol (Figura 9).

Figura 9- Fermentação alcóolica



Fonte: Modificado de Tortora; Funke; Case (2013)

Na fermentação os microrganismos empregados são suscetíveis ao hidrolisado lignocelulósico. O processo vai depender da cepa e condições de fermentação (temperatura, pH, aeração e suplementação com nutrientes). A fermentação apresenta condições indesejadas, como acúmulo de bioetanol, diminuições graduais do pH, mudança para um crescimento aeróbio e limitação de nutrientes. O estresse osmótico, causado pelos íons e açúcares no hidrolisado, e o acúmulo de álcool são conhecidos por inibir o crescimento e a viabilidade da levedura, afetando o desempenho da fermentação do bioetanol (ROBAK; BALCEREK, 2018).

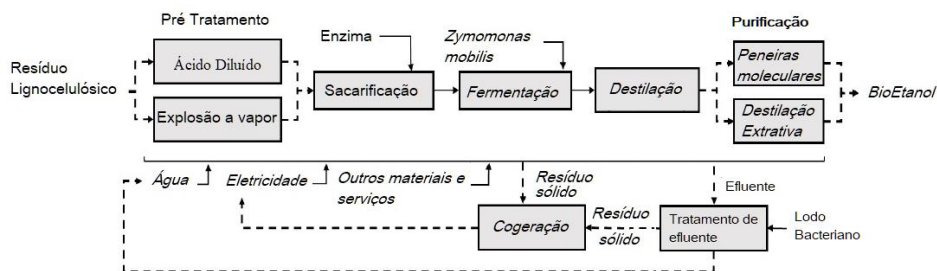
Na produção industrial de bioetanol utilizando biomassa lignocelulósica, os microrganismos devem apresentar termotolerância e alta atividade fermentativa para carboidratos simples, como glicose e xilose (um padrão de utilização de açúcar adequado). Eles também devem fornecer alto rendimento em etanol (acima de 90% do rendimento teórico), alta tolerância ao etanol (acima de 40 g/L), baixa necessidade de crescimento no meio, alta resistência a estressores do meio, como inibidores gerados durante o processo industrial (especificamente, furfural e 5-hidroximetil furfural) e resistência a pH ácido e temperaturas mais altas, o que evita a contaminação microbiológica (ROBAK; BALCEREK, 2018). Outros requisitos são a capacidade de crescer em diferentes meios (frequentemente substratos lignocelulósicos, como resíduos de colheitas ou resíduos florestais), taxa de crescimento rápida e adequação para modificação genética.

Pesquisas tem se concentrado no isolamento, identificação e avaliação de cepas de leveduras que apresentam potencial para produção de etanol a partir de glicose e xilose. O fato é que os microrganismos possuem uma preferência natural pelo consumo de certos açúcares, muitas vezes a glicose ao invés da xilose. Cepas promissoras para fermentação são selecionadas com base em seu comportamento na presença de inibidores em meios de fermentação e após a aplicação de diferentes métodos de pré-tratamento. Cepas isoladas de *Saccharomyces cerevisiae* JRC6 e *Candida tropicalis* JRC1 são recomendadas para fermentação de hidrolisados lignocelulósicos após pré-tratamento alcalino e pré-tratamento ácido, respectivamente (CHOUDHARY et al., 2017). Certas cepas, como *Saccharomyces cerevisiae* e *Zymomonas mobilis*, são adequadas para a produção de bioetanol, mas seu uso com hidrolisados lignocelulósicos não é viável (ROBAK; BALCEREK, 2018).

4.4 DESTILAÇÃO E PURIFICAÇÃO

O projeto conceitual da biorrefinaria de E2G é mostrado na Figura 10 e que consiste em cinco seções principais: pré-tratamento, sacarificação, fermentação, destilação e purificação. O caldo de fermentação é enviado para a seção de destilação, onde duas colunas são usadas para concentrar o etanol próximo ao seu ponto azeotrópico. A primeira coluna separa o caldo de fermentação em duas correntes principais: a corrente do destilado que é composta principalmente de etanol diluído e o fluxo de fundo que contém biomassa não convertida, impurezas inorgânicas e água. O fluxo de fundo é centrifugado, para que os sólidos sejam enviados para a seção de cogeração (onde o calor e eletricidade são produzidos pela combustão sólida) e o líquido centrifugado é enviado para o efluente na seção de tratamento (onde a água recuperada é reciclada de volta ao processo). O fluxo de destilado é então enviado para a segunda coluna (retificadora), onde o condensado de topo contém bioetanol concentrado (cerca de 90% p/p). Finalmente, o produto destilado da coluna retificadora é enviado para a seção de purificação para a desidratação do etanol, para atingir a categoria de grau de combustível (99,98% p/p). O fluxo de fundo da coluna retificadora contém água pura que também é reciclada no processo.

Figura 10- Processo produtivo de bioetanol 2G incluindo Destilação e Purificação



Fonte: Modificado de Gonzalez-Contreras et al., (2020)

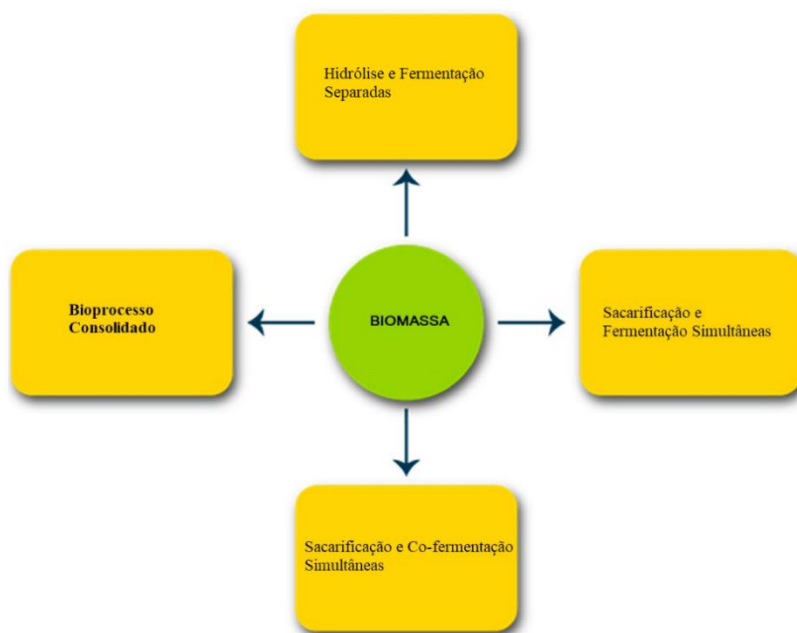
Com relação à seção de purificação, é importante lembrar que a obtenção do bioetanol anidro não é um processo simples, pois requer a separação da mistura azeotrópica de bioetanol-água. Para isso, existem diferentes processos de desidratação, entre os quais estão: destilação a vácuo, destilação azeotrópica, destilação extrativa, adsorção com peneiras moleculares, pervaporação e processos híbridos. Foi relatado que um menor consumo de energia foi alcançado com a peneira molecular e tecnologias de destilação extrativa (GIL et al., 2008; GONZALEZ-CONTRERAS et al., 2020).

