

CAPÍTULO 25

25 SISTEMA IRRIGADO DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL: HISTÓRIA, MITOS E DESAFIOS

Vinicius Bof Bufon, Felipe Cardoso de Oliveira Maia e Rodrigo Moura Pereira

Resumo

No setor sucroenergético, os termos irrigação e fertirrigação não estão associados ao Sistema Irrigado de Produção, com irrigações ao longo de todo ciclo da cultura, sempre que necessário, mas à prática de distribuir vinhaça e água residuária ou, ainda, ao salvamento – aplicação, imediatamente após a colheita, de uma única lâmina de 40 a 60 mm de água pura, ou com algum grau de mistura com vinhaça e água residuária, visando melhor brotação dos canaviais colhidos no período seco. Nas últimas quatro décadas, sobretudo na última, uma grande transição tecnológica ocorreu no setor sucroenergético. Adicionalmente, houve importante transição geográfica, e a produção que se concentrava no bioma Mata Atlântica migrou gradativamente para o Bioma Cerrado. Entre 1975 e 2015, a área colhida de cana-de-açúcar no Cerrado aumentou de 490 mil hectares para cerca de 5 milhões de hectares, ou seja, de 25% para 49% (BOLFE *et al.*, 2020). Em 2017, mais da metade da produção sucroenergética já estava no Cerrado. Apesar das vantagens que impulsionaram a cana-de-açúcar para o Cerrado, a concentração do período chuvoso em poucos meses e a baixa capacidade de retenção de água de seus solos implicam em baixa chuva efetiva e reduções da evapotranspiração frequentemente superiores a 50% do potencial. As crises hídrica e econômica da última década levaram à falência dezenas de usinas e, dentre as que sobreviveram, acelera-se o interesse e investimentos em sistema irrigado de produção. Apesar disso, o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar ainda não ocupa área expressiva no setor sucroenergético brasileiro. Do universo de quase 400 usinas e destilarias operando no país, menos de 2% possuem alguma fração expressiva e, menos de 1% possuem a maior fração de seus canaviais sob sistema irrigado de produção. No entanto, a acentuação dos efeitos negativos das secas, cada vez mais frequentes e mais severas tem gerado uma grande onda de interesse no sistema irrigado de produção. São inúmeras as vantagens técnicas, sociais, financeiras e ambientais da verticalização promovida pelo sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar. E não há, por enquanto, nenhum outro novo sistema de produção ou manejo agrônomico que possa trazer, em curto e médio prazo, impactos tão substanciais na lucratividade, competitividade e sustentabilidade do setor sucroenergético brasileiro. Por essas razões cresce o consenso de que o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar será, muito em breve, a nova realidade brasileira, ocupando grande fração da área produtiva. Para acelerar o ganho de escala do sistema irrigado de produção no país, duas frentes precisam ser trabalhadas. A primeira diz respeito à desconstrução de alguns mitos e, a segunda, ao avanço da inovação tecnológica para o estabelecimento de premissas e protocolos cada vez mais sólidos para assegurar ganhos de sustentabilidade econômica, social e ambiental para o setor sucroenergético.

25.1 Introdução

Além de explicar o diferente significado dos termos irrigação e fertirrigação no setor sucroenergético, esse capítulo ainda pretende tratar da história do uso da irrigação de cana-de-açúcar no Brasil, e de como a transição tecnológica e geográfica, associada ao

agravamento dos efeitos negativos das mudanças climáticas globais, e de crises hídricas e econômicas culminaram numa nova tendência – a migração de parte substancial da produção de cana-de-açúcar do Brasil para o sistema irrigado de produção.

25.2 Alinhando conceitos

No setor sucroenergético, os termos irrigação e fertirrigação ganham conotação distinta da utilizada para outras culturas, pois são empregados para distribuição da vinhaça e água residuária, resíduos da indústria, visando fornecimento de nutrientes e solução do passivo ambiental.

No sentido estrito, empregado em outras culturas e lugares do mundo, a irrigação, ou sistema irrigado de produção, significa a alteração do sistema de produção de sequeiro através da redução da deficiência hídrica ao longo do ciclo da cultura, utilizando equipamentos de irrigação para não mais depender exclusivamente da chuva. E, a fertirrigação, diz respeito ao fornecimento fracionado da demanda nutricional da cultura, ao longo do ciclo, utilizando a água da irrigação como veículo para adubação. O objetivo é buscar ganhos de eficiência na absorção de nutrientes, ganhos de produtividade, e redução dos custos de adubação.

Há ainda outro tipo de operação muito característica do setor sucroenergético que, se não for bem compreendida, pode também ser confundida com um sistema irrigado de produção. Essa operação é chamada de **salvamento**.

25.2.1 Irrigação-fertirrigação com vinhaça e água residuária

Os volumes aplicados são calculados, geralmente, em função da necessidade de suprimento anual de potássio. Como resultado, aplica-se uma única lâmina de aproximadamente 15 mm ($150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) imediatamente após a colheita do canavial.

O momento de aplicação da vinhaça e água residuária raramente obedecem a uma lógica de redução do *deficit* hídrico, dado que é definida pela demanda de descarte do resíduo produzido pela indústria, faça chuva ou faça sol. Normalmente, quando se decide por aplicar uma lâmina maior que 15mm, a razão não costuma estar associada à identificação de áreas com maior deficiência hídrica, mas a falhas de gestão ou falta de infraestrutura para distribuição uniforme em maiores áreas. Configuram-se assim as chamadas áreas de sacrifício, que recebem descarte de vinhaça e água residuária em excesso. Hoje a legislação ambiental inibe a existência dessas áreas de sacrifício.

A água que compõe a vinhaça e a água residuária é, majoritariamente, oriunda da própria cana, que é composta por, aproximadamente, 72% de água. Além da água da própria cana, a indústria também capta diretamente de cursos d'água cerca de 0,5 a $1,5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ de cana processada para uso em seus processos. Os processos de reciclagem e reúso de água na indústria são muito eficientes, com ciclos praticamente fechados, e estão em constante aprimoramento. Ainda assim, a água captada, somada à da própria cana, é alvo de reúso nas lavouras através da distribuição da vinhaça e água residuária.

Visando aumentar a fração de seus canaviais que recebem nutrientes da vinhaça, as usinas têm investido em concentradores de vinhaça e aplicação localizada tratorizada. Como resultado, a área que recebe vinhaça é ampliada. Mas, ao invés de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, os canaviais recebem de 5 a $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, uma fração ainda menor da demanda hídrica da cana, distanciando ainda mais essa prática do conceito intrínseco de irrigação ou sistema irrigado de produção.

25.2.2 Salvamento

Trata-se da aplicação, imediatamente após a colheita, de uma única lâmina de 40 a 60 mm de água pura, ou com algum grau de mistura com vinhaça e água residuária, visando melhor brotação dos canaviais colhidos no período seco. Por isso, o objetivo do salvamento não é fazer a suplementação da deficiência hídrica ao longo do ciclo da cultura e sim garantir seu estabelecimento na fase inicial.

Semelhantemente à aplicação de vinhaça e água residuária, o salvamento é realizado com equipamento de aspersão tipo autopropelido, também chamado de carretel enrolador, e infraestrutura móvel de adutoras e motobombas à diesel.

Comparada à demanda hídrica total de um ciclo de 12 meses da cana, a lâmina de salvamento é maior do que a entregue na aplicação de vinhaça, mas ainda representa menos de 2% da demanda hídrica da cana-de-açúcar no Cerrado, por exemplo. Portanto, não se deve caracterizar o canavial que recebe salvamento como se estivesse sob sistema irrigado de produção.

25.2.3 Sistema irrigado de produção

No **Sistema Irrigado de Produção**, faz-se a suplementação da chuva com irrigações ao longo do ciclo da cultura visando a redução da deficiência hídrica. Mas é fundamental compreender que o **sistema irrigado de produção** não se trata da simples adição de água sobre um sistema de produção de sequeiro. Aqui, provavelmente, reside a razão de algumas experiências mal sucedidas com irrigação de cana no passado. Quando a água deixa de ser o fator mais limitante da produção, outros fatores assumem essa condição. Por isso, um sistema irrigado de produção propriamente dito, ajusta todos os outros aspectos agronômicos para otimizar e verticalizar a produção. Caso contrário, o padrão agronômico de sequeiro se tornaria limitante para o potencial produtivo da área irrigada.

Sistemas irrigados de produção de cana-de-açúcar podem ser implantados com pivô central (fixo ou rebocável), pivô linear, e gotejamento subsuperficial, sempre buscando redução considerável da deficiência hídrica ao longo do ciclo produtivo.

Atualmente, o sistema irrigado de produção não ocupa fração significativa do setor sucroenergético brasileiro, apesar do crescente interesse.

25.3 Transição tecnológica e geográfica para produção irrigada

Por séculos, a produção de cana-de-açúcar brasileira se concentrou nas regiões litorâneas, sobretudo nas várzeas e tabuleiros costeiros da Mata Atlântica, na região Nordeste do Brasil. Entre as décadas de 1930 e 1970, a produção canavieira migrou lentamente para o interior de São Paulo, mas ainda em ambiente de Mata Atlântica (RODRIGUES; ROSS, 2020). Esses ambientes ofertavam disponibilidade hídrica adequada para produção de sequeiro, sobretudo considerando o baixo padrão agronômico e níveis de produtividade almejados à época (ANDRADE, 1958; EISENBERG, 1977; PERRUCCI, 1978; ANDRADE, 2005). Em meados da década de 1950, nos tabuleiros costeiros de Alagoas, a irrigação começou a ser adotada, de maneira ainda modesta, para mitigação da deficiência hídrica em meses secos (ANDRADE, 2005).

Nas décadas de 1960 a 1980, com a expansão da produção para os estados do Rio de Janeiro e São Paulo, o significado da palavra irrigação no setor passou a se desviar do objetivo intrínseco da tecnologia – reduzir a deficiência hídrica, passando a significar então a distribuição de vinhaça e água residuária, antes descartados diretamente nos rios (SZMRECSÁNYI, 1988; MELO, 2009).

Entre as décadas de 1970 e 1990, o uso da irrigação em cana-de-açúcar para redução da deficiência hídrica ganhou espaço no Nordeste. Mas isso ocorreu ao mesmo tempo em que o setor iniciava seu declínio na região. Nesse período, apesar da irrigação continuar ganhando espaço, o uso de vinhaça e água residuária já representava a principal razão da utilização dos equipamentos de irrigação na região Nordeste (CARVALHO, 2002).

