

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Arroz tipo especial fertirrigado por gotejamento subsuperficial com
efluente tratado de laticínio

Luana Carolina Menegassi

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2022

Luana Carolina Menegassi
Bacharel em Engenharia de Biosistemas

Arroz tipo especial fertirrigado por gotejamento subsuperficial com efluente tratado de laticínio

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:
Profa. Dra. **TAMARA MARIA GOMES**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em Ciências. Área de concentração: Engenharia de sistemas agrícolas

Piracicaba
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Menegassi, Luana Carolina

Arroz tipo especial fertirrigado por gotejamento subsuperficial com efluente tratado de laticínio / Luana Carolina Menegassi. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2022.

118 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Reúso da água 2. *Oryza sativa* 3. Imagens térmicas 4. Salinidade.I.
Título

DEDICATÓRIA

A meu filho Augusto, que se encontra em meu ventre, e meu amor José Paulo, meu amor eterno.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida.

Aos meus pais, Jair e Luisa, e irmãos, Joeslaine e Anderson, por todo amor, carinho, apoio, dedicação e por serem o alicerce da minha vida. Minha eterna gratidão e amor.

A Profa. Dra. Tamara Maria Gomes pela orientação, constantes ensinamentos, dedicação, compreensão e confiança em meu trabalho. Sou imensamente grata pela oportunidade de trabalhar com você durante esses anos. O meu respeito, carinho e eterna gratidão.

Aos meus amigos pelo companheirismo, apoio, partilha dos conhecimentos e momentos de alegria.

A todos os professores que auxiliaram na minha formação acadêmica e profissional desde a graduação, em especial, Fabrício, Rogers, Claudinei, Edson e Giovana.

A todos os funcionários da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP) e da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), pelo apoio prestado, em especial a Davilmar, Paula, James, Ana Cristina, Josiane, Paulo Tonetti e Marcos Ferraz.

Aos integrantes do grupo de pesquisa GEBIO – Sistemas e Engenharia pela oportunidade do companheirismo, trabalho em grupo e apoio durante a condução do experimento.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e seus professores pela oportunidade de realização do curso.

A Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP) e seus professores a minha formação acadêmica e realização do experimento.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo financiamento do projeto de pesquisa, auxílio N° 2019/02921-2.

As pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| RESUMO | 7 |
| ABSTRACT | 9 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 2. REFERÊNCIAL TEÓRICO..... | 13 |
| 2.1. Arroz – <i>Oryza sativa</i> | 13 |
| 2.2. Irrigação por gotejamento..... | 19 |
| 2.3. Reúso da água na agricultura..... | 20 |
| 2.4. Efluente da produção de lácteos | 23 |
| 2.5. Análise de imagens térmicas na agricultura | 26 |
| Referências | 27 |
| 3. DESEMPENHO AGRÔNOMICO DE TRÊS CULTIVARES DE ARROZ DO TIPO ESPECIAL IRRIGADAS COM EFLUENTE TRATADO DE LATICÍNIO..... | 37 |
| Resumo | 37 |
| Abstract..... | 37 |
| 3.1. Introdução..... | 38 |
| 3.2. Material e Métodos..... | 40 |
| 3.3. Resultados e Discussão..... | 47 |
| 3.4. Conclusões..... | 58 |
| Referências | 59 |
| 4. EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA E DINÂMICA DE SAIS E NUTRIENTES NO CULTIVO DE ARROZ ARBÓRIO PELA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA COM EFLUENTE TRATADO DE LATICÍNIO | 65 |
| Resumo | 65 |
| Abstract..... | 65 |
| 4.1. Introdução..... | 66 |
| 4.2. Material e Métodos..... | 67 |
| 4.3. Resultados e Discussão..... | 73 |
| 4.4. Conclusões..... | 86 |
| Referências | 87 |

| | |
|---|-----|
| 5. IMAGENS TÉRMICAS PARA AVALIAÇÃO DE ESTRESSE EM PLANTAS DE ARROZ IRRIGADA POR GOTEJAMENTO COM EFLUENTE TRATADO DE LATICÍNIO | 93 |
| Resumo..... | 93 |
| Abstract | 93 |
| 5.1. Introdução | 94 |
| 5.2. Material e Métodos | 95 |
| 5.3. Resultados e Discussão | 102 |
| 5.4. Conclusões | 110 |
| Referências..... | 111 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 115 |
| APÊNDICE..... | 117 |