5 CONFIGURAÇÕES DE PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE BIOETANOL

A integração do processo com diferentes configurações reduz o custo de capital e torna a produção de biocombustíveis mais eficiente e economicamente viável (DEVARAPALLI; ATIYEH, 2015).

Após o pré-tratamento eficiente do material lignocelulósico, podem ser empregadas várias configurações ou métodos ou estratégias de processamento. Devido à presença de vários açúcares no meio reacional, muitas vezes o multiprocessamento, ou seja, o emprego simultâneo de enzimas e de microrganismos fermentadores mostra-se como uma alternativa recomendável. A Figura 11 ilustra quatro formas de realizar-se a etapa de fermentação, sendo elas: Hidrólise e Fermentação Separadas (SHF), Sacarificação e Fermentação Simultâneas (SSF), Sacarificação e Co-fermentação Simultâneas (SSCF) e Bioprocesso Consolidado (CPB)

Figura 11- Esquema de configurações para fermentação



Modificado de Beig et al., (2020)

5.1 HIDRÓLISE E FERMENTAÇÃO SEPARADAS (SHF)

Quando as etapas de hidrólise e fermentação são realizadas separadamente, a configuração é dita Hidrólise e Fermentação Simultâneas. Pode ser feita por meios químicos ou enzimáticos. A principal vantagem da configuração SHF é o fato de que, uma vez otimizados o pH e a temperatura de operação de cada uma das etapas, pode-se operá-la nas condições ótimas tanto da hidrólise quanto da fermentação. Alguns problemas deste método podem ocorrer, como contaminação e perda de açúcares durante a separação de sólidos e líquidos após a realização da hidrólise da celulose. Na etapa de sacarificação do processo SHF, as enzimas são mais propensas a serem inibidas devido aos inibidores presentes no hidrolisado e o processo torna-se mais complicado quanto mais longo o processo reacional (BEIG et al., 2020).

5.2 SACARIFICAÇÃO E FERMENTAÇÃO SIMULTÂNEAS (SSF)

O SSF é um método de fermentação de uma etapa, realizado em um único equipamento, é mais simples de executar e utiliza menos energia (BEIG et al., 2020).

No SSF, a taxa de produção de enzima afeta a taxa de produção de álcool. Além disso, as celulasas usadas para hidrólise e os microrganismos em fermentação geralmente têm diferentes condições ótimas de pH e temperatura. É importante que existam condições compatíveis tanto para a enzima quanto para o microrganismo. Outro problema com SSF é que a maioria dos microrganismos usados para fermentação de glicose não pode utilizar xilose, um produto de hidrólise da hemicelulose (DEVARAPALLI; ATIYEH, 2015).

5.3 SACARIFICAÇÃO E CO-FERMENTAÇÃO SIMULTÂNEAS (SSCF)

No processo de Sacarificação e Co-fermentação Simultânea (SSCF), glicose e xilose são co-fermentadas no mesmo reator. As cepas de *Saccharomyces cerevisiae* e *Zymomonas mobilis* são geneticamente modificadas para co-fermentar glicose e xilose. (DEVARAPALLI; ATIYEH, 2015).

5.4 BIOPROCESSO CONSOLIDADO (CPB)

Outro método de integração de processos é o Bioprocessamento Consolidado (CBP), em que um único microrganismo é usado para as etapas de hidrólise e fermentação. Isso potencialmente reduz os custos de capital e aumenta a eficiência do processo. No entanto, os microrganismos que podem produzir enzimas para hidrólise da biomassa e fermentar os açúcares liberados ainda estão no estágio inicial de desenvolvimento. (DEVARAPALLI; ATIYEH, 2015).

REFERÊNCIAS

BEIG, B.; RIAZ, M.; RAZA NAQVI, S.; et al. Current challenges and innovative developments in pretreatment of lignocellulosic residues for biofuel production: A review. **Fuel**, v. 287, p. 119670, 2020.

CHOUDHARY, J.; SINGH, S.; NAIN, L. Bioprospecting thermotolerant ethanogenic yeasts for simultaneous saccharification and fermentation from diverse environments. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 123, n. 3, p. 342–346, 2017

DEVARAPALLI, M.; ATIYEH, H. K. A review of conversion processes for bioethanol production with a focus on syngas fermentation. **Biofuel Research Journal**, v. 2, n. 3, p. 268–280, 2015.

FURLAN, F. F.; COSTA, C. B. B.; DE CASTRO FONSECA, G.; , AL., E. Assessing the production of first and second generation bioethanol from sugarcane through the integration of global optimization and process detailed modeling. **Computers and Chemical Engineering**, v. 43, p. 1–9, 2012.

GALDOS, M.; CAVALETT, O.; SEABRA, J. E. A.; NOGUEIRA, L. A. H.; BONOMI, A. Trends in global warming and human health impacts related to Brazilian sugarcane ethanol production considering black carbon emissions. **Applied Energy**, v. 104, p. 576–582, 2013.

GIL, I. D.; UYAZÁN, A. M.; AGUILAR, J. L.; RODRÍGUEZ, G.; CAICEDO, L. A. Separation of ethanol and water by extractive distillation with salt and solvent as entrainer: process simulation. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 25, p. 207–215, 2008.

GONZALEZ-CONTRERAS, M.; LUGO-MENDEZ, H.; SALES-CRUZ, M.; LOPEZ-ARENAS, T. Intensification of the 2g bioethanol production process. **Chemical Engineering Transactions**, v. 79, p. 121–126, 2020.

HAMELINCK, C. N.; VAN HOOIJDONK, G.; FAAIJ, A. P. C. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, p. 384–410, 2005. Pergamon.

HAYES, D. J. An examination of biorefining processes, catalysts and challenges. **Catalysis Today**. v. 145 p. 138-151. 2009

LORENZI, B. R.; DE ANDRADE, T. H. N. Second generation ethanol in Brazil: Policies and socio-technical networks. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, v. 34, 2019.

MAESTROVIRTUALE. Lignina: estrutura, funções, extração, degradação, usos. Maestrovirtuale, 2021. Disponível em: <https://maestrovirtuale.com/lignina-estrutura-funcoes-extracaodegradacao-usos/>. Acesso em 30 Set 2021

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA-MME. **RenovaBio**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>. Acesso em: 24 ago. 2021.

MOSIER, N.; WYMAN, C.; DALE, B.; ELANDER, R.; LEE, Y. Y.; LADISCH, M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. **Bioresource technology**, v. 96, n. 6, p. 673-686, 2005

NIJU, S.; SWATHIKA, M. Delignification of sugarcane bagasse using pretreatment strategies for bioethanol production. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 20, p. 101263, 2019.

RABELO, S. C.; AMEZQUITA FONSECA, N. A.; ANDRADE, R. R.; MACIEL FILHO, R.; COSTA, A. C. Ethanol production from enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse pretreated with lime and alkaline hydrogen peroxide. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2600-2607, 2011.