A partir da década de 1970, nas principais regiões produtoras, o aumento da pressão demográfica causou elevação do custo e da fragmentação das terras em propriedades menores (COSTA; MONDRADO, 2013). Além disso, ciclos de achatamento de margens de lucro de *commodities* e pressão por ganho de escala produtiva e competitividade, motivaram a busca por módulos rurais maiores, menor fragmentação das propriedades, melhor topografia e redução do custo da terra (BACCHI; VALDES, 2013). Ou seja, o cenário econômico e social pressionou a expansão da cana-de-açúcar para ambientes com maior deficiência hídrica e menor fertilidade de solos no Cerrado (VIANNA; SENTELHAS, 2014; MARQUES *et al.*, 2020). Além disso, a partir da década de 1970, o governo federal também vinha implementando programas de incentivo para a produção e ocupação do Cerrado (PIRES, 2000). Por essas razões, gradualmente, e sobretudo na década de 1990, aumentou o interesse de desenvolvimento da agroindústria canavieira na região central do Brasil.

O Cerrado apresenta um clima típico de savana tropical úmida, com estação seca distinta entre abril e outubro e precipitação média anual entre 750 e 2000 mm. Apesar do volume anual de chuvas não ser tão distinto do bioma Mata Atlântica, podendo ser até maior em alguns lugares, sua distribuição é irregular, concentrada majoritariamente entre os meses de novembro e março (OLIVEIRA-FILHO; RATTER, 2002; MARCUZZO *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2012). Como na produção de sequeiro, entre eventos de chuva, a planta se sustenta somente através da água armazenada no solo (BERNARDO *et al.*, 2019), o risco de *deficit* hídrico também varia conforme a capacidade de retenção de água de cada solo (VIANNA; SENTELHAS, 2014). No Cerrado os solos são mais intemperizados e, por isso, além dos arenosos, solos com elevado teor de argila, como os ácricos, também apresentam baixa capacidade de retenção de água (PRADO, 2013).

Um conceito muito importante para compreender a maior deficiência hídrica no Cerrado é o de precipitação efetiva (Pef), aquela fração da chuva que é, de fato, absorvida e utilizada pelas plantas (TONELLO *et al.*, 2014). Nesse bioma, o percentual da precipitação que se torna efetiva é pequeno, em virtude da grande concentração da precipitação em poucos meses do ano, resultando numa grande fração dessa chuva que escoia diretamente para rios e lagos, e percola para o lençol freático, abaixo da zona radicular, antes que a planta consiga utilizá-la.

A combinação entre a maior demanda hídrica da planta adulta com os meses mais secos, baixa capacidade de retenção de água dos solos, e baixa Pef, faz do Cerrado um ambiente de *deficit* hídrico limitante para a cana-de-açúcar, com reduções da evapotranspiração frequentemente superiores a 50% do potencial (RODRIGUES *et al.*, 2014).

No início da expansão para o Cerrado, sobretudo para o interior de São Paulo, a migração ocorreu para regiões de transição com Mata Atlântica, onde a distribuição das chuvas e os solos eram semelhantes aos encontrados nessa região (ANDRADE, 1994; VIAN, 2007; RODRIGUES; ROSS, 2020). Contudo, ao final da década de 1990, intensificou-se a expansão para o interior do Cerrado (FILOSO, 2015; CHERUBIN, 2016). Neste momento, apostava-se que a rusticidade da cana-de-açúcar lhe conferiria o mesmo padrão de desempenho das lavouras em bioma Mata Atlântica, mesmo migrando para regiões de maior deficiência hídrica. A expansão do bioma Mata Atlântica

para o bioma Cerrado ocorria com pouco ou nenhum ajuste do sistema de produção para absorver os impactos desse maior *deficit* hídrico. O emprego da irrigação para redução da deficiência hídrica representava uma fração irrisória da área produtiva de cana-de-açúcar no Brasil – uma exceção. E a pesquisa para o desenvolvimento de um sistema de produção irrigado para cana-de-açúcar caminhava no mesmo ritmo.

Na década de 2000, em novo momento de expansão do setor sucroenergético brasileiro, *greenfields* se espalharam aceleradamente pelo Cerrado em um movimento que ainda priorizava a velocidade da expansão em detrimento da qualidade de implantação e manutenção dos canaviais. Logo, os efeitos da maior deficiência hídrica começaram a afetar destacadamente o desempenho do setor sucroenergético brasileiro. A baixa qualidade de operações de implantação, condução e colheita dos canaviais que, ocasionalmente, pelo melhor regime hídrico, ainda permitiam níveis aceitáveis de produtividade e longevidade em ambiente de Mata Atlântica, agora desafiavam a sustentabilidade do setor sucroenergético no Cerrado. A produtividade caía e a longevidade dos canaviais, frequentemente, recuava dos convencionais 6 a 8 cortes em bioma Mata Atlântica para 4, 3, ou até 2 anos. Junto com crises financeiras e os desafios da transição para plantio e colheita mecanizados, a deficiência hídrica resultava em estagnação ou declínio da produtividade média e competitividade do setor sucroenergético nacional (GOUVÊA *et al.*, 2009).

Nesse momento, sobretudo em usinas com maior experiência de produção no Cerrado, intensificou-se o aperfeiçoamento dos projetos de distribuição de vinhaça e água residuária, além da adoção do salvamento. No entanto, ainda eram raras as iniciativas de adoção de sistema irrigado de produção. Por vezes, algumas iniciativas exploratórias de implantação de equipamentos de irrigação em canaviais com manejo agrônomo de sequeiro indicavam potencial de resposta à irrigação. Mas a inexperiência e ausência de tecnologia desenvolvida para sistema irrigado de produção de cana no Brasil conduziam os resultados para ganhos não tão expressivos de produtividade, sobretudo quando contrastados com os custos ainda muito elevados de aquisição dos equipamentos de irrigação.

25.4 Crises hídrica e econômica

Na década de 2010, o Cerrado já representava, aproximadamente, metade da área de cana-de-açúcar brasileira, e o ritmo de expansão nesse bioma ainda é substancialmente superior aos demais. (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017; CASTILLO, 2015; GAROFALO *et al.*, 2020). Mas o *deficit* hídrico dessa região tem se agravado com a redução do volume precipitado e o encurtamento da estação chuvosa (MACENA *et al.*, 2009; CAMPOS; CHAVES, 2020). Além disso, há evidências de que as mudanças climáticas globais podem aumentar ainda mais a deficiência hídrica da cana-de-açúcar no Cerrado (CARDOZO; SENTELHAS, 2013; SANTOS; SENTELHAS, 2014; DIAS; SENTELHAS, 2019), o que, além de reduzir o potencial produtivo, encurtaria ainda mais a janela adequada de plantio (VIANNA; SENTELHAS, 2014) e elevaria os custos de produção.

Essa intensificação da expansão para o Cerrado e o agravamento do *deficit* hídrico motivaram a Embrapa Cerrados, em 2008, a iniciar seus trabalhos de pesquisa para o setor. Sua ampla experiência em aprimoramento e desenvolvimento de sistemas de produção para o Cerrado, aliado à visão de que havia grande potencial genético não explorado nas variedades de cana existentes, direcionou os esforços para o aprimoramento e desenvolvimento de novos sistemas de produção de cana para este bioma. Nesse contexto, acreditava-se que não haveria outro fator de produção, além da água, capaz de impactar tão fortemente em médio e longo prazo a verticalização da

produção, competitividade e sustentabilidade ambiental da produção sucroenergética brasileira.

A pesquisa para o desenvolvimento de um sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar para o Cerrado brasileiro ganhou força. O interesse e incentivo no setor vinha de alguns poucos produtores de regiões de maior deficiência hídrica do Cerrado, ou que tinham alguma experiência com outras culturas irrigadas, ou mesmo de produtores tradicionais do bioma Mata Atlântica com perfil mais inovador. Mas a maior parte dos produtores ainda se mostravam muito relutantes em acreditar no potencial ou viabilidade econômica da tecnologia. Esse fenômeno é muito semelhante ao identificado nos primórdios da produção irrigada de diversas outras culturas, como café e laranja. Mas, atualmente, são raros os empreendimentos de produção dessas culturas que não são concebidos sob sistema irrigado de produção.

No início, mesmo em instituições de pesquisa, muitas das iniciativas de produção irrigada de cana ainda estavam associadas à simples adição de água sob um sistema de sequeiro, que acabavam por reforçar os resultados economicamente ainda pouco expressivos. Mas também já começavam a surgir alguns resultados que mostravam um potencial muito diferente de tudo que já se havia experimentado no setor.

Após 2013, as crises hídrica e econômica vivenciadas pelo setor levaram à falência dezenas de usinas e, dentre as que sobreviviam, acelerava-se o interesse e investimentos em sistema irrigado de produção. Evidenciava-se que, num horizonte muito próximo, este novo sistema seria considerado uma trajetória tecnológica irreversível. Contudo, a pouca disponibilidade de informação técnica, a incerteza quanto ao futuro político e econômico do Brasil, a dificuldade de acesso ao crédito e, os poucos exemplos de áreas sob o sistema com longo histórico de sucesso, ainda limitavam os investimentos.

25.5 Sistema irrigado de produção: a nova realidade do setor

25.5.1 Potencial e vantagens

São inúmeras as vantagens técnicas, sociais, financeiras e ambientais da verticalização promovida pelo sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar. E não há, por enquanto, nenhum outro novo sistema de produção ou manejo agrônômico que possa trazer, em curto e médio prazo, impactos tão substanciais na lucratividade, competitividade e sustentabilidade do setor sucroenergético brasileiro. Por essa razão cresce o consenso de que o sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar será, muito em breve, a nova realidade brasileira, ocupando grande fração da área produtiva.

25.5.1.1 Produtividade

O sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar confere maior produtividade tanto em toneladas de colmo por hectare (TCH) quanto em quilos de açúcar por tonelada de colmo (ATR). Consequentemente, também confere maior produtividade em termos de toneladas de açúcar por hectare (TAH).