RESUMO

Arroz tipo especial fertirrigado por gotejamento subsuperficial com efluente tratado de laticínio

O cultivo do arroz irrigado tradicionalmente pelo sistema inundado demanda alto consumo de água, com baixa eficiência de aplicação. Como alternativa para uma agricultura conservacionista propõe-se a irrigação localizada por gotejamento subsuperficial, além da substituição da fonte de água, por meio do reúso dos efluentes agroindustriais, como das indústrias de laticínios. Dessa forma, esta pesquisa tem como hipótese a viabilidade técnica da irrigação de arroz do tipo especial fertirrigado por gotejamento subsuperficial, com efluente tratado de laticínio diluído, visando economia de fertilizante sintético, sem comprometer o sistema solo-planta, pelo efeito salino dessa água. O experimento foi desenvolvido em duas fases, em escala piloto, nas condições de ambiente protegido, no campus da USP Fernando Costa, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Pirassununga-SP, em delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições. A primeira fase foi conduzida entre novembro de 2019 a março de 2020, com o objetivo de avaliar o desenvolvimento de três cultivares de arroz do tipo especial (IAC 301, IAC 400 e IAC 600) irrigadas com efluente tratado de laticínio (ETL) e selecionar a cultivar mais tolerante à salinidade para o desenvolvimento da segunda fase. Foram utilizadas três fontes de irrigação (100% água, 50% ETL e 50% água e 100% ETL), conduzidas com a umidade do solo próximo à saturação. A segunda fase foi conduzida entre abril e outubro de 2021, com o objetivo de avaliar a resposta da cultivar IAC 301 (arroz do tipo arbóreo) sob duas condições de umidade do solo (saturação e capacidade de campo) e doses do ETL. Foram estudadas: (i) a produtividade dos grãos; (ii) a dinâmica de nutrientes e sódio; (iii) a eficiência do uso da água e do nitrogênio e; (iv) o estresse nas plantas de arroz pela análise de imagens termográficas. Na primeira fase (capítulo 1), os resultados mostram bom desempenho agrônômico das três cultivares, sob irrigação localizada. A cultivar IAC 400 foi a mais sensível a salinidade do efluente, no entanto, sem diferença de produção em relação as demais. Assim, optou-se por prosseguir os estudos com a cultivar de arroz IAC 301 (arroz arbóreo, comumente utilizado pela culinária italiana). Na segunda fase (capítulos 2 e 3), os resultados mostram que a concentração de sódio no ETL elevou o teor de sais na solução do solo, com dissolução para a camada mais profunda do solo estudada. A fonte de irrigação com 50% água e 50% ETL apresentou maior produtividade de grãos, maior eficiência do uso da água e do nitrogênio e foi capaz de suprir 100% da necessidade de fertilizante sintético (nitrogênio e potássio), em ambas condições de umidade do solo, sem risco de lixiviação de sódio e nitrato. As imagens térmicas processadas para determinação do índice para avaliação de estresse nas plantas de arroz, o NRCT (*Normalized Relative Canopy Temperature*) nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, mostrou maior sensibilidade ao estresse salino na fase vegetativa, adquirindo no tempo um reequilíbrio, confirmado nas fases de enchimento de grãos e colheita. O NRCT foi validado como um indicador de estresse salino e nutricional em plantas de arroz irrigadas com ETL, para a umidade do solo na capacidade de campo e saturação, respectivamente. Por fim, esta pesquisa aceita a hipótese inicialmente proposta ao comprovar a viabilidade técnica do reúso da água, na irrigação por gotejamento subsuperficial, de arroz tipo especial, com efluente tratado de laticínio diluído, no contexto de uma agricultura sustentável, visando a construção de sistemas de cultivos eficientes, em relação ao uso dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Reúso da água, *Oryza sativa*, Imagens térmicas, Salinidade