ROBAK, K.; BALCEREK, M. Review of second generation bioethanol production from residual biomass. **Food technology and biotechnology**, v. 56, n. 2, p. 174-187, 2018.

RODRIGUES, J. A. R. Do engenho à biorrefinaria: a usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis. **Química Nova**, v. 34, n. 7, p. 1242-1254, 2011.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H. De; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. "Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol", **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. de. **Bioenergia e Biorrefinaria**: Cana-de-açúcar e espécies florestais. Viçosa: Os Editores, 2013. 551 p.

SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 1-11, 2002.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiology**:. 11. ed., Pearson, 2013.

ZABED, H. et Al. Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: An overview on feedstocks and technological approaches. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 66, p. 751–774, 2016.

APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA AGROINDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA EM SISTEMAS DE COMPOSTAGEM

Olívia Gomes Martins²⁴

Meire Cristina Andrade Cassimiro da Silva²⁵

1. Fundamentos do processo de compostagem aplicado ao aproveitamento de resíduos

1.1. Compostagem e resíduos: definição e benefícios

A compostagem orgânica é um processo biológico, termofílico e controlado, no qual ocorre a biotransformação da matéria orgânica em material humificado, conhecido como composto orgânico. É possível utilizar esse material como fertilizante em diversas culturas agrícolas. Por se tratar de um processo ambientalmente sustentável, esta técnica de gestão de resíduos sólidos tem ganhado contínuo destaque (LOPES; VIDOTTI; MARTINS, 2017).

Na compostagem, microrganismos realizam decomposição aeróbia controlada da matéria orgânica, com geração de calor. O resultado desse processo é um material estável, humificado, sanitizado e que pode ser utilizado no solo sem causar danos ao meio ambiente (VALENTE et al., 2009).

Diversos resíduos sólidos urbanos e agroindustriais podem ser submetidos ao processo de compostagem, como restos de alimentos, palhas, frutos, folhas, esterco, entre outros (SOUZA et al., 2020). É possível também realizar este processo com resíduos orgânicos líquidos, porém é necessário acrescentar a este tipo de resíduo um agente

²⁴ Bióloga, M. Sc., Doutoranda em Agronomia (Energia na Agricultura), FCA/UNESP, oliviagmartins@gmail.com

²⁵ Engenheira Agrônoma, Bióloga, Dra., Docente das Faculdades Galileu, Gran Tietê e Faculdade de Tecnologia de Curitiba, mcnandrade@hotmail.com

estruturante, como casca de arroz e serragem, para alterar suas características físicas de modo a otimizar a sua compostagem. Para ambos os tipos de resíduos, o processo é similar e depende da ação de microrganismos em condições físico-químicas adequadas (VALENTE et al., 2009).

Em função da compostagem ocorrer de forma aeróbia, formam-se, além da biomassa, CO_2 e H_2O como subprodutos, não ocorrendo a formação do CH_4 , ou metano, que é 23 vezes mais poluente que o gás carbônico. Este método de reciclagem de matéria orgânica, além de valorizar os resíduos, evita a disposição destes em aterros, promove a ciclagem de nutrientes, elimina patógenos do material e proporciona economia no tratamento de efluentes, sendo uma alternativa ambientalmente segura de gestão de resíduos (LACERDA et al., 2020).

1.2. O problema dos resíduos e a alternativa de compostagem

O Brasil está entre os dez países que mais desperdiçam alimentos no mundo, com uma estimativa de que 35% da produção agrícola não é aproveitada. Além da alta geração, os resíduos não são tratados e são depositados diretamente em aterros sanitários ou lixões, juntamente com outros tipos de lixo, resultando em impactos ao meio ambiente (SENA et al., 2019).

No gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos, objetiva-se, a princípio, evitar a geração de resíduos. Todavia, na impossibilidade de se evitar a geração destes, deve-se, então, priorizar a reutilização, a reciclagem e o tratamento dos resíduos antes da disposição. Deste modo, só devem ser dispostos em aterros sanitários os resíduos que não puderem ser contemplados em nenhuma das etapas anteriores (LACERDA et al., 2020).

A Lei Federal nº 12.305, regulamentada pelo Decreto nº 7.404, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que, dentre outras providências, também aponta a compostagem como uma destinação final ambientalmente correta, além da reutilização, reciclagem, recuperação e reaproveitamento energético (BRASIL, 2010a; 2010b).

Estima-se que 60% dos resíduos gerados no Brasil são matéria orgânica que pode ser reciclada por compostagem, um processo simples e acessível de tratamento de resíduos. Por esta técnica, gera-se biomassa reaproveitada da matéria orgânica, evitando-se o descarte dessa matéria em aterros, além de outros benefícios ambientais (LACERDA et al., 2020).

1.3. Parâmetros físico-químicos do processo de compostagem

Para a compostagem de resíduos orgânicos, deve-se considerar fatores físico-químicos como temperatura, umidade, pH, granulometria, aeração, relação entre carbono e nitrogênio (C/N), entre outros. Em função destes parâmetros se interrelacionarem e cada material a ser compostado poder apresentar particularidades, estabelecer parâmetros ótimos para a compostagem é desafiador (VALENTE et al., 2009).

1.3.1. Relação C/N

A relação C/N é um índice utilizado para avaliar a biodegradabilidade ou os níveis de maturação de substâncias orgânicas e seus efeitos no crescimento microbiológico, pois a atividade dos microrganismos envolvidos no processo depende principalmente destes dois nutrientes. Deve-se determinar a relação C/N da matéria orgânica a ser compostada para balanço de nutrientes e, do composto, ao fim do processo, para avaliar sua qualidade. O carbono, obtido geralmente dos resíduos palhosos (vegetais secos) é a principal fonte de energia dos microrganismos, enquanto o nitrogênio, oriundo de legumes e folhas (frescos), é importante para a síntese de proteínas (SOUZA et al., 2020).

O excesso de nitrogênio pode ocasionar a morte de microrganismos importantes para o processo de compostagem, bem como levar à volatilização deste nutriente na forma de amônia, resultando em mau odor. A sua falta, porém, dificulta a síntese proteica e, conseqüentemente, o desenvolvimento da microbiota necessária, fazendo com que o processo demore mais (SILVA; DUARTE; ANSELMO, 2017).

Os microrganismos consomem de 15 a 30 vezes mais carbono do que nitrogênio, de modo que se recomenda que a relação C/N fique entre 25-35/1. Ao longo do processo de compostagem, parte do carbono é

liberada na forma de CO₂ e o restante se combina com o nitrogênio para o desenvolvimento microbiano. Em função disso, a relação C/N cai durante o processo, atingindo valores próximos a 18/1 durante a fase de bioestabilização, e valor em torno de 10/1 no composto curado, que é o produto final (BRIETZKE, 2016).

1.3.2. Umidade

A umidade é um dos fatores mais importantes para o metabolismo microbiano e consequente degradação da matéria orgânica na compostagem. Recomenda-se que o teor de umidade do material fique entre 50 e 60%, pois a falta de água (abaixo de 30%) resulta na inibição da atividade microbiana e o excesso (acima de 65%) gera anaerobiose, fazendo com que a decomposição seja mais demorada, além de resultar na perda de nutrientes por lixiviação. Como a matéria orgânica decomposta é hidrófila, o excesso de água satura os micro e os macroporos das partículas, reduzindo a penetração de oxigênio. Além disso, a temperatura do processo de compostagem também pode ser afetada pelo nível de umidade, em consequência do metabolismo microbiano (VALENTE et al., 2009).