25.5.1.2 Longevidade

Um dos principais fatores de redução da produtividade de canaviais está associado à perda de população de colmos (INMAN-BAMBER, 1994), que é resultado, além da deficiência hídrica, do pisoteio, abalo e arranquio de soqueiras, do aumento da

infestação de pragas e doenças, do aumento da pressão de ervas-daninhas, e da degradação da fertilidade do solo (MANHÃES *et al.*, 2015).

A longevidade de um canavial é, frequentemente, definida por uma produtividade mínima aceitável (TCH ou TAH). As usinas costumam definir esse patamar mínimo empiricamente, ou com uma matriz de decisão composta exclusivamente de parâmetros técnicos, ou associando parâmetros técnicos com alguma métrica financeira como, por exemplo, fluxo de caixa descontado. A produtividade mínima aceitável também oscila em função da capacidade financeira para custear a reforma e do custo de oportunidade de deixar uma área sem produção, mesmo que baixa, em ano de bom preço do açúcar e álcool. Mesmo quando se decide o momento de renovação do canavial através de uma matriz de decisão multivariada, a produtividade atual e a produtividade potencial, caso o canavial fosse renovado, sempre tem grande peso na decisão.

Em uma usina com nível de produtividade inferior, esse limite pode ser um TCH de 40 ou 50. Já nos melhores canaviais do país a produtividade mínima aceitável pode ser um TCH de 80 ou 90. Contudo, todas essas referências têm como base um canavial de sequeiro. Se mantivermos esses mesmos níveis para áreas irrigadas, certamente a longevidade do canavial irrigado aumentará substancialmente. Primeiramente, porque, comparado às áreas de sequeiro, a melhor condição hídrica e nutricional do canavial irrigado favorecerá a rebrota e reduzirá suas falhas (RUIZ-CORRÊA *et al.*, 2013; CAMPOS *et al.*, 2014; MONTEIRO; SENTELHAS, 2014). Segundo, porque, sob condição irrigada, a fração dos perfilhos que se tornam colmos é superior (ALMEIDA *et al.*, 2008). Ou seja, a melhor condição hídrica e nutricional de um canavial sob sistema irrigado mantém maior população de colmos e o declínio populacional ao longo dos anos é desacelerado em comparação com o canavial de sequeiro. Além de maior população de colmos, o sistema irrigado oferece melhores condições para o crescimento desses colmos ao longo do ciclo (DIAS; SENTELHAS, 2019). Finalmente, diante da ocorrência de falhas, o sistema irrigado permite que a touceira imediatamente ao lado da falha explore melhor a radiação adicional disponível e reduza o impacto da falha adjacente.

Contudo, ao observarmos o sistema irrigado de produção como um negócio individualizado, e analisarmos seu fluxo de caixa, percebemos que haverá um grande custo de oportunidade se aguardarmos de 12 a 15 anos para que uma área irrigada atinja as mesmas produtividades mínimas estabelecidas como referência de reforma para uma área de sequeiro.

Por exemplo, considere que a produtividade de colmos de uma área irrigada atingiu, após alguns ciclos, 110 t ha^{-1} . Será mais interessante, financeiramente, aguardar mais alguns anos para que essa produtividade chegue a 80 t ha^{-1} determinada como ponto de reforma para uma área de sequeiro? Ou será melhor renovar o canavial e retornar à produtividade dessa área para patamares acima de 200 t ha^{-1} ? Enquanto negócio, qual seria a melhor estratégia? E se considerarmos que a vida útil de equipamentos de irrigação, com boas práticas de manutenção, pode atender a dois ou três ciclos de 8 a 10 anos mesmo no gotejamento, pode-se optar por trocar apenas as linhas gotejadoras em dois ou três ciclos, dado que representam, aproximadamente, 30% do custo de um sistema novo e, com a troca, poderá operar por mais dois ou três ciclos de 10 anos.

Enfim, comparado a um sistema de sequeiro, é fato que a longevidade do canavial irrigado é maior. Mas enquanto estratégia de negócio, acreditamos que, financeiramente, poderá ser mais interessante estabelecer uma produtividade mínima aceitável mais elevada para o canavial irrigado. Na prática, isso pode significar um aumento de longevidade ligeiramente menor do que os 12 a 15 anos comumente preconizados.

25.5.1.3 Renovação de canavial

O aumento da longevidade do canavial reduz o percentual da área que precisa ser renovada anualmente, reduzindo o tamanho da infraestrutura de preparo de solo e plantio, seja da frota de máquinas, de mudas, insumos, ou de mão-de-obra. Adicionalmente, a renovação anual de uma área menor reduz significativamente o risco de plantios mal conduzidos e fora da janela climática ótima, que impactam negativamente a produtividade e longevidade de todo o ciclo do canavial.

25.5.1.4 Janela de operações

A qualidade e custo de diversas operações agrícolas dependem da umidade do ar e solo. No Cerrado, a janela ideal para plantio em sistema de produção de sequeiro ocorre apenas no mês de março. A estreita janela de plantio também reduz a janela de preparo do solo. Ainda assim, o plantio acaba não se restringindo à janela ideal. Isso ocorre porque, para viabilizar o plantio em toda a área necessária em apenas 30 dias, seria preciso um investimento substancialmente elevado de mão-de-obra e maquinário. Como consequência, abre-se a janela de plantio para os meses que antecedem e sucedem março, assumindo impacto negativo na qualidade do plantio, produtividade e longevidade da área.

Plantios realizados antes de março resultam em um canavial chegando no período seco com muita biomassa para ser sustentada. Como não haverá disponibilidade hídrica suficiente, esse canavial sofrerá com a seca. Plantios realizados depois de março correm o risco de não receberem chuva suficiente para germinação e estabelecimento adequado da população de colmos, também comprometendo permanentemente a produtividade e longevidade da área.

A janela estreita de plantio também dificulta o uso de rotação de culturas como a soja, sobretudo em canaviais colhidos no final de safra. Ou limita a utilização de variedades de soja muito precoces, com potencial de produção inferior. Frequentemente se abre mão do uso de cultura de rotação temendo atrasar o plantio e sofrer as consequências permanentes de uma germinação ruim da cana que sucede a soja.

Quando sob sistema irrigado de produção, não há limitação de janelas de preparo e plantio ocasionada por deficiência hídrica. Pode-se irrigar para elevar a umidade do solo para condições adequadas de preparo e plantio. Ou seja, pode-se plantar durante todo o ano. Com isso, ganha-se por diminuir a demanda de maquinário e mão-de-obra, ampliando a janela de plantio, e ganha-se na qualidade do plantio, gerando ganhos adicionais de produtividade e longevidade.

O sistema irrigado de produção também oferece vantagens nas janelas de operações de tratamentos culturais que demandam condição adequada de umidade do solo ou dossel, como herbicidas, adubação, inseticidas, etc. Esse sistema de produção também estende o período de colheita, dado que possibilita planejar e manejar água, nutrientes e maturadores para entregar, já em março, níveis mais elevados de TCH e ATR. Adicionalmente, por não depender exclusivamente da oferta de chuva, usinas que dispõem de boa fração de sua área sob sistema irrigado não precisam reduzir demasiadamente a fração de área colhida nos períodos de maior deficiência hídrica, dado que a irrigação garantirá excelente brotação após a colheita.

25.5.1.5 Tratos fitossanitários

Quanto maior a produtividade da área, menores serão os custos operacionais (Opex) e de capital (Capex) de operações agrícolas por tonelada de cana produzida.

Para executar operações de preparo de solo, adubação e tratos fitossanitários em uma determinada área e em determinada janela de tempo, a distância percorrida e a quantidade de maquinário necessária não serão afetadas pela produtividade que a área entregará. Portanto, aumentar a produtividade significa diluir esses custos por tonelada de cana produzida.

25.5.1.6 Colheita, transbordamento e transporte

Os custos de corte, transbordamento e transporte (CTT) são substancialmente reduzidos no sistema irrigado de produção. Apesar da tecnologia atual das colhedoras não permitir operar com a mesma velocidade nos canais irrigados, a quantidade de cana colhida por hora em áreas de alta produtividade aumenta, reduzindo o custo de corte por tonelada de colmo ou de açúcar (MACHADO *et al.*, 2002; YADAV *et al.*, 2003; CAMPOS *et al.*, 2017). Com a evolução das colhedoras, essa vantagem em canal irrigado só aumentará. Além disso, por causa da maior produtividade de TAH, a distância que se caminha com os transbordos para receber cada tonelada de ATR diminui. Consequentemente, diminui-se o custo de transbordamento por tonelada de colmo ou de açúcar. Finalmente, a maior produtividade do sistema irrigado, permite verticalizar a produção da usina como um todo, e atender à moagem com menor área de cana plantada, menor raio médio e maior proximidade à usina. Dessa forma, haverá redução do custo por tonelada de colmo ou de açúcar transportado. Ou seja, a verticalização das áreas com sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar resulta na redução acentuada de um dos principais custos do setor, o CTT.

25.5.1.7 Custo de insumos

O custo de diversos insumos está associado à área plantada, e não a produtividade. Por exemplo, o custo com herbicidas não aumenta proporcionalmente à produtividade. Ao contrário, áreas sob sistema irrigado, pelo menor índice de falhas, maior cobertura de palha e maior velocidade de crescimento e sombreamento da entrelinha, possuem menor pressão de ervas-daninhas. Custos com monitoramento de pragas e doenças, inibidores de florescimento, corretivos, maturadores e diversos outros insumos são pouco ou nada influenciados pela produtividade do canal. Dessa forma, aumentar a produtividade da área reduz o custo por tonelada de colmo e açúcar. Ainda, em função do ganho de eficiência de absorção de nutrientes em áreas sob sistema irrigado, também poderá haver redução adicional da demanda de fertilizantes por tonelada de colmo e açúcar.