ABSTRACT

Special type rice fertigated by subsurface drip with dairy treated effluent

The rice cultivation traditionally irrigated by flooded system consumes large volumes of water, with low application efficiency. As an alternative for conservation agriculture, it is proposed the irrigation located by subsurface drip, in addition to the replacement of the water source, through the reuse of agroindustrial effluents, as well as dairy industries. Thus, this research has as hypothesis the technical feasibility of rice irrigation of the special type fertigated by subsurface drip, with diluted dairy treated effluent, aiming at saving synthetic fertilizer, without compromising the soil-plant system, by the saline effect of this water. The experiment was carried out in two phases, on a pilot scale, under the conditions of a protected environment, on the campus of USP Fernando Costa, Faculty of Animal Science and Food Engineering, Pirassununga-SP, in a randomized block design, with four replications. The first phase was conducted between November 2019 and March 2020, with the objective of evaluating the development of three special rice cultivars (IAC 301, IAC 400 and IAC 600) irrigated with dairy treated effluent (DTE) and to select the most salinity tolerant cultivar for the development of the second phase. Three irrigation sources (100% water, 50% DTE and 50% water and 100% DTE) were used, with soil moisture close to saturation. The second phase was conducted between April 2021 and October 2021, with the objective of evaluating soil moisture (saturation and field capacity) and DTE doses. The following were studied: (i) grain yield; (ii) the dynamics of nutrients and sodium; (iii) the efficiency of water and nitrogen use; (iv) stress in rice plants by the analysis of thermographic images. In the first phase (chapter 1), the results show good agronomic performance of the three cultivars under localized irrigation. The cultivar IAC 400 was the most sensitive to salinity, however, with no difference in production in relation to the other. Thus, it was decided to continue the research with rice cultivar IAC 301 (arbório rice, commonly used by Italian cuisine). In the second phase (chapters 2 and 3), the results show that the sodium concentration in the ETL increased the salt content in the soil solution, with dissolution for the deepest layer of the studied soil. The irrigation source with 50% water and 50% DTE showed higher grain yield, higher nitrogen and water efficiency use and was able to supply 100% of the need for synthetic fertilizer (nitrogen and potassium) in both soil moisture conditions, no risk of sodium leaching and nitrate. The thermal images were processed to determine the NRCT (Normalized Relative Canopy Temperature) index in the different crop stages of development. The values obtained from NRCT index showed higher sensitivity of plants to saline stress in the vegetative phase of rice, acquiring in time a rebalance, confirmed in the phases of grain filling and harvest. The NRCT was validated as an indicator of saline and nutritional stress in rice plants irrigated with treated dairy effluent, for soil moisture in field capacity and saturation, respectively. Finally, this research accepts the hypothesis initially proposed by proving the technical feasibility of water reuse in subsurface drip irrigation of special type rice, with treated water-treated effluent, in the context of sustainable agriculture, aiming at the construction of efficient cultivation systems in relation to the use of water resources.

Keywords: Water reuse, *Oryza sativa*, Thermal image, Salinity

1. INTRODUÇÃO

O grande paradigma da produção de alimentos está relacionado ao aumento da produtividade dos cultivos agrícolas com a conservação dos recursos naturais. Embora o Brasil seja considerado um país abundante em recursos hídricos, as irregularidades na distribuição das chuvas por conta da crise climática têm comprometido o abastecimento de água nas lavouras e a recarga dos mananciais, demandando tecnologias mais eficientes no uso da água, como no caso do cultivo de arroz irrigado, que utiliza o sistema inundado com alto consumo de água.