Durante a compostagem, o teor de umidade tende a cair, o que pode ser corrigido com irrigação conforme necessidade. O excesso de umidade pode ser corrigido por meio da adição de matéria orgânica estruturante, como palha de trigo, raspas ou serragem de madeira, casca de arroz, palhas, gramas, folhas, entre outros (SILVA; DUARTE; ANSELMO, 2017).

1.3.3. pH

A faixa ideal de pH para o desenvolvimento da microbiota da compostagem é entre 5,5 e 8,5, na qual ocorre a ativação da maioria das enzimas necessárias para o processo, embora a compostagem também possa ocorrer entre 4,5 e 9,5. Valores extremos são autorregulados por meio da produção de subprodutos ácidos ou alcalinos pela microbiota (VALENTE et al., 2009).

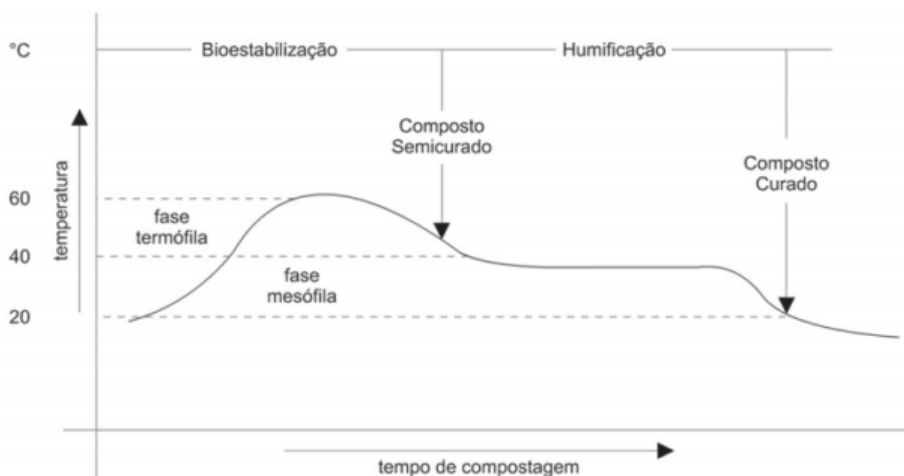
O pH elevado causa diminuição da atividade microbiana, resultando em um maior período de latência, enquanto o pH baixo, embora não impeça o processo, retarda o aumento da temperatura, em função da

inibição de microrganismos termófilos (SOUZA et al., 2020). Todavia, durante a compostagem, ocorrem reações químicas do tipo ácido-base e de óxido-redução, regulando a acidez e gerando um composto com pH entre 7,0 e 8,5 (VALENTE et al., 2009).

1.3.4. Temperatura

No início da compostagem, microrganismos mesófilos consomem os componentes solúveis e facilmente assimiláveis do material, causando aumento da temperatura no interior da leira, em função do metabolismo exotérmico desses microrganismos. Nesta etapa, a temperatura do composto eleva-se de 25 °C para 40-45 °C entre 48 e 72 horas. A partir de 45 °C, os microrganismos mesófilos são suprimidos e se inicia a fase termófila, onde ocorre a maior decomposição dos compostos orgânicos pela microbiota termófila. Conforme esses compostos são consumidos, a temperatura cai novamente até a temperatura ambiente, onde a atividade da microbiota mesófila é restaurada e o composto é humificado a partir da degradação dos compostos mais resistentes (Figura 1) (VALENTE et al., 2009).

Figura 1. Curva padrão da temperatura durante a compostagem



Fonte: SOUZA et al. (2020).

A temperatura é apontada como um parâmetro de eficiência do processo de compostagem, refletindo a dinâmica da microbiota e seu metabolismo. Entretanto, a temperatura pode ser afetada por diversos fatores, como umidade, disponibilidade de nutrientes e tamanho da leira, de modo que a temperatura ambiente do composto não é suficiente para se afirmar que ele está maduro, sendo necessário avaliar a qualidade do material final (SILVA; DUARTE; ANSELMO, 2017).

A temperatura acima de 50°C proporciona a eliminação de microrganismos patogênicos, resultando na sanitização do composto. Todavia, a manutenção de temperaturas acima de 70°C por muito tempo pode causar a insolubilização de proteínas e o desprendimento de amônia, bem como restringir a microbiota do material (VALENTE et al., 2009).

1.3.5. Aeração

A aeração é necessária para a manutenção da decomposição aeróbia, sendo que níveis de oxigênio em torno de 10% já são suficientes para essa condição. Além de manter a aerobiose, a aeração é um mecanismo importante para se evitar temperaturas muito altas, aumentar a oxidação da matéria orgânica, diminuir a liberação de odores e controlar o excesso de água (SILVA; DUARTE; ANSELMO, 2017).

A decomposição aeróbia tem como subprodutos CO₂ e H₂O. Já na decomposição anaeróbia, ou seja, na ausência de oxigênio, gera-se, além de CO₂, CH₄ e ácidos orgânicos de baixo peso molecular. As leiras de compostagem podem ser revolvidas de maneira manual ou mecânica para manutenção da aeração. Entretanto, deve-se evitar a aeração excessiva, pois pode resultar em perda de calor no interior da leira mais rapidamente do que a microbiota é capaz de gerar, além de aumentar a emissão de amônia e óxido nitroso (VALENTE et al., 2009).

1.3.6. Granulometria

A granulometria, ou seja, o tamanho das partículas, impacta diretamente o processo de compostagem, pois quanto menor a granulometria do material, maior será a área para que os microrganismos realizem a digestão e decomposição do material (SOUZA et al., 2020). Por

outro lado, partículas muito finas aumentam a densidade e compactação do material, dificultando a difusão do oxigênio no interior da leira, gerando zonas anaeróbicas, além de dificultar a distribuição dos microrganismos, suas enzimas e metabólitos, diminuindo a eficiência do processo (VALENTE et al., 2009).

Partículas muito grandes, embora ajudem a manter a aeração da leira, reduzem a disponibilidade de carbono para os microrganismos, dificultando a decomposição. Recomenda-se que as partículas do material tenham tamanho entre 20 e 50 mm (VALENTE et al., 2009). O material deve ser triturado e peneirado para se assegurar a homogeneidade e proporcionar melhor aeração e distribuição da temperatura (SILVA; DUARTE; ANSELMO, 2017).

1.3.7. Outros aspectos importantes

As dimensões da leira são um importante fator para assegurar a eficiência do processo de compostagem, pois leiras muito baixas perdem calor e umidade, enquanto leiras muito altas resultam em compactação da base. Recomenda-se que as leiras tenham entre 0,8 e 1,8 m de altura e entre 2,5 e 3,5 m de largura, em formato triangular, para que a aeração seja mantida sem perda excessiva de temperatura e umidade (SOUZA et al., 2020).