25.5.1.8 Palhada

A produção de palha é proporcional à produtividade de colmos (BUFON *et al.*, 2016; BARBOSA *et al.*, 2020; SOUSA *et al.*, 2020). Um sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar pode produzir até 40 t ha⁻¹ (base seca) de palha, ao passo que uma área sob produção de sequeiro produz de 5 a 10 t ha⁻¹ (BUFON *et al.*, 2016). A maior cobertura de palha do sistema irrigado de produção impacta diretamente na redução de evaporação da água do solo, reduzindo a demanda hídrica da cultura ao longo do ciclo (OLIVER; SINGELS, 2007; BUFON *et al.*, 2016; NG CHEONG; TEELUCK, 2016; CARVALHO *et al.*, 2019). Essa maior quantidade de palha, concomitante à maior velocidade de decomposição do palhicho sob condição irrigada (BARBOSA *et al.*, 2020; SOUSA *et al.*, 2020) também aumenta a disponibilidade de matéria orgânica do solo. Mais matéria orgânica também implica em maior atividade e qualidade biológica do solo (MENDES *et al.*, 2020). O maior volume de palha também aumenta a proteção do solo, reduzindo além dos efeitos erosivos da chuva, a lixiviação de nutrientes e a perda de

água para além do sistema radicular (SÁ *et al.*, 2015). Por aumentar a micro rugosidade da superfície do solo e retardar o escoamento superficial, o maior volume de palha da produção irrigada também melhora a infiltração de água, melhorando o aproveitamento da chuva e reduzindo o *deficit* hídrico (BUFON *et al.*, 2016; SATIRO *et al.*, 2017). Considerando que, pelo menos, 5 a 8 t ha⁻¹ (base seca) da palhada devem ser mantidas sobre a superfície para garantir boa conservação, infiltração e redução da evaporação de água do solo (SÁ *et al.*, 2015; CASTIONI *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2018), quanto maior a produtividade de palha, maior o percentual que poderá ser recolhido para produção de energia elétrica ou etanol de segunda geração.

25.5.1.9 Demanda e custo da terra

A verticalização promovida pelo sistema irrigado de produção reduz a quantidade de terra necessária para atender a capacidade instalada de moagem da usina. Como resultado, ganha-se com a redução do raio médio.

Por isso, ao investir no sistema irrigado, a usina pode abrir mão de suas áreas mais distantes e de solos com menor fertilidade e capacidade de armazenamento de água. Da fração restante, a usina ainda pode direcionar solos e janelas de plantio e colheita mais restritivos para o sistema irrigado, dado que a oferta de nutrientes e água não é limitação para esse sistema. E por fim, direcionar os melhores solos e janelas de plantio e colheita para o sistema de produção de sequeiro. Ou seja, o investimento em produção irrigada gera impacto indireto, mas substancial no custo, produtividade e longevidade da área de sequeiro, abrindo ainda mais espaço para a redução de áreas e custo da terra para atender a moagem da usina.

A redução da demanda por terra também gera a oportunidade de abrir mão das áreas mais declivosas e recortadas, o que confere maior eficiência operacional e menor custo com maquinário. Favorece ainda, o atendimento da moagem da usina com menor número de fornecedores e arrendatários, reduzindo o custo de gestão de contratos e risco de litígio.

Esse efeito “poupa terra” do sistema irrigado de produção que se estende indiretamente para as áreas de sequeiro gera ainda um efeito formidável na sustentabilidade ambiental do setor sucroenergético, dado que também reduz a pressão de expansão de área plantada de cana sob áreas de grãos, pastagem ou de vegetação nativa. O ganho de eficiência ambiental também pode ser convertido em aumento das receitas com a venda de mais CBIOS - créditos de carbono (KLEIN *et al.*, 2019), com a manutenção e ganho de mercados através de novas e melhores certificações ambientais. E ainda pode reduzir os custos de investimento e manutenção de áreas de preservação permanente e reserva legal.

25.5.1.10 Quebra de safra e previsibilidade de produção

Uma característica intrínseca da agricultura é o risco da dependência das condições climáticas (GOUVÊA *et al.*, 2009; SANTOS; SENTELHAS, 2014; SILALERTRUKSA; GHEEWALA, 2018; CAMBRAIA NETO *et al.*, 2021). A quebra de safra por questões climáticas, além da redução de margem de lucro na safra corrente, gera impactos na brotação e no custeio da lavoura do ano seguinte, impactando a população de plantas e a produtividade da próxima safra e de todos os anos vindouros, reduzindo a longevidade do canavial.

A vulnerabilidade climática ainda eleva o custo dos seguros e dificulta o cumprimento de contratos de empréstimo, arrendamento, venda de açúcar e etanol, energia elétrica, pagamento de fornecedores, etc. O risco climático ainda atinge a fração

da produção que pode ser pré-comercializada com segurança, e eleva o custo de compra de cana no mercado *spot*. Por conseguinte, afeta o reinvestimento na renovação e modernização dos canais, frota, indústria, etc. Ou seja, desmobiliza e inibe os investimentos no setor, comprometendo não só seu crescimento, mas também sua competitividade e sustentabilidade.

Por outro lado, a menor vulnerabilidade climática do sistema irrigado, além de mitigar os aspectos acima, aumenta a probabilidade do cumprimento de metas e favorece o ambiente de trabalho e de negócio, gerando um ciclo virtuoso de motivação e dedicação da equipe, além de ser mais atraente para os melhores profissionais do mercado.

Ademais, a quebra de safra por razões climáticas em determinado ano é um fenômeno que, via de regra, impacta não somente uma única usina, mas o setor como um todo. Isso gera quebra de oferta que, então, exerce pressão sobre os preços e acaba se tornando uma oportunidade para ganho de *Market share* e competitividade das usinas que se diferenciam com sistema irrigado. Ou seja, no momento de crise climática, além de reduzirem sua vulnerabilidade, usinas com sistema irrigado de produção ampliam sua vantagem competitiva de forma mais acelerada e acentuada.

E as incertezas trazidas pelas mudanças climáticas ainda exacerbam essa vantagem do sistema irrigado. Vários prognósticos apontam para maior probabilidade de cenários de maior deficiência hídrica no Cerrado, trazendo eventos de seca cada vez mais frequentes e mais intensos (SANTOS; SENTELHAS, 2014; DIAS; SENTELHAS, 2019). Por essa razão, lastrear pelo menos uma fração da produção sob sistema irrigado tem um impacto que vai muito além do retorno direto de produtividade da área específica. E isso é ainda mais relevante para a sobrevivência dos empreendimentos em *commodities*, que mesmo passando por ciclos de alta e baixa de preços, permanecem com a tendência de achatamento de margem (CASHIN *et al.*, 2002; KABLAN *et al.*, 2017).

25.5.2 Desafios para o ganho de escala

Para acelerar o ganho de escala do sistema irrigado de produção no país, duas frentes precisam ser trabalhadas. A primeira diz respeito à **desconstrução de alguns mitos** e, a segunda, ao **avanço da inovação tecnológica** para o estabelecimento de premissas e protocolos cada vez mais sólidos para assegurar ganhos de sustentabilidade econômica, social e ambiental para o setor sucroenergético.

25.5.2.1 Superar mitos

25.5.2.1.1 Mito: cana-de-açúcar é rústica e não precisa de muita água ou irrigação para sobreviver

O objetivo da produção comercial não é a mera sobrevivência da planta. Ao contrário, um sistema de produção sustentável precisa oferecer condições para que a cultura entregue o melhor de seu potencial genético e seja o mais eficiente possível. Nesse sentido, a afirmação acima é um grande mito.

Seguindo a lógica da Lei dos Mínimos de Liebig (KREUZ *et al.*, 1995), o fator de produção mais restritivo pode não ser a água em um contexto de baixíssimo aprimoramento tecnológico e de gestão. Mas a realidade do setor sucroenergético nacional é muito diferente daquela de 40, 50 anos atrás. É evidente o aprimoramento do manejo varietal, da fertilidade dos solos, de ervas-daninhas, fitossanitário, e do

melhor domínio do plantio e colheita mecanizados, além de tantos outros aprimoramentos tecnológicos e gerenciais.

Com o aprimoramento do manejo agrônômico, migração da produção para o Cerrado, e mudanças climáticas que geram eventos de seca mais frequentes e mais intensos, a água, que já era o principal fator de produção, passou a ganhar ainda mais relevância. Por essas razões, é um mito dizer que a cana-de-açúcar, por ser uma planta rústica, não precisa de irrigação.

25.5.2.1.2 Mito: Cana sob sistema irrigado consome mais água do que em sequeiro

É mais apropriado substituir a palavra consumo pela palavra uso. O consumo traz uma visão equivocada de que a água que passa pelo interior da planta é permanentemente perdida, desaparece do sistema hídrico (ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2018; SANTIAGO *et al.*, 2018).

E é um equívoco concluir que a cana-de-açúcar em sistema irrigado, por utilizar água proveniente dos cursos d'água, usa mais água que uma cana de sequeiro. A cana de sequeiro também precisa de água para sobreviver e produzir. Como qualquer outra planta, ela absorve parte da água da chuva com suas raízes, transportando-a através de seus colmos até chegar às folhas, de onde é liberada na atmosfera pela transpiração. Nesse aspecto, a cana irrigada é idêntica à de sequeiro, mas, além da água da chuva, também transpira a água que lhe foi entregue pela irrigação no período de seca.

A cana irrigada, por sofrer menor estresse hídrico e nutricional, consegue produzir mais colmos com cada gota de água que utiliza e extrair mais de seu potencial genético (BUFON *et al.*, 2016). Por isso, para uma visão mais holística sobre esse aspecto, precisamos utilizar o conceito de eficiência de uso da água, ou produtividade da água (PA). Num contexto mais amplo, a PA é o retorno líquido por unidade de água utilizada. Na produção agrícola, melhorar a PA requer aumentar a produção de alimentos, energia e fibra, o retorno financeiro, a qualidade de vida e os serviços ambientais com menor quantidade de água.

Como a demanda de cana-de-açúcar não é regida pelo setor sucroenergético, mas pelo mercado consumidor, seu modo de vida e sua demanda por alimento, energia, etc., o que cabe ao setor sucroenergético é responder como será produzida essa cana, com que níveis de eficiência e sustentabilidade.

Como será detalhado mais adiante, a cana irrigada usa menos água para produzir cada tonelada de colmos, açúcar, etanol, etc. Por isso, se o setor sucroenergético atender 20, 40 ou 60% da demanda anual de cana-de-açúcar sob sistema irrigado, no final das contas, a necessidade de água e terra para atender a demanda anual do mercado, na verdade, reduzirá.

25.5.2.1.3 Mito: Irrigar cana-de-açúcar é uma agressão ao meio ambiente

Trata-se de outro grande mito. O sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar, como qualquer outro, deve obedecer às melhores práticas de sustentabilidade e atender rigorosamente às legislações ambientais. O mandato do produtor não é mais, simplesmente, produzir. Mas produzir com sustentabilidade ambiental e social, e sob práticas de governança que atendam os novos anseios e paradigmas da sociedade.