Além da quantidade, a qualidade da água é outro ponto de fragilidade, devido ao crescimento das atividades industriais e agroindustriais, com baixa eficiência nos tratamentos dos resíduos gerados. Uma das estratégias para racionalizar o uso dos recursos hídricos na orizicultura e reduzir a contaminação nos mananciais é a adoção de sistemas de irrigação por gotejamento, além do reúso da água. A irrigação localizada apresenta-se como um método eficiente, quando comparado a outros, por aplicar água em alta frequência e baixo volume. No caso do reúso da água, a irrigação com efluentes tratados da agroindústria, como os laticínios, é uma alternativa de substituição à água de melhor qualidade, conservando-as para usos mais nobres, como o abastecimento humano.

O reúso da água proporciona o fluxo de materiais e energia existentes no sistema, agregando valor aos resíduos, no caso dos efluentes. Quando essas águas residuárias são geradas pela agroindústria, em muitos casos, essa circularidade pode acontecer dentro da propriedade, ou seja, um laticínio instalado em uma área rural, pode gerar resíduos a serem utilizados nos cultivos agrícolas. Além de evitar os impactos dos lançamentos dos efluentes nos corpos hídricos, essa prática também reduz os custos com tratamentos, uma vez que os nutrientes presentes nessas fontes de água, são de interesse agrícola, possibilitando a economia de fertilizantes sintéticos.

Essa nova proposição de produção de arroz, associando a irrigação localizada, com uma fonte de água proveniente do laticínio, traz uma série de questionamentos, não só com relação ao desempenho agrônomo das plantas, mas também com relação a viabilidade técnica. Neste último caso, uma possibilidade é a aplicação em cultivares de arroz do tipo especial, cujo valor agregado de venda ao consumidor é elevado, quando comparado ao arroz tradicional.

O estado de São Paulo é o maior consumidor de arroz do país e a demanda por cultivares do tipo especial tem aumentado, principalmente por consumidores que buscam experiências gastronômicas diferenciadas. O Vale do Paraíba, pertencente a bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, a caminho do Rio de Janeiro, é a principal região produtora do estado em arroz do tipo especial irrigado, por possuir condições climáticas adequadas ao cultivo, além de ser uma região de fácil escoamento de produção aos maiores centros consumidores. Essa região também se destaca por ser a maior produtora de leite do estado de SP. A combinação desses dois setores, apresentasse como

uma oportunidade para a prática do reúso da água, como estratégia sustentável de agregação de valor aos produtos e resíduos gerados nesses sistemas produtivos.

No entanto, durante o processo de industrialização, os laticínios adicionam sais, como sódio, cujas quantidades permanecem após o tratamento dos efluentes, principalmente quando estes são restritos aos sistemas em nível primário e secundário. Em elevadas concentrações, a salinidade dessas águas, pode alterar as propriedades físico-químicas do solo e os processos fisiológicos nas plantas.

Outro ponto a ser considerado, visando a incorporação de tecnologias que ajude o produtor na tomada de decisão no manejo da cultura é o uso de técnicas não invasivas ou destrutivas, de resposta rápida, como uso de imagens térmicas, para identificação do estresse hídrico e/ou salino das plantas de arroz.

Diante do contexto, espera-se com esta pesquisa, aceitar a hipótese da viabilidade técnica da irrigação de arroz do tipo especial fertirrigado por gotejamento subsuperficial, com efluente tratado de laticínio diluído, visando economia de fertilizante sintético, sem comprometer o sistema solo-planta, pelo efeito salino dessa água. Sendo assim, os objetivos deste estudo foram: (i) avaliar o desempenho agrônômico de três cultivares de arroz do tipo especial; (ii) em uma cultivar de arroz, estudar diferentes doses de efluente tratado de laticínio, para manutenção das condições de umidade do solo e, o impacto na dinâmica de nutrientes e sódio, eficiência do uso da água e do nitrogênio e (iii) aplicar a técnica de imagens térmicas para auxiliar no manejo da cultura, como identificador de estresse.