Para comercialização do composto, o teor de matéria orgânica exigido é de, no mínimo, 40%. Outro aspecto importante a se considerar é a presença de metais pesados, como arsênio, cádmio, cromo, cobalto, cobre, chumbo, mercúrio, níquel e zinco, sobretudo se o composto for utilizado para atividade agrícola de produção de alimentos (SOUZA et al., 2020).

2. Tipos de biomassas

Com a cultura da cana-de-açúcar, objetiva-se a produção de etanol e açúcar por meio de processos industriais. Em decorrência desse processamento, geram-se subprodutos como a palha e o bagaço (MERCANTE, 2020).

Estima-se que, para cada tonelada de cana-de-açúcar processada, há a geração de 12 toneladas de palha e 12 toneladas de bagaço, biomassas lignocelulósicas de alto poder calorífico (SANTOS et al., 2012).

2.1. Bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço é um subproduto obtido após a moagem da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol e que pode ser utilizado para a produção de bioenergia por meio da queima em caldeiras (MERCANTE, 2020).

A composição deste material é de cerca de 50% de umidade, 45% de fibras lignocelulósicas, 2-3% de sólidos insolúveis e 2-3% de sólidos solúveis, sendo um material de alto valor energético (MERCANTE, 2020). Dessa biomassa lignocelulósica, 32-48% correspondem à celulose, 19-24% à hemicelulose e 23-32% à lignina (SANTOS et al., 2012).

2.2. Palha de cana-de-açúcar

A palha é um subproduto gerado na colheita da cana-de-açúcar, sendo composta de folhas verdes, secas e pontas da cana. Normalmente, fica depositada no solo, trazendo benefícios como proteção à erosão, preservação da funcionalidade e formação de microbiota, porém alguns lugares ainda realizam a queimada, que resulta na emissão de poluentes ao meio ambiente (MERCANTE, 2020). Além dos benefícios ao solo, este material também pode ser utilizado para a produção de etanol de segunda geração (OLIVEIRA et al., 2020).

A composição química deste material varia em função da parte analisada, sendo que, em relação à umidade, as folhas secas apresentam cerca de 13,5%, as folhas verdes, 67,7% e as pontas, 82,3% (MERCANTE, 2020). Quanto ao teor de celulose, pode variar entre 40 e 44%, além de 30-32% de hemicelulose e 22-25% de lignina (SANTOS et al., 2012).

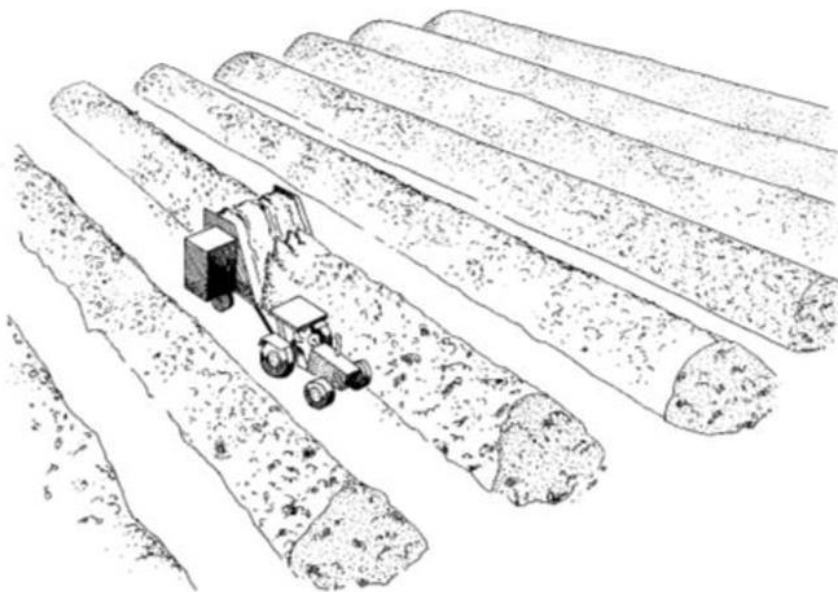
3. Sistemas de compostagem

A decomposição aeróbia da compostagem necessita de aeração, que pode ser obtida por meio de três sistemas principais: o revolvimento mecânico ou manual das leiras, aeração forçada ou aeração passiva (SOUZA, 2015).

3.1. Sistema de leiras revolvidas

Neste sistema, o material é disposto em leiras e revolvido de forma manual ou mecânica (Figura 2), de modo a promover a aeração e fazer com que os microrganismos colonizem todo o material (MANYAPU et al., 2017).

Figura 2. Sistema de leiras revolvidas



Fonte: MANYAPU et al. (2017).

3.2. Sistema de leiras estáticas aeradas

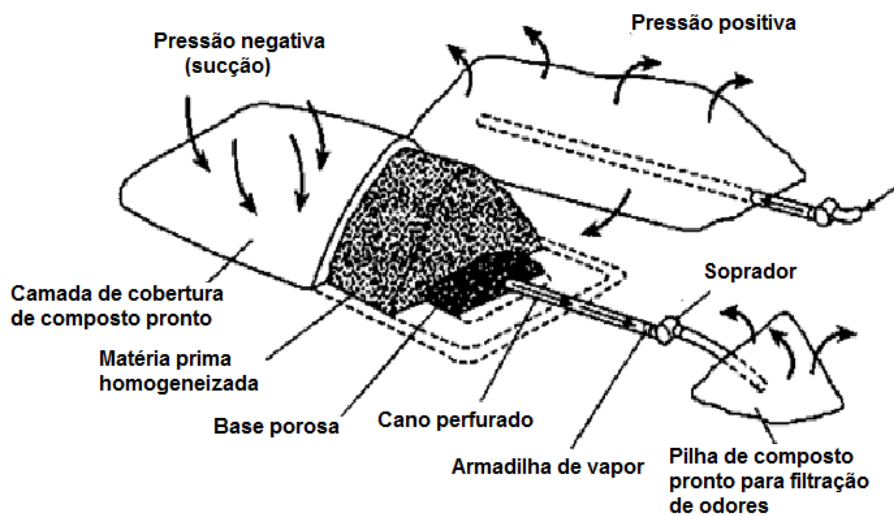
Neste sistema, a aeração pode ser de forma passiva (Figura 3) ou forçada (Figura 4).

Figura 3. Sistema de leiras estáticas com aeração passiva



Fonte: SEYEDBAGHERI (2010).

Figura 4. Sistema de leiras estáticas com aeração forçada



Fonte: Adaptado de Manyapu et al. (2017).

Na aeração passiva, o material é homogeneizado e disposto por cima de canos perfurados, que irão proporcionar aeração por convecção pela leira. Acrescenta-se uma camada externa de composto pronto. Na aeração forçada, sopradores de ar são colocados nas extremidades dos canos, de modo que a frequência e duração da aeração pode ser controlada, normalmente acionada quando a temperatura atinge 65°C (MANYAPU et al., 2017).