Com relação à sustentabilidade do uso da água, isso inclui utilizar exclusivamente água outorgada. A outorga é concedida com base no histórico de vazões do manancial, garantindo que a maior fração permanecerá intacta, preservando a vida do ecossistema (PINTO *et al.*, 2016). Para tal, é crucial uma gestão responsável dos recursos hídricos

pelos órgãos públicos e a participação efetiva, cooperativa e harmoniosa dos usuários nos comitês de bacia.

Para análise técnica e racional do uso sustentável da água no sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar, é fundamental compreender os seguintes fatores: (i) a água utilizada por toda agricultura irrigada do Brasil representa menos de 0,6% do que existe em nossos rios (CAMBRAIA NETO *et al.*, 2021); (ii) o Brasil possui umas das legislações de água mais modernas do mundo (Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997); e, (iii) é possível gerar grandes impactos positivos ao disponibilizar para a produção irrigada, de forma sustentável, uma pequena fração da vazão outorgável ainda disponível em muitas regiões do Brasil e do Cerrado, e isso só depende de gestão técnica e responsável, focada na sustentabilidade ambiental.

O fato é que o sistema irrigado é uma oportunidade para o Brasil e o setor sucroenergético reduzirem a quantidade de água hoje utilizada para atender a demanda do mercado por cana-de-açúcar, açúcar, etanol, energia elétrica, etc.

Com relação à sustentabilidade do uso da terra, o ganho de eficiência promovido pelo sistema irrigado implica em verticalização da produção, ou seja, produz-se mais em menor área. Com isso, a quantidade de terra necessária para atender a demanda de cana-de-açúcar poderia ser substancialmente reduzida, sobrando terra para ser destinada a outros usos, inclusive para preservação de vegetação nativa. Ademais, a verticalização através do ganho de eficiência, que gera um efeito "poupa-terra", tem sido uma marca da agricultura brasileira (SCARPARE *et al.*, 2016; VIEIRA FILHO, 2016; RESENDE *et al.*, 2021).

E quando adotada sob os conceitos modernos de irrigação deficitária (ou irrigação por *deficit* controlado) e utilizando exclusivamente a disponibilidade hídrica outorgável, a produção irrigada é mundialmente reconhecida com uma das melhores alternativas para o aumento da sustentabilidade ambiental e do uso racional da água, sobretudo no contexto das mudanças climáticas (FERERRES; SORIANO, 2006; GEETS; RAES, 2009; MOLDEN *et al.*, 2010; PATLE *et al.*, 2019; KIJNE *et al.*, 2020; MALHI *et al.*, 2021; GIORDANO *et al.*, 2021). Por essas razões e diversas outras já citadas anteriormente, sistemas irrigados de produção mais modernos, eficientes, verticalizados e racionalmente conduzidos, podem propiciar maior sustentabilidade ambiental do que a produção de sequeiro.

25.5.2.1.4 Mito: Produzir em sistema irrigado é adicionar água ao sistema de sequeiro

Definitivamente, trata-se de outro grande mito. A produção irrigada possui dinâmica e práticas bem distintas das de sequeiro. A mera adição de água a um sistema de sequeiro sem ajustes na escolha de variedades, nutrição, tratamentos fitossanitários, maturação, logística e outros fatores, jamais permitirá extrair o potencial do sistema irrigado. Portanto, um sistema irrigado de produção não se resume à adição de água a um sistema de sequeiro.

25.5.2.2 Avançar no desenvolvimento tecnológico

Além de desconstruir gradativamente os mitos sobre o sistema irrigado de cana-de-açúcar, também é fundamental o desenvolvimento tecnológico, das premissas, protocolos, etc. Vejamos algumas demandas de ajuste tecnológico para produção eficiente sob sistema irrigado de produção.

25.5.2.2.1 Variedades para produção irrigada

Os programas de melhoramento de cana-de-açúcar no Brasil conseguiram incorporar importante potencial produtivo às novas variedades, sobretudo para os ambientes edafoclimáticos com maior deficiência hídrica. Como a produção brasileira ocorre majoritariamente sob sistema de sequeiro, as variedades que se destacam nas usinas são as que conferem maior tolerância à seca. Consequentemente, essas se tornam os futuros parentais para os próximos cruzamentos. Como resultado, após décadas de melhoramento genético selecionando variedades com maior tolerância à seca, corre-se o risco de estreitamento da base genética para materiais com essa característica. Ocorre que esse padrão genético frequentemente é antagônico aos padrões genéticos de responsividade à irrigação (CARVALHO; FURTADO, 2013; MORAIS *et al.*, 2015). Por exemplo, frequentemente, as variedades mais responsivas ao aumento da oferta hídrica são aquelas que, sob aumento do *deficit* de pressão de vapor, são menos sensíveis ao fechamento estomatal, retardam a senescência foliar e enrolamento de folhas, etc. E essas são justamente algumas das características desejáveis para conferir maior tolerância à seca.

Atualmente, nenhum programa de melhoramento brasileiro declara oficialmente possuir um programa específico para o sistema irrigado de produção. São conhecidas, contudo, algumas iniciativas que buscam identificar características desejáveis para produção irrigada. Por vezes, isso é realizado através da alocação de *seedlings* sob áreas irrigadas. Mas não necessariamente em áreas cuja lâmina de projeto, manejo da irrigação e manejo agrônômico estejam ajustados segundo as melhores técnicas para sistema irrigado de alto padrão. Assim, o potencial de resposta dos materiais é limitado. O fato dessas iniciativas também não possuírem a mesma envergadura e repetibilidade dos programas para variedades de sequeiro reduz a eficiência e eficácia da seleção.

Se por um lado o sistema irrigado de produção ainda não possui área relevante se comparado à produção de sequeiro, por outro, a ausência de programas fortes de seleção de variedades para área irrigada traz desafios ainda maiores para o ganho de desempenho e relevância para área irrigada.

A alternativa que tem sido adotada pelos produtores é, com base em conhecimento tácito e empírico, tentar identificar dentre as variedades de sequeiro aquelas que, talvez, possam apresentar bom desempenho sob sistema irrigado. Mas, mesmo os produtores com maior experiência em sistema irrigado relatam a dificuldade de conferir longevidade com elevados patamares de produção utilizando as variedades de sequeiro. E após longo período de análise pelo método de "tentativa e erro", a recomendação de variedades mais adequadas à produção irrigada acontece quando uma enormidade de novas variedades já está disponível para produção de sequeiro.

Algumas das características mais desejáveis para seleção de variedades adaptadas ao sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar são: (i) responsividade acentuada de TAH ao aumento da satisfação hídrica; (ii) manutenção de elevadas taxas de condutância estomática e transpiração sob condições de elevado *deficit* de pressão de vapor; (iii) velocidade de crescimento inicial para fechamento mais rápido da entrelinha e aumento da eficiência de uso de radiação; (iv) porte ereto de colmos; (v) resistência ao acamamento; (vi) resistência ao arranquio de soqueira; (vii) resistência ao enraizamento e brotação lateral após acamamento; e, (viii) tolerância à doenças que se beneficiam do microclima mais úmido.

A responsividade acentuada de uma variedade ao aumento da satisfação hídrica, por exemplo, não é suficiente para sua indicação ao sistema irrigado se, por exemplo, as demais características não lhe conferem capacidade de manutenção das elevadas

produtividades por 10-12 anos. Algumas variedades produzem acima de 250 t ha⁻¹ no primeiro ano, mas em razão do tombamento e enraizamento precoce, além da suscetibilidade ao arranquio de soqueira e doenças fúngicas, têm desempenho abaixo de 130 t ha⁻¹ já no segundo ou terceiro ano. Por outro lado, variedades com elevada tolerância ao acamamento, porte ereto de colmos e boa longevidade, mas que não entregam responsividade acentuada de TAH sob aumento da satisfação hídrica, também não são indicadas para o sistema irrigado de produção.

25.5.2.2.2 Manejo nutricional

Perfil do solo: Um dos paradigmas mais importantes para serem ajustados do sistema de sequeiro para o sistema irrigado diz respeito à construção de um perfil de solo apto para suportar uma elevada produtividade por 10-12 anos, sem necessidade de operações que impliquem em movimentação de solo e, conseqüentemente, renovação precoce do canavial.

Se no sistema de sequeiro podemos incorporar corretivos e matéria orgânica em profundidade, e utilizar cultura de rotação a cada 5-6 anos. Por ocasião da renovação, no sistema irrigado essa janela de intervenção só ocorrerá depois de 10-12 anos. Ou seja, a janela de oportunidade de construir esse perfil diferenciado ocorre exclusivamente na implantação ou renovação da área. Se essa janela não for bem planejada e aproveitada, os impactos negativos na produção só acabarão após 12 anos.

Outro aspecto a ser considerado na construção do perfil do solo é que a adequação do nível de disponibilidade de nutrientes tem a ver com seu valor de mercado, mas também com a intensificação do sistema produtivo. Ou seja, quanto mais verticalizado o sistema, mais rigoroso deve ser o critério de nível de disponibilidade de nutrientes.

Por isso, todas as práticas agronômicas que demandam movimentação de solo, como o uso de cultura de rotação, incorporação profunda de matéria orgânica, calcário, fósforo e micronutrientes devem ser ajustadas para o sistema irrigado de produção.

Fosfatagem: Para produção de sequeiro, recomenda-se elevar a disponibilidade inicial de fósforo no solo para níveis que atendam de 70 a 80% do potencial produtivo, algo próximo a 15 ppm (resina) (REIN *et al.*, 2016). Para sistema irrigado corrigimos esse nível para, pelo menos, 25 ppm de fósforo (resina), segundo método descrito em Rein *et al.* (2016).

Correção da acidez de subsuperfície: A cana-de-açúcar é menos afetada pela acidez do solo do que pela deficiência de cálcio e magnésio, ou presença de alumínio. Correções de acidez na implantação ou renovação do canavial para elevar o percentual de saturação por bases (V) para 50% atendem a grande maioria das áreas de sequeiro (SOUSA *et al.*, 2015). Contudo, para sistema irrigado de produção, recomenda-se calagem com incorporação profunda para elevar o solo a 70% de saturação de bases. Ademais, recomenda-se correções anuais com calcário em dose equivalente ao poder de acidificação do fertilizante nitrogenado utilizado, com aplicação a lanço, na superfície, como forma de manter o solo corrigido por mais tempo.