A pesquisa de campo teve início em setembro de 2019, sendo desenvolvida até março de 2020 a primeira fase experimental, que compreende o primeiro objetivo deste estudo. Na finalização dessa etapa, o Brasil foi um dos países afetados pela pandemia do novo Corona vírus (Sars-CoV-2), causador da doença Covid-19, que na falta de imunizantes e de tratamento efetivo contra a doença, recomendou o isolamento social como medida de prevenção e controle.

A instituição de ensino restringiu o acesso às instalações de campo e laboratórios, sendo assim, a segunda fase experimental teve início em abril de 2021 e sofreu adequações metodológicas em relação a fonte do efluente de laticínio. O efluente de laticínio utilizado na primeira fase experimental foi proveniente do laticínio escola da Universidade. No início da segunda fase, com a paralisação deste setor, se fez necessário buscar efluente em um laticínio comercial, próximo a área experimental. No entanto, embora fossem de origens diferentes, ambos os resíduos apresentaram características físico-químicas semelhantes.

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1. Arroz – *Oryza sativa*

O arroz é um alimento básico na alimentação mundial, cujo cultivo ocupa uma área de 167 milhões de hectares e uma produção de 770 milhões de toneladas, sendo o maior consumo e produção concentrados no continente asiático (FAO, 2018). No Brasil, a área plantada é de 1,66 milhões de hectares e a produção de 11,38 milhões de toneladas, com produtividade média de 6.832 kg ha⁻¹ (CONAB, 2022).

Por ser a base da alimentação de vários povos, principalmente das populações com menor poder aquisitivo, o arroz é um cereal estratégico para a segurança alimentar e nutricional, com importância social, econômica, cultural e agrícola. O consumo médio mundial de arroz beneficiado é de 54 kg/pessoa/ano, sendo os países asiáticos com as médias mais elevadas (78 kg/pessoa/ano). Na América do Sul, são consumidos, em média, 29 kg/pessoa/ano, com destaque ao Brasil, como maior consumidor (32 kg/pessoa/ano) (SOSBAI, 2018).

O arroz produzido e consumido preferencialmente no mercado brasileiro é o arroz branco longo e fino, em que após a cocção os grãos ficam secos, macios e soltos. No entanto, as cultivares especiais têm se destacado no mercado nos últimos anos, para atender um público exigente as novas experiências culinárias em relação a sabor, aroma e textura. Essas cultivares do tipo especial atendem outros segmentos do mercado, como os destinados para a culinária italiana (IAC 301), japonesa (IAC 400, BRS 358), além dos aromáticos vermelho (IAC 500, BRS 902) e preto (IAC 600).

As pesquisas com cultivares especiais têm se concentrado em avaliar o valor nutricional do produto (Ito & Lacerda, 2019), a presença de compostos antioxidantes (Walter et al., 2013) e a caracterização da expressão fenotípica (Mongiano et al., 2020). No campo, os estudos têm avaliado o efeito do nitrogênio na síntese de aroma do arroz aromático (Yang et al., 2012), a caracterização bioquímica e fisiológica na eficiência do uso do nitrogênio (Vijayalakshmi et al., 2015) e a produtividade em diferentes regimes de irrigação (Ishfaq et al., 2020). No entanto, ainda há pouca literatura disponível com relação a demanda nutricional e hídrica, tolerância a salinidade, tratos culturais e viabilidade econômica dessas cultivares.

2.1.1. Fatores fenológicos e bioclimáticos

O arroz é uma cultura anual da família das poáceas e seu ciclo de cultivo pode durar de 3 a 6 meses dependendo da cultivar e das condições ambientais. O ciclo de desenvolvimento das plantas de arroz é composto de três fases (Quadro 1). A primeira fase é a vegetativa que compreende a

germinação à iniciação do primórdio floral. A segunda fase de desenvolvimento é a reprodutiva que compreende a iniciação do primórdio floral até o florescimento. A terceira fase compreende a maturidade fisiológica do grão.