3.3. Vantagens e desvantagens dos sistemas

Para decidir qual sistema de compostagem é mais adequado para cada caso, deve-se levar em consideração as particularidades da área e do sistema. No sistema de leiras revolvidas, tem-se como principais vantagens a flexibilidade de se processar volumes variáveis de resíduos e o uso de equipamentos de fácil utilização no revolvimento. Além disso, o teor de umidade pode ser rapidamente controlado no caso de liberação de vapor de água durante o revolvimento, além da geração de um composto homogêneo e de alta qualidade (REIS, 2005). Em contrapartida, esse sistema é altamente trabalhoso, sobretudo se realizado de forma manual; o controle da temperatura pode ser difícil pela liberação de calor, vapor e gases no revolvimento (MANYAPU et al., 2017), o que também pode ocasionar a geração de odores. Ademais, o sistema de leiras revolvidas requer grandes áreas, pois é necessário espaço entre as leiras para a realização do revolvimento, e o monitoramento da aeração deve ser cuidadoso para garantir a elevação da temperatura (REIS, 2005).

No sistema de leiras estáticas, não há a necessidade de grandes áreas, de modo que a área disponível é otimizada, o investimento é baixo por não necessitar de equipamentos de revolvimento (SOUZA, 2015) e os odores são mais facilmente controlados (REIS, 2005). Todavia, neste sistema o tempo para obtenção do composto pronto é maior, podem ser encontrados materiais heterogêneos no composto e é de difícil controle de umidade e temperatura, uma vez que estas variáveis se estabeleçam (MANYAPU et al., 2017), tornando necessário um bom dimensionamento do sistema de aeração e controle dos aeradores durante a compostagem (REIS, 2005).

4. Microbiota da compostagem

4.1. Principais grupos

Na compostagem, tem-se a atuação de fungos, arqueas e, principalmente, bactérias. A dinâmica da microbiota da compostagem é complexa, dependendo tanto dos parâmetros da compostagem quanto das relações ecológicas entre os grupos de microrganismos presentes no composto. Na compostagem, um grupo de microrganismos modifica o ambiente, possibilitando o desenvolvimento de outro grupo. Por exemplo, a degradação inicial por microrganismos mesófilos causa um aumento na temperatura da leira, possibilitando o surgimento de microrganismos termófilos, que novamente são substituídos por mesófilos quando a atividade microbiana e a temperatura são reduzidas (ANTUNES, 2016).

De maneira geral, bactérias da ordem Lactobacillales estão presentes no início do processo, em temperaturas mesofílicas, enquanto que, na fase termofílica, encontra-se majoritariamente microrganismos das ordens Bacillales, Clostridiales e Actinomycetales, sobretudo os gêneros *Bacillus*, *Clostridium*, *Thermus*, *Thermobispora* e *Streptomyces*. Embora o estudo da dinâmica da sucessão da compostagem seja difícil, constatou-se que os filos mais comuns são Actinobacteria, Firmicutes, Bacteroidetes e Proteobacteria (ANTUNES, 2016).

4.2. Formas de atuação

Inicialmente, microrganismos mesófilos convertem o nitrogênio orgânico em nitrogênio amoniacal, parte do qual é perdida por volatilização e parte é convertida em nitratos, acidificando o composto. Em condições anaeróbias, o nitrato é desnitrificado, alcalinizando o composto. Ainda, durante a fase inicial, bactérias e fungos mesófilos irão decompor, por ação enzimática, a fração mais prontamente assimilável da matéria orgânica, como açúcares, amidos e proteínas de fácil digestão. A quebra inicial da matéria orgânica causa aumento da temperatura, levando à fase termofílica (DELGADO, 2017).

Na fase termofílica, a microbiota mesófila é suprimida e tem-se o desenvolvimento de actinomicetos, bactérias e fungos termófilos. Nesta fase, os lipídeos e frações de hemicelulose são degradados por bactérias. Já a celulose e a lignina são degradados por actinomicetos e fungos (DELGADO, 2017), por meio da ação de enzimas, sobretudo celulases, hemicelulases, ligninases e pectinases (ANTUNES, 2016).

5. Possibilidade de uso do composto

5.1. Horticultura

Na horticultura tradicional, o solo é revolvido rotineiramente com enxadas, sendo desestruturado. Neste sentido, a horticultura orgânica proporciona um manejo menos intensivo do solo, com a utilização de fertilizantes orgânicos, como o composto orgânico (SCHWENGBER, 2017).

O composto pode ser aplicado de diversas formas. Pode ser utilizado como cobertura superficial, espalhando-o sobre o solo e realizando o plantio; incorporado no solo em uma profundidade de 2 a 10 cm, de forma manual ou com maquinário; utilizado em sulcos, depositando-se o composto nas linhas ao lado onde será feito o plantio; ou em covas, misturando-o com o solo para realizar o plantio ou transplantio (SENAR, 2009).

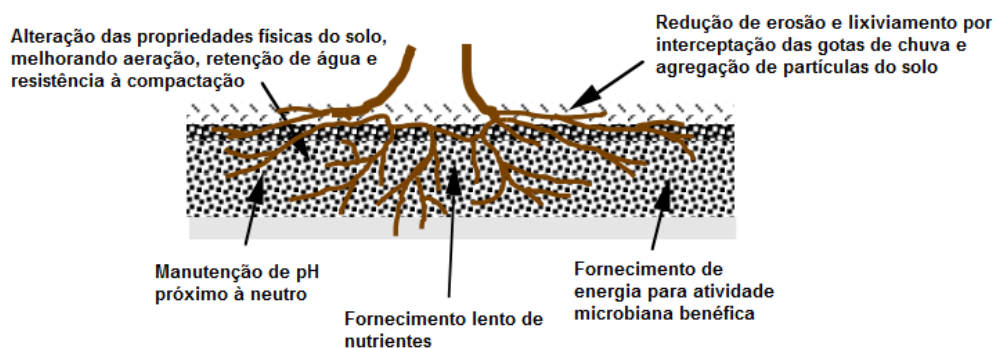
As vantagens da utilização do composto na horticultura são o aumento do rendimento da planta, redução do uso de fertilizantes, melhor utilização da irrigação, aumento da resistência da planta contra pragas e doenças, maiores teores de matéria orgânica no solo, maior disponibilidade de água e nutrientes para as plantas, melhor estruturação do solo e redução de fitopatógenos e pragas no solo (PAULIN; O'MALLEY, 2008).

5.2. Silvicultura

A utilização do composto na silvicultura pode superar os benefícios da utilização de fertilizantes comuns. Dentre os benefícios, destacam-se a melhoria na qualidade do solo, fornecimento de macro e micronutrientes, adição de matéria orgânica, fornecimento de microrganismos benéficos ao

solo, estabilização do pH, capacidade de imobilização ou degradação de alguns poluentes e melhoria da qualidade da água, o que irá proporcionar melhores condições para o estabelecimento e crescimento das plantas, tanto de árvores quanto de vegetação rasteira (HENRY, BERGERON, 2005). A Figura 5 exemplifica a atuação do composto no solo para silvicultura.