Por ocasião da implantação do canavial ou reforma, recomenda-se o uso do gesso, aplicado a lanço na superfície, em área total, conforme metodologia de cálculo proposta por Sousa *et al.* (2015). Também se recomenda que, anualmente, pequenas doses de gesso sejam aplicadas na superfície como fonte suplementar de cálcio, magnésio e enxofre.

Correção de micronutrientes: Por ocasião do preparo de solo, também recomenda-se realizar a correção de micronutrientes (SOUSA; LOBATO, 2004). Essa

prática não eliminará completamente a necessidade de futuras adubações foliares com micronutrientes. Mas, certamente, essa correção de micronutrientes no solo evitará custos elevados com aplicação de micro via foliar.

Matéria orgânica e atividade biológica: A incorporação de matéria orgânica em profundidade e o uso de cultura de rotação, por vezes, é deixada de lado em áreas de sequeiro em função de alguma dificuldade logística, falha de planejamento, etc. Considerando o peso que a matéria orgânica e a atividade biológica têm na capacidade do perfil do solo de sustentar elevadas produtividades por muitos anos, essas práticas não podem ser negligenciadas. É encorajado o uso das técnicas mais modernas de rotação, inclusive, se possível, adotando mix de fabáceas (leguminosas). A inclusão de poáceas (gramíneas) do gênero *Brachiaria* (*Brachiaria* spp.) também pode trazer benefícios semelhantes aos que têm trazido ao solo, produtividade e sustentabilidade da produção de grãos. O aporte frequente de matéria orgânica na superfície também é recomendado para manutenção de teores elevados de matéria orgânica do solo.

Plantio sem falhas: Se em sistema de sequeiro, o plantio sem falhas já é importante, no sistema irrigado essa importância é ainda maior. A verticalização reduz o custo por tonelada, mas eleva o custo por área. Por isso, o custo de oportunidade do recurso despendido em compra ou arrendamento da terra, preparo do solo, adubação, tratamentos fitossanitários, etc., em qualquer metro linear sem a presença de plantas é superior no sistema irrigado. Apesar deste sistema favorecer a compensação de falhas com crescimento adicional das touceiras na extremidade das falhas, a compensação não é integral. Por isso, o plantio com zero falha é fundamental para o sistema irrigado de produção.

Outro aspecto relevante a ser considerado em sistema irrigado é o emprego de mudas pré-brotadas (MPB). Pela maior longevidade, o custo de capital de MPB por tonelada de açúcar extraído da área será reduzido substancialmente, aumentando sua viabilidade. Também favorecem a recomendação do MPB sua menor mortalidade por deficiência hídrica nesse sistema, além da maior velocidade de incorporação de novas variedades na usina, e o ganho de velocidade de crescimento que resultará em maior produtividade no primeiro ano de cultivo (MARTINS *et al.*, 2015; COELHO *et al.*, 2018).

Adubação de soqueira: Em sistema irrigado de produção, a dose de macro e micronutrientes durante o ciclo devem ser ajustadas proporcionalmente à exportação de nutrientes, que aumentará em relação às áreas de sequeiro por conta da maior produtividade. Para aumentar a eficiência de utilização de nutrientes também é recomendado o fracionamento das adubações, utilizando a fertirrigação, e considerando a curva de exportação de cada nutriente ao longo do ciclo.

Alguns estudos sobre dosagem de nutrientes para produção irrigada têm sido realizados para auxiliar o ajuste necessário entre o aporte de nutrientes e a extração pela cultura (MOURA *et al.*, 2005; DANTAS NETO *et al.*, 2006; ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2012; GOPALASUNDARAM *et al.*, 2012; SIMÕES *et al.*, 2019; WANDERLEY *et al.*, 2021). Uma rede de experimentos da Embrapa Cerrados também está buscando esses refinamentos de protocolo de nutrição para produção irrigada.

Sugere-se atenção para adubações nitrogenadas quando restar menos de 5 meses para a colheita, dado que ela pode inibir a concentração de açúcar no colmo (MEGDA *et al.*, 2012; SCHULTZ *et al.*, 2015). Em contrapartida, aumentar a oferta de potássio, boro e magnésio colaboram para a maturação da cana (OTTO *et al.*, 2010; CRUSCIOL *et al.*, 2017; GARCIA *et al.*, 2020).

Em sistema irrigado de produção, a presença de raízes é abundante tanto em profundidade quanto em toda a largura entre as linhas de cultivo. Por isso, se houver

necessidade de aplicação de fertilizantes na superfície, sem ser através da fertirrigação, sugere-se não concentrar as adubações ou corretivos estritamente ao lado da soqueira. Ao contrário, recomenda-se que adubações e correções sejam realizadas a lanço, em área total. Além de reduzir o custo da operação, desejamos um ambiente nutricionalmente rico em toda área, para que a planta também desenvolva raízes e explore com eficiência água e nutrientes na entrelinha, sobretudo quando chegar o período de chuvas e a frequência de irrigação for reduzida.

Tratos fitossanitários: Os tratamentos fitossanitários em sistema irrigado de produção também precisam ser ajustados em relação às práticas de sequeiro.

O microclima em sistema irrigado pode ser mais favorável para propagação de algumas pragas e doenças (BAILEY; BECHET, 1995). Nesses casos, ajustes à intensidade e frequência de monitoramento podem ser necessários. Por outro lado, o microclima mais úmido pode inibir pragas e doenças que se manifestam predominantemente em ambiente mais seco (SENTELHAS, 2016).

Adicionalmente, o microclima mais úmido das áreas irrigadas pode, eventualmente, ampliar janelas e oportunidades de uso de controle biológico (SIMÕES *et al.*, 2019). Também é possível que favoreça a manutenção de níveis mais elevados da população de inimigos naturais, reduzindo a necessidade de intervenção de controle químico.

Quanto aos níveis críticos de dano econômico e controle, é necessário avaliar se os índices que serão adotados para o manejo integrado de pragas e doenças na produção irrigada não têm a ver com padrões de produtividade, velocidade de propagação e dano econômico da praga ou doença em canaviais de sequeiro. Se esse for o caso, pode ser necessário ajustar os índices críticos de controle. Atenção especial é recomendada para doenças fúngicas, sobretudo em canavial adulto com eventos sucessivos de acamamento (CONCEIÇÃO; SILVA, 2011).

Para o manejo fitossanitário, uma das grandes vantagens do sistema irrigado é a ampliação do espectro de estratégias que possibilitam a quimigação - aplicação de insumos químicos e biológicos utilizando a água de irrigação como veículo, seja em pivôs, seja com gotejamento subsuperficial (ANDRADE; BRITO, 2006). A quimigação é especialmente vantajosa quando a grande biomassa de um canavial adulto limita o acesso ao alvo e a eficiência das aplicações aéreas e tratorizadas de baixo volume de calda, como por exemplo, no combate às pragas de solo (GARCIA-SALDAÑA *et al.*, 2019; TANG *et al.*, 2020).

25.6 Considerações finais

A transição de fração substancial da produção de cana-de-açúcar brasileira do sistema de sequeiro para o sistema irrigado de produção não é mais dúvida, o que é resultado: (i) da já consolidada e crescente migração da produção sucroenergética para o Cerrado, (ii) da estagnação da produtividade, que é resultado do represamento do potencial genético pelo *deficit* hídrico acentuado, e (iii) da urgência de verticalização da produção, eficiência, e sustentabilidades econômica, social e ambiental do setor sucroenergético brasileiro. A velocidade com que essa transição ocorrerá dependerá, além da saúde financeira das empresas, da difusão das inovações tecnológicas em sistema irrigado acumuladas na última década e da multiplicação de vitrines tecnológicas e áreas piloto em escala comercial, para evidenciar os resultados possíveis.

Referências

- ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I. Vegetative development and production of sugarcane varieties as a function of water availability and thermic units. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.5, p.1441-1448, 2008.
- ANDRADE, C.L.T.; BRITO, R.A.L. Métodos de Irrigação e Quimigação. **Circular Técnica 86**-Embrapa, n.1, p.1-17, 2006.
- ANDRADE, G.O. O ciclo da cana-de-açúcar no Rio Grande do Norte. **Revista de História da USP**, São Paulo, n.35, p.123-129, 1958.
- 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. Espaço e tempo na agroindústria canavieira de Pernambuco. **Estudos Avançados**, São Paulo, n.15, v.43, p.267-280, 2001.
- ANDRADE, M.C. **Modernização e pobreza**: a expansão da agroindústria canavieira e seu impacto ecológico e social. São Paulo: Unesp, 1994.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q.; DUARTE, J.A.L.; BRAGA, D.L.; NOLETO, D.H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.1, p.76-84, 2012.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; NOLETO, D.H.; BASTOS, E.A.; MOURA, M.S.B.; ANJOS, J.C.R. dos. Demanda hídrica da cana-de-açúcar, por balanço de energia, na microrregião de Teresina, Piauí. **Agrometeoros**, v.25, n.1, p.217-226, 2018.
- BACCHI, J.G.G.M.R.P.; VALDES, L.R.E.T.B.C. **Crescimento e produtividade**. Conab, v.2013, p.239-246, 2013.
- BAILEY, R.A.; BECHET, G.R. The effect of ratoon stunting disease on the yield of some south African sugarcane varieties under irrigated and rainfed conditions. **Proceedings of The South African Sugar Technologists**, p.5, 1995.
- BARBOSA, F.; SHIKIDA, P.; VIAN, C.F. The expansion of sugarcane agroindustry in the Central West Brazilian (1975-2017): a historical-economic analysis. **Gestão e Regionalidade**, v.36, p.283-297, 2020.
- BARBOSA, T.S.; CARVALHO, A.M.; SOUSA, T.R.; ALVIM, R.; VIEIRA, L.V. BUFON, V.B. Decomposição do palhço residual da cana-de-açúcar irrigada no Cerrado. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2020.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, D.D.; SOARES, A.A. **Manual de irrigação**. Viçosa: Imprensa Universitária, 545p., 2019.
- BOLFE, E.L.; SANO, E.E.; CAMPOS, S.K. (Ed.). **Dinâmica agrícola no cerrado**: análises e projeções. Brasília: Embrapa, 2020. v.1, 308p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/212381/1/LV-DINAMICA-AGRICOLA-CERRADO-2020.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2020.
- BUFON, V.B.; MARCANTE, N.C.; SANTOS, J.M. Acúmulo e partição de biomassa da cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos na região do cerrado. **Stab**, p.178-183, 2016.
- CAMBRAIA NETO, A.J.; RODRIGUES, L.N.; SILVA, D.D.; ALTHOFF, D. Impact of climate change on groundwater recharge in a Brazilian Savannah watershed. **Theoretical and Applied Climatology**, v.143, n.3-4, p.1425-1436, 2021.
- CAMPOS, F.H.; BIGATON, A.; TORRES DA SILVA, H.J.; MARQUES, P.V.; COELHO, R.D. Análise de rentabilidade de irrigação na cana-de-açúcar: estudo de caso de uma usina de Goiás. **Revista Pecege**, v.3, n.2, p.124-133, 2017.