Quadro 1. Descrição das diferentes fases de desenvolvimento do arroz.

| Fase | Estágio de crescimento | Definição |
|------------------------|----------------------------|--|
| Fase 1: vegetativa | Germinação | Definido como o estágio em que a ponta do coleóptilo se tornou visível pela primeira vez. |
| | Iniciação do perfilhamento | Definido como o estágio de crescimento da cultura quando o primeiro perfilho da parte aérea principal é visível. |
| | Perfilhamento ativo | Definido como o estágio de desenvolvimento no qual ocorre a taxa máxima de perfilhamento por unidade de tempo. |
| Fase 2: reprodutiva | Iniciação da panícula | Definido como a iniciação do primórdio floral. |
| | Emborrachamento | Definido como o estágio de desenvolvimento no qual a panícula é envolvida pela bainha da folha superior. |
| | Floração | Definido como o estágio fisiológico em que as flores são visíveis na panícula. |
| Fase 3: maturação | Maturidade fisiológica | Definido como o estágio de crescimento em que ocorre o enchimento ativo dos grãos, acumulação de amido e perda de umidade. |

Fonte: Adaptado de Fageria & Santos (2013).

O conhecimento das características fenológicas é de suma importância para entender como os fatores climáticos, como fotoperíodo, radiação solar, temperatura, precipitação e concentração de dióxido de carbono [CO₂], assim como nutricionais, alteram o desenvolvimento da planta.

O fotoperíodo pode ser definido como a quantidade de horas de luz entre o nascer e pôr do sol, sendo o valor de 9 a 10 horas de luz considerado ótimo para a maioria das variedades de arroz (Yoshida, 1981). Valores superiores ou inferiores ao fotoperíodo ótimo influenciam a duração da fase vegetativa e a diferenciação da panícula, dependendo da sensibilidade da cultivar (Yoshida, 1981). Assim, o conhecimento da resposta ao fotoperíodo auxilia no planejamento do cultivo de arroz, principalmente nas condições brasileiras, em que o cultivo ocorre em regiões tropicais e subtropicais (Streck et al., 2006).

Quanto à disponibilidade de radiação solar, existe uma correlação positiva com a produção de grãos de arroz, uma vez que melhora o desempenho fotossintético foliar, com aumento da produção de biomassa e, conseqüentemente, rendimento dos grãos (Huang et al., 2016), além de aumentar o teor de carboidrato (Arai-Sanoh et al., 2020). Em comparação com a radiação solar, a temperatura é o fator que mais afeta o rendimento e qualidade dos grãos, uma vez que altera diversos mecanismos fisiológicos e bioquímicos das plantas, tais como, a fotossíntese, a respiração, o balanço hídrico, estabilidade da membrana, entre outros (Zhou et al., 2021). A temperatura ótima

durante a fase vegetativa tem sido relatada como 28,4 °C, sendo os limites mínimo e máximo de 16,4 °C e 35,3 °C, respectivamente (Sánchez et al., 2014). Na fase reprodutiva, a temperatura ideal é de 24,2 °C e os limites mínimo e máximo são 20,7 a 31,3 °C, respectivamente, sendo o valor de 33°C, o máximo aceitável para manter a fertilidade das espiguetas (Bheemanahalli et al., 2016).

O efeito da temperatura pode ser observado em todas as fases de desenvolvimento das plantas de arroz. As baixas temperaturas durante a germinação inibe ou reduz o crescimento dos coleóptilos (Donoso Ñanculao et al., 2013), estrutura fundamental para o estabelecimento das mudas, e na fase vegetativa reduz a taxa de crescimento da cultura e o acúmulo de biomassa (Deng et al., 2015), com redução do número de panículas, peso dos grãos e características relacionadas à qualidade (Huang et al., 2013). Como uma forma de aclimação das plantas, as altas temperatura reduzem a taxa fotossintética e aumentam a taxa transpiratória, durante a fase vegetativa (Sánchez-Reinoso et al., 2014). No estágio reprodutivo ocorre o aborto das flores e durante o enchimento dos grãos, o estresse térmico afeta todos os eventos bioquímicos levando a redução do tamanho dos grãos (Kaushal et al., 2016).