Figura 5. Benefícios da utilização de composto na silvicultura



Fonte: Adaptado de Henry e Bergeron (2005).

É possível utilizar o composto para reflorestamento de áreas desmatadas e erodidas, como beiras de estradas, locais de mineração, locais campestres e áreas queimadas. Deve-se levar em consideração o declive da área a ser restaurada, de modo que áreas muito íngremes podem não reter o composto eficientemente. A aplicação pode ser em uma ou várias camadas, a depender da necessidade, com utilização de maquinário adequado (HENRY; BERGERON, 2005).

5.3. Fungicultura

Para o cultivo de cogumelos, deve-se escolher corretamente o substrato, levando-se em consideração os seus teores de carbono e nitrogênio. Comumente, são utilizadas palhas, capins e outros resíduos agrícolas, com ou sem suplementação de nitrogênio (ALQUATI, 2015). A Tabela 1 contém a composição do substrato tradicional para compostagem para o cultivo do cogumelo *Pleurotus ostreatus* (shimeji branco).

Tabela 1. Formulação tradicional de composto para cultivo de *Pleurotus ostreatus* por compostagem.

	U (%)	Peso úmido (Kg)	Peso seco (Kg)	C (%)	C (Kg)	N (%)	N (Kg)
Palha de cana	6	200,00	188,00	48,00	90,24	0,50	0,94
Farelo de trigo	6	24,00	22,56	46,00	10,38	2,50	0,65
Total		224,00	210,65		100,62		1,50
Calcário (3%)		6,3					
Gesso (1%)		2,1					
						C/N _{final}	67

Legenda: U= Umidade; C= Carbono; N= Nitrogênio.

Fonte: Adaptado de Siqueira (2015).

Este material pode ser compostado seguindo as etapas descritas na Figura 6. Recomenda-se a realização deste processo em barracão aberto, com cobertura em chapa galvanizada e piso de concreto. Antes de formar as leiras, na fase de pré-compostagem, deve-se umedecer as palhas a aproximadamente 75%, revirando-as a cada 2 dias (Figura 7A). Após essa fase, montam-se as leiras de compostagem (Figura 7B), que deverão ser reviradas também a cada 2 dias. Pode-se acrescentar mais água na Fase I, durante as reviradas, conforme a necessidade, para se manter a umidade média de 75%. Este processo pode ser realizado manualmente com mangueira. Para a Fase II, o substrato deve ser pasteurizado por 8 horas a $62^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e condicionado por 4 dias a $48^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, em pasteurizador ou câmara climatizada, seguido de resfriamento natural por 3 dias até atingir temperatura ambiente (SIQUEIRA, 2015).

Figura 6. Fases do processo de compostagem

Dias	Atividade	Procedimento	Fase
-6	Pré-umedecimento	Umedecimento das palhas	Pré-compostagem
-4		Revirada e umedecimento das palhas	
-2		Revirada e umedecimento das palhas	
0	Montagem das leiras	Adição da 1. ^a metade de farelo de soja, ureia e calcário.	Compostagem Fase I
2	1. ^a Revirada	Adição da 2. ^a metade de farelo de soja, ureia e calcário.	
4	2. ^a Revirada	Adição da 1. ^a metade de gesso	
6	3. ^a Revirada	Adição da 2. ^a metade de gesso	
8	Pasteurização	Temperatura de $62^{\circ}\text{C} \pm 2$ por 8 horas	Compostagem Fase II
9	Condicionamento	Temperatura de $48^{\circ}\text{C} \pm 2$ por 8 dias	
12		Composto com 25°C pronto para ser inoculado	

Fonte: SIQUEIRA (2015).

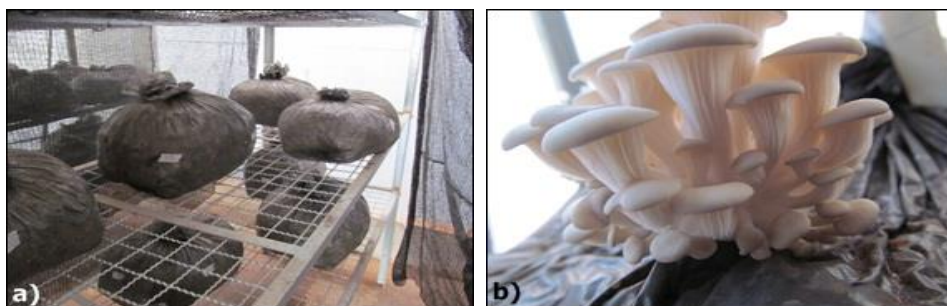
Figura 7. (A) Pré-umedecimento da palha de cana-de-açúcar. **(B)** Montagem das leiras de compostagem



Fonte: SIQUEIRA (2015).

Em seguida, o composto deve ser ensacado e inoculado com a linhagem fúngica desejada. Recomenda-se uma proporção de inóculo de 40g Kg^{-1} de massa fresca do composto. Este procedimento deve ser realizado em condições assépticas para se evitar contaminação, higienizando-se os utensílios com álcool 70%. Após inoculados, os pacotes devem ser incubados (Figura 8A) por 30 dias a uma temperatura média de 25°C e umidade relativa de 55% a 70%. O período de frutificação (Figura 8B) e colheita é de cerca de 60 dias. A colheita deve ser feita segurando-se a base do cacho de cogumelos e torcendo-o gentilmente, destacando-o do pacote (SIQUEIRA, 2015).

Figura 8. (A) Incubação **(B)** Início da frutificação



Fonte: SIQUEIRA (2015).

6. Aspectos legais, institucionais e mercadológicos

6.1. Normas a serem observadas

A Instrução Normativa nº 25 de 23/07/2009, da Secretaria de Defesa Agropecuária do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, instrui sobre fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Os fertilizantes orgânicos cuja matéria prima é de origem vegetal, animal ou da agroindústria, sem a utilização de metais pesados, tóxicos e elementos ou compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos, cujo resultado seja um produto seguro para utilização na agricultura, são classificados como Classe “A”. Para esta classificação, deve-se observar os seguintes parâmetros: umidade máxima de 50%, nitrogênio total mínimo de 0,5%, carbono orgânico mínimo de 15%, pH mínimo de 6,0 e relação C/N máxima de 20/1 (BRASIL, 2009).

6.2. Responsabilidade da empresa de compostagem

O composto a ser comercializado é de total responsabilidade da empresa de compostagem, cabendo à empresa atender os parâmetros técnicos especificados pela legislação vigente. Deste modo, mesmo que o processo de compostagem para obtenção do produto final seja terceirizado, a empresa que irá comercializar o composto deve manter controle sobre o procedimento, adotando diferentes estratégias, fixando padrões operacionais, obtendo dados analíticos e verificando a qualidade do produto (FERNANDES; SILVA, 1999). Portanto, deve-se atentar à origem do material, presença ou não de metais pesados e elementos potencialmente tóxicos, bem como a conformidade aos parâmetros técnicos.