- CAMPOS, J.D.O.; CHAVES, H.M.L. Tendências e variabilidades nas séries históricas de precipitação mensal e anual no bioma Cerrado no período 1977-2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.1880, p.157-169, 2020.
- CAMPOS, P.F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; FONTOURA, P.R. **Resposta de variedades de cana-de-açúcar à irrigação com deficit no Cerrado**, p.31-36, 2014.
- CAMPOS, P.F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; FONTOURA, P.R.; EVANGELISTA, A.W.P. Variedades de cana-de-açúcar submetidas à irrigação suplementar no cerrado goiano. **Engenharia Agrícola**, v.34, n.6, p.1139-1149, 2014.
- CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agrícola**, v.70, n.6, p.449-456, 2013.
- CARVALHO, C.P.O. Novas estratégias competitivas para o novo ambiente institucional: o caso do setor sucroalcooleiro em Alagoas: 1990/2001. In: MORAES, M.A.F.D.; SHIKIDA, P.F.A. (org.). **Agroindústria canavieira no Brasil: Evolução, desenvolvimento e desafio**. São Paulo: Atlas, 2002.
- CARVALHO, K.S.; VIANNA, M.S.; NASSIF, D.S.P. Effect of soil straw cover on evaporation, transpiration, and evapotranspiration in sugarcane cultivation. **Australian Journal of Crop Science**, v.13, n.8, p.1362-1368, 2019.
- CARVALHO, S.A.D.; FURTADO, A.T. O melhoramento genético de cana-de-açúcar no Brasil e o desafio das mudanças climáticas globais. **Revista Gestão e Conexões**, v.2, n.1, p.22-46, 2013.
- CASHIN, P.; MCDERMOTT, C.; MCCDERMOTT, C. The long-run behavior of commodity prices: small trends and big variability. **IMF Staff Papers**, v.49, p.2-2, 2002.
- CASTILLO, R. **Dinâmicas recentes do setor sucroenergético no Brasil: competitividade regional e expansão para o bioma cerrado**. GEOgraphia, Niterói: Universidade Federal Fluminense - UFF, Programa de Pós-Graduação em Geografia, v.17, n.35, p.95-119, 2015.
- CASTIONI, G.A.; CHERUBIN, M.R.; MENANDRO, L.M.S. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. **Soil and Tillage Research**, v.184, n.5, p.301-309, 2018.
- CHERUBIN, M.R.; KARLEN, D.L.; FRANCO, A.L.C.; TORMENA, C.A.; CERRI, C.E.P.; DAVIES, C.A.; CERRI, C.C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v.267, p.156-168, 2016.
- COELHO, A.P.; DALRI, A.B.; FARIA, R.T. Productivity and technological quality of sugarcane cultivars fertigated and planted through pre-sprouted seedlings. **Australian Journal of Crop Science**, v.12, n.8, p.1265-1271, 2018.
- COELHO, A.P.; DALRI, A.B.; FARIA, R.T.; LANDELL, E.P.A.; PALARETTI, L.F. Perfilamento da cana-de-açúcar cultivada com e sem irrigação suplementar e plantada por mudas pré-brotadas: um novo conceito. **Acta Iguazu**, n.5, p.71-84, 2018.
- CONCEIÇÃO, L.L.; SILVA, C.M. O controle biológico e suas aplicações na cultura de cana-de-açúcar. **Campo Digital**, v.6, n.1, p.14-25, 2011.
- COSTA, D.H.; MONDARDO, M.L. A modernização da agricultura no Oeste baiano: migração e novas territorialidades. **Revista Geonorte**, v.7, n.1, p.520-536, 2013.
- CRUSCIOL, C.A.C.; ROSSATO, O.B.; FOLTRAN, R.; MARTELLO, J.M.; NASCIMENTO, C.A.C. Soil fertility, sugarcane yield affected by limestone, silicate, and gypsum application. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.48, n.19, p.2314-2323, 2017.
- DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J.L.C.; FARIAS, C.H.D.A.; AZEVEDO, H.M.; AZEVEDO, C.A.V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.283-288, 2006.
- DIAS, H.B.; SENTELHAS, P.C. Dimensioning the impact of irrigation on sugarcane yield in Brazil. **Sugar Tech**, v.21, n.1, p.29-37, 2019.

- EISENBERG, P.L. **Modernização sem mudança**: a indústria açucareira em Pernambuco, 1840-1910. Rio de Janeiro. Paz e Terra, 294p, 1977.
- FERERES, E.; SORIANO, M.A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v.58, n.2, p.147-159, 2007.
- FILOSO, S.; CARMO, J.B.; MARDEGAN, S.F.; LINS, S.R.M; GOMES, T.F.; MARTINELLI, L.A. Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals. **Renewable Sustainable Energy Review**, v.52, p.1847-1856, 2015.
- GARCIA, A.; CRUSCIOL, C.A.C.; MCCRAY, J.M. Magnesium as a promoter of technological quality in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.20, n.1, p.19-30, 2020.
- GARCÍA-SALDAÑA, A.; LANDEROS-SÁNCHEZ, C.; CASTAÑEDA-CHÁVEZ, M. Fertirrigation with low-pressure multi-gate irrigation systems in sugarcane agroecosystems: A Review. **Pedosphere**, v.29, n.1, p.1-11, 2019.
- GAROFALO, D.F.T.; PACKER, A.P.; RAMOS, N.P.; KONDO, V.Y.; MATSUURA, M.I.S.F.; CABRAL, O.M.R. **Dinâmica na cultura da cana-de-açúcar no Brasil**: 1990 a 2018. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente (Documentos, 124), 2020.
- GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, v.96, n.9, p.1275-1284, 2009.
- GIORDANO, M.; SCHEIERLING, S.M.; TRÉGUER, D.O.; TURRAL, H.; MCCORNICK, P.G. Moving beyond 'more crop per drop': insights from two decades of research on agricultural water productivity. **International Journal of Water Resources Development**, v.37, n.1, p.137-161, 2021.
- GOPALASUNDARAM, P.; BHASKARAN, A.; RAKKIYAPPAN, P. Integrated nutrient management in sugarcane. **Sugar Tech**, v.14, n.1, p.3-20, 2012.
- GOUVÊA, J.R.F.; SENTELHAS, P.C.; GAZZOLA, S.T.; SANTOS, M.C. Climate changes and technological advances: Impacts on sugarcane productivity in tropical Southern Brazil. **Scientia Agricola**, v.66, n.5, p.593-605, 2009.
- INMAN-BAMBER, N.G. **Effect of age and season on components of yield of sugarcane in South Africa**, n.5, p.23-27, 1994.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dinâmica territorial da produção agropecuária**. A geografia da cana. Rio de Janeiro. Ed. IBGE. 170p. 2017.
- KABLAN, S.; FTITI, Z.; GUESMI, K. Commodity price cycles and financial pressures in African commodities exporters. **Emerging Markets Review**, v.30, p.215-231, 2017.
- KLEIN, B.C.; CHAGAS, M.F.; WATANABE, M.D.B.; BONOMI, A.; MACIEL FILHO, R. Low carbon biofuels and the new Brazilian national biofuel policy (RenovaBio): a case study for sugarcane mills and integrated sugarcane-microalgae biorefineries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.115, n.8, p.109365, 2019.
- KREUZ, C.L.; LANZER, E.A.; PARIS, Q. Funções de produção Von Liebig com rendimentos decrescentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, n.1, p.95-106, 1995.
- LI, S.; LI, Y.; LIN, H.; FENG, H.; DYCK, M. Effects of different mulching technologies on evapotranspiration and summer maize growth. **Agricultural Water Management**, v.201, p.309-318, 2018.
- MACENA, F.A.; EVANGELISTA, B.A.; MALAQUIAS, J.V.; OLIVEIRA, A.D.; MULLER, A.G. **Análise temporal de variáveis climáticas monitoradas entre 1974 e 2013 na Estação Principal da Embrapa Cerrados**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, p.121, 2009.
- MACHADO, T.; NEVES, M.F.; BIALOSKORSKI NETO, S. Viabilidade econômica da irrigação localizada na cultura da cana-de-açúcar. **Sober**, n.2, p.1-11, 2002.

- MALHI, G.S.; KAUR, M.; KAUSHIK, P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. **Sustainability**, v.13, p.1318, 2021.
- MANHÃES, C.M.C.; GARCIA, R.F.; FRANCELINO, F.M.A.; FRANCELINO, H.O.; COELHO, F.C. Fatores que afetam a brotação e perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v.17, n.1, p.163-181, 2015.
- MARCUZZO, F.F.N.; MELO, D.C.R.; COSTA, H.C. Sazonalidade e distribuição espaço-temporal das chuvas no bioma do Cerrado do Estado do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.17, p.77-86, 2012.
- MARQUES POSTAL, A.; PASHAEI KAMALI, F.; ASVELD, L.; OSSEWEIJER, P.; SILVEIRA, J.M.F.J.D. The impact of sugarcane expansion in Brazil: Local stakeholders' perceptions. **Journal of Rural Studies**, v.73, October, 2019, p.147-162, 2020.
- MARTINS, A.P.C.; ALBRECHT, L.P.; CASTALDO, J.; CARNEIRO, A.R.; ZUCARELI, V. Novas tecnologias no plantio de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Journal of Agronomic Sciences**, v.4, p.301-317, 2015.
- MEGDA, M.X.V.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; VITTI, A.C. Eficiência agrônômica de adubos nitrogenados em soqueira de cana-de-açúcar colhida sem queima. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.12, p.1681-1690, 2008.
- MELO, J.E. **O açúcar no café: agromanufatura açucareira e modernização em São Paulo (1850-1910)**. 2009. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- MENDES, I.C.; CHAER, G.M.; SOUSA, D.M.G. Bioanálise de solo: a mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola. **Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia**, n.8, p.1-11, 2020.
- MOLDEN, D.; OWEIS, T.; STEDUTO, P. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. **Agricultural Water Management**, v.97, n.4, p.528-535, 2010.
- MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Potential and actual sugarcane yields in southern Brazil as a function of climate conditions and crop management. **Sugar Tech**, v.16, n.3, p.264-276, 2014.
- MORAIS, L.K.; CURSI, D. E.; MESSIAS, J. **Melhoramento genético da cana-de-açúcar**. Embrapa, 2015. Disponível em: www.embrapa.com.br. Acesso em: 1 abr. 2021.
- MOURA, M.V.P.S.; FARIAS, C.H.A.; AZEVEDO, C.A.V. Levels of manuring in the sugar-cane crop, first leaf, with and without irrigation. **Ciência e Agrotecnologia**, v.29, n.4, p.753-760, 2005.
- NG CHEONG, L.R.; TEELUCK, M. The practice of green cane trash blanketing in the irrigated zone of Mauritius: effects on soil moisture and water use efficiency of sugarcane. **Sugar Tech**, v.18, p.124-133, 2016.
- NORONHA, F.F.M.; CARDOSO, M.R.D.; FARIA, T.G. Chuvas no Cerrado da região centro-oeste do BRASIL: Análise histórica e tendência futura. **Ateliê geográfico**, v.6, n.2, p.112-130, 2012.
- OLIVEIRA, P.T.S.; NEARING, M.A.; MORAN, M.S.; GOODRICH, D.C.; WENDLAND, E.; GUPTA, H.V. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. **Water Resources Research**, v.50, p.7100-7114. 2014.
- OLIVEIRA FILHO, A.T.; RATTER, J.A. Vegetation physionomies and woody flora of the Cerrado biome. In: OLIVEIRA, P.S.; MARQUIS, R.J. (Ed.). **The Cerrados of Brazil**. Columbia University Press, New York, p.91-120, 2002.
- OLIVIER, F.C.; SINGELS, A. Effect of a trash blanket on irrigation water use efficiency of sugarcane. **Proceedings of International Society of Sugar Cane Technologists**, v.81, p.62-74, 2007.
- OLIVIER, F.C.; SINGELS, A. The effect of crop residue layers on evapotranspiration, growth and yield of irrigated sugarcane. **Water SA**, v.38, p.77-86, 2012.

- OTTO, R.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: Monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.601-611, 2009.
- OTTO, R.; VITTI, C.G.; LUZ, P.H.C. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.34, n.4, p.1137-1145, 2010.
- PATLE, G.T.; KUMAR, M.; KHANNA, M. Climate-smart water technologies for sustainable agriculture: A review. **Journal of Water and Climate Change**, v.11, n.4, p.1455-1466, 2020.
- PERRUCCI, G. A república das usinas. Rio de Janeiro: Paz e Terra, p.246, 1978.
- PINTO, V.G.; RIBEIRO, C.B.M.; SILVA, D.D. Vazão ecológica e o arcabouço legal brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.9, n.1, p.91-109, 2016.
- PIRES, M.O. Programas agrícolas na ocupação do Cerrado. **Sociedade e Cultura**, v.3, n.1, p.111-131, 2000.
- PRADO, H. **Pedologia Fácil** - aplicação em solos tropicais. 4. Ed. Piracicaba: Hélio do Prado. 284p, 2013.
- REIN, T.A.; SOUSA, D.M.; SANTOS JÚNIOR, J.D.G.; NUNES, R.S.; KORNDORFER, G.H. **Manejo da adubação fosfatada para cana-de-açúcar no Cerrado**. (Circular técnica, 29). Planaltina: Embrapa Cerrados, 2015.
- RESENDE, R.S.; NASCIMENTO, T.; CARVALHO, T.B. Reducing sugarcane irrigation demand through planting date adjustment in Alagoas State, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.25, n.2, p.75-81, 2021.
- RODRIGUES, G.S.S.C; ROSS, J.L.S. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil**: perspectivas geográfica, histórica e ambiental. Uberlândia: Ed. UFU, 272p. 2020.
- RODRIGUES, T.R.; VOURLITIS, G.L.; LOBO, F.A.; OLIVEIRA, R.G.; NOGUEIRA, J.S. Seasonal variation in energy balance and canopy conductance for a tropical Savanna ecosystem of South central Mato Grosso, Brazil. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v.119, n.1, p.1-13, 2014.
- RODRIGUEZ, G.; SCANLON, B.R.; KING, C.W.; SCARPARE, F.V.; XAVIER, A.C.; PRUSKI, F.F. Biofuel-water-land nexus in the last agricultural frontier region of the Brazilian Cerrado. **Applied Energy**, May, p.1-16, 2018.
- RUIZ-CORRÊA, S.T.; SCARPARE, F.V.; DOURADO-NETO, D. Agricultura irrigada: Produtividade potencial da cana-de-açúcar sem limitações hídricas. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, January, p.67-71, 2013.
- SÁ, M.A.C.; FRANZ, C.A.B.; SANTOS JÚNIOR, J.D.G.; REIN, T.A.; BUFON, V.B.; CARVALHO, A.M.; MULLER, A.G. **Manejo do palhicho residual na cultura da cana-de-açúcar no Cerrado**: Primeira aproximação. Brasília: Embrapa Cerrados (Circular Técnica 27), 2015.
- SANTIAGO, A.D.; CHICO, D.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; GARRIDO, A.; CARNAUBA, P.J.P. Pegada hídrica da cana-de-açúcar e etanol produzidos no estado de Alagoas, Brasil. **Agrometeoros**, v.25, n.1, p.209-216, 2018.
- SANTOS, D.L.; SENTELHAS, P.C. Climate change scenarios and their impact on water balance and sugarcane yield in southern Brazil. **Sugar Tech**, v.16, n.4, p.356-365, 2014.
- SATIRO, L.S.; CHERUBIN, M.R.; SAFANELLI, J.L. Sugarcane straw removal effects on ultisols and oxisols in south-central Brazil. **Geoderma Regional**, v.11, August, p.86-95, 2017.
- SCARPARE, F.V.; HERNANDES, T.A.D.; RUIZ-CORRÊA, S.T. Sugarcane land use and water resources assessment in the expansion area in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v.133, p.1318-1327, 2016.

- SCARPARE, F.V.; HERNANDES, T.A.D.; RUIZ-CORRÊA, S.T. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. **Journal of Cleaner Production**, v.112, p.4576-4584, 2016.
- SCHULTZ, N.; REIS, V.M.; URQUIAGA, S. **Resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada**: fontes nitrogenadas, formas de aplicação, épocas de aplicação e efeito varietal. Documentos 298. Embrapa, n.1, p.1-56, 2015.
- SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.B. El Niño - southern oscillation and its impacts on local climate and sugarcane yield in Brazil. **Sugar Tech**, v.21, n.6, p.976-985, 2019.
- SILALERTRUKSA, T.; GHEEWALA, S.H. Land-water-energy nexus of sugarcane production in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, v.182, p.521-528, 2018.
- SIMÕES, W.L.; OLIVEIRA, A.R.; SOUZA, M.A.; REIS, V.M.; FERNANDES-JÚNIOR, P.I. Efficient inoculation of diazotrophic bacteria into sugarcane by the drip irrigation system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.54, p.6, 2019.
- SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. Ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 416 p. 2004.
- SOUZA, D.M.G.; REIN, T.A.R.; NUNES, R.S.; SANTOS JÚNIOR, J.D.G. **Recomendações para correção da acidez do solo para cana-de-açúcar no cerrado**. (Comunicado Técnico, 177). Planaltina: Embrapa Cerrados, 2015.
- SOUZA, C.A.A.; SILVA, T.G.F.; SOUZA, L.S.B. Straw management effects on sugarcane growth, nutrient cycling and water use in the Brazilian semiarid region. **Bragantia**, v.79, n.4, p.400-411, 2020.
- SZMRECSÁNYI, T. 1914-1939: Crescimento e crise da agroindústria açucareira no Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, 1988.
- TANG, P.; CHEN, C.; LI, H. Investigation of hydraulic performance based on response surface methodology for an agricultural chemigation proportional injector. **Water**, v.12, p.1-15, 2020.
- TONELLO, K.C.; GASPAROTO, E.A.G.; SHINZATO, E.T.; VALENTE, R.O.A.; DIAS, H.C.T. Precipitação efetiva em diferentes formações florestais na floresta nacional de Ipanema. **Revista Árvore**, v.38, n.2, p.383-390, 2014.
- VIAN, C.E.F. Agroindústria canavieira: Estratégias competitivas e modernização. Campinas: **Átomo**, 216p. 2003.
- VIAN, C.E.F.; PAULILLO, L.F.O.; SHIKIDA, P.F.A. Expansão e Modernização da produção integrada e açúcar e álcool no Centro-Sul do Brasil no século XX. Travesía. **Revista de História Económica y Social**, v.9, p.175-211, 2007.
- VIANNA, M.S.; SENTELHAS, P.C. Simulação do risco de *deficit* hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.4, p.237-246, 2014.
- VIEIRA FILHO, J.E.R. Fronteira agropecuária brasileira: Redistribuição produtiva, efeito poupa-terra e desafios estruturais logísticos. In: VIEIRA FILHO, J.E.R.; GASQUES, J.G. (Org.). **Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade**. Brasília: Ipea, p.89-108. 2016.
- WANDERLEY, L.R.S.; OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; SIMÕES NETO, D.E.; SANTOS, R.L. Nutritional requirement by irrigated Brazilian sugarcane varieties. **Sugar Tech**. 2021.
- WANG, J.; ZHANG, Y.; GONG, S. Effects of straw mulching on microclimate characteristics and evapotranspiration of drip-irrigated winter wheat in North China Plain. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.11, n.2, p.122-131, 2018.
- YADAV, R.N.S.; YADAV, S.; TEJRA, R.K. Labour saving and cost reduction machinery for sugarcane cultivation. **Sugar Tech**, v.5, n.1-2, p.7-10, 2003.