6.3. Aspectos mercadológicos

Embora não haja parâmetros fixos de preço de venda do composto, esse valor deve ao menos suprir os custos de operação da empresa que o comercializa. Deste modo, o preço pode variar em função da qualidade do produto, da infraestrutura, do maquinário necessário para produzi-lo e da demanda do mercado. Recomenda-se adotar estratégias de marketing para

se expor os benefícios agrônômicos, a segurança e as vantagens financeiras da utilização do composto para os consumidores. Neste sentido, uma possibilidade de divulgação é a realização de palestras e cursos práticos com a aplicação do composto, com dias de campo para que o público possa averiguar os resultados de sua utilização. É importante a figura do engenheiro agrônomo, que presta apoio técnico à empresa e aos agricultores. Ademais, é possível adotar convênios com órgãos estaduais ou federais de extensão rural, objetivando-se a introdução do produto e orientações sobre seu uso (FERNANDES; SILVA, 1999).

REFERÊNCIAS

ALQUATI, G. P. **Potencial de resíduos orgânicos coletados em vias públicas de Bauru - SP para o cultivo de *Ganoderma lucidum***. 2015. 34 f. Universidade do Sagrado Coração, Bauru, 2015.

ANTUNES, L. P. **Metagenômica e metatranscritômica da microbiota da compostagem do Parque Zoológico de São Paulo**. 2016. 106 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

BRASIL. **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010**. Regulamenta a Lei nº 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 23 dez. 2010b.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 03 ago. 2010a.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Instrução Normativa nº 25 de 23 de julho de 2009**. Diário Oficial, Brasília, DF, n. 142, 28 jul. 2009. Seção 1, p. 20

BRIETZKE, D. T. **Avaliação do processo de compostagem considerando a relação carbono/nitrogênio**. 2016. 60 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016.

DELGADO, R. F. de A. **Avaliação potencial de fungos obtidos durante processo de compostagem para produção de celulase (FPase)**. 2017. 52 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos) - Universidade Federal de Campina Grande, Sumé, 2017.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. da. **Manual prático para a compostagem de bio sólidos**: lodo. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 84 p.

HENRY, C.; BERGERON, K. **Compost use in forest land restoration**. Washington: EPA. EPA number: EPA832-R-05-004, 2005.

LACERDA, K. A. P.; MORAES, J. V. de Q.; SILVA, Y. G.; OLIVEIRA, S. L. De. Compostagem: alternativa de aproveitamento dos resíduos sólidos utilizando diferentes modelos de composteiras. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 6, n. 6, p. 40753–40763, 2020.

LOPES, I. G.; VIDOTTI, R. M.; MARTINS, A. L. M. Compostagem orgânica: método eficiente para a gestão de resíduos de animais da aquicultura. **Pesquisa & Tecnologia**, Campinas, v. 14, n. 1, p. 1–6, 2017.

MANYAPU, V.; SHUKLA, S.; KUMAR, S.; RAJENDRA, K. In-vessel composting: a rapid technology for conversion of biowaste into compost. **Open Access International Journal of Science & Engineering**, [s. l.], v. 2, n. 9, p. 58–63, 2017.

MERCANTE, A. L. P. **Geração de bioeletricidade, através do bagaço e da palha da cana-de-açúcar**. 2020. 36 p. Monografia (Engenharia Agrônoma) - Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2020.

OLIVEIRA, M. H. R.; SOUSA, A. E. C.; OLIVEIRA, R. S.; AGUAS, M. A.; SILVA ÁVILA, E. A.; SILVA, W. R.; PEREIRA, D. R. M.; COUTO, C. A. Gestão dos resíduos pós colheita da cana-de-açúcar no cerrado: uso da palhada versus contribuição econômica. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 6, n. 1, p. 3406–3421, 2020.

PAULIN, B.; O'MALLEY, P. Compost production and use in horticulture. **Boletim técnico - Department of Agriculture and Food**, Perth, n. 4746, 28 p., 2008.

REIS, M. F. P. **Avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos urbanos**. 2005. 239 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H. De; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, São Paulo, v. 35, n. 5, p. 1004–1010, 2012.

SCHWENGBER, J. E. Olericultura: Compostagem laminar e tutores vivos. In: WOLFF, L. F.; MEDEIROS, C. A. B. (Ed.). **Alternativas para a diversificação da agricultura familiar de base ecológica**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2017. p. 82–89.

SENA, L. M.; DE ARRUDA, J. F.; COSTA, F. R. D. S.; ALMEIDA, F. B. B. De; BRITO, P. O. B. De; GONDIM, F. A. Compostagem e vermicompostagem como alternativa para tratamento e de destinação de resíduos orgânicos. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 14, n. 2, p. 266–272, 2019.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL – SENAR. **Olericultura orgânica: Compostagem**. 1. ed. São Paulo: SENAR, 2009. 55 p.

SEYEDBAGHERI, M. M. Compost: production, quality, and use in commercial agriculture. **University of Idaho, College of Agricultural and Life Sciences. CIS**, v. 1175, 2010.

SILVA, R. L. M. da S.; DUARTE, J. vieira do N.; ANSELMO, M. da G. V. Fatores intervenientes no processo de compostagem de resíduos sólidos orgânicos. In: ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE - 2017, João Pessoa. **Anais [...]** João Pessoa: Ecogestão Brasil, 2017.

SIQUEIRA, O. A. P. A. **Novos substratos para o cultivo de *Pleurotus ostreatus* utilizando composto exaurido**. 2015. 26 p. Monografia (Iniciação Científica) - Universidade do Sagrado Coração, Bauru, 2015.

SOUZA, L. A. **Análise dos métodos de leira estática e de revolvimento manual na compostagem de resíduos orgânicos gerados em restaurante universitário.** 2015. 62 p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2015.

SOUZA, L. A. De; CARMO, D. de F. Do; SILVA, F. C. Da; PAIVA, W. de M. L. Análise dos principais parâmetros que influenciam a compostagem de resíduos sólidos urbanos. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 194–212, 2020.

VALENTE, B. S.; XAVIER, E. G.; MORSELLI, T. B. G. A.; JAHNKE, D. S.; BRUM JR., B.; CABRERA, B. R.; MORAES, P.; LOPES, D. C. N. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Archivos de Zootecnia**, Córdoba, v. 58, n. 224, p. 59–85, 2009.





Autores

Alessandro Aparecido Felice
Alex dos Santos
Alex Rodrigo Aguilera
Antonio Bestana Neto
Bruno Novaes Menezes Martins
Carla Gheler-Costa
Carlos Alves de Oliveira
Daniele Scudeletti
Diego Antônio Biondo
Dile Pontarolo Stremel
Elisa Fidêncio de Oliveira
Erlene Romeiro Alves
Fábio Henrique Comin
Gilberto Sabino dos Santos Junior
Ivan Leandro Coletti
Junior Cesar Souza e Silva
Letícia Galhardo Jorge
Luciano Martins Verdade
Luiz Vitor Crepaldi Sanches
Marcio Gonçalves Campos
Meire Cristina Andrade Cassimiro da Silva
Natália Oliveira Totti de Lara
Olívia Gomes Martins
Victor Gonçalves Cremonez
Vinícius Fernandes Canassa

ISBN 978-85-5973-190-3



Editora
pessotto