A umidade relativa do ar também tem influência no processo de produção, afetando positivamente a fertilidade das espiguetas, quando em condições de baixa umidade e elevada temperatura (Yan et al., 2010). Tal mecanismo, se deve ao aumento da taxa transpiratória em condições de baixa umidade relativa, que reduz a temperatura da espiguetas, aumentando a viabilidade dos grãos de pólen, e conseqüentemente, a fertilidades das espiguetas (Weerakoon et al., 2008).

A disponibilidade de água para a planta de arroz é outro fator limitante durante todo o ciclo da cultura, uma vez que o déficit hídrico inibe o perfilhamento e o alongamento das folhas na fase vegetativa, enquanto na fase reprodutiva ocorre a inibição de panículas, dessecação das espiguetas e esterilidade das espiguetas (Tsujimoto et al., 2021). Guimarães et al. (2016) observaram que a demanda de água durante o cultivo do arroz irrigado foi maior no início da fase reprodutiva do que na fase de enchimento do grão e esses autores encontraram que a produtividade foi mais afetada quando ocorre estresse hídrico na fase de enchimento, uma vez que o déficit hídrico causa a senescência precoce, encurtando o enchimento, com grãos mais leves e com menor teor de amido (Prathap et al., 2019).

Outro ponto importante a se considerar, às condições de cultivos na rizicultura, são os efeitos das mudanças climáticas nos regimes das chuvas, na temperatura e na concentração de CO₂ atmosférico, no caso deste último, estudos mostram comportamentos contraditórios. O incremento na concentração de CO₂ atmosférico pode contribuir para o aumento (Arai-Sanoh et al., 2020) ou redução (Chandio et al., 2021) da produção de arroz. No entanto, independentemente das condições

estudadas, as alterações climáticas continuam a ser um obstáculo fundamental para aumentar a produtividade agrícola.

2.1.2. Desempenho agrônômico

Os componentes de produção do arroz estão relacionados com o número de panículas por unidade de área, número de espiguetas por panícula, peso dos grãos e fertilidade das espiguetas. A produção dos grãos é determinada por uma relação entre todos esses componentes de produção, sendo o número de panículas por unidade de área, o componente que mais afeta a produtividade (Fageria, 2014).

Os fatores determinantes para o número de panículas por unidade de área é a densidade no semeio ou o desenvolvimento dos perfilhos durante o crescimento vegetativo. O número de espiguetas por panícula é influenciado pelo estado nutricional das plantas durante o crescimento vegetativo e o peso do grão é determinado principalmente pela genética (Counce & Wells, 1990).

Sabe-se que o estresse salino afeta a absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, a produção (Casanova et al., 2002), embora seja considerado uma cultura moderadamente sensível à salinidade, tolerando valores de condutividade elétrica de 3,3 dS m⁻¹ no extrato de saturação do solo e 2,2 dS m⁻¹ na água de irrigação (Ayers & Westcot, 1999).

A tolerância das plantas de arroz aos sais é estabelecida por diferentes mecanismos genéticos, moleculares e fisiológicos que são variáveis em cada fase de desenvolvimento da planta (Chen et al., 2021). Dentre estes, podemos destacar a manutenção da absorção de água, com maior síntese da proteína aquaporina (Liu et al., 2013), a regulação da perda de água, com a biossíntese do ácido abscísico (Kumar et al., 2013) e o ajuste osmótico nos tecidos (Kobayashi et al., 2017).

O ajuste osmótico pode ser realizado com a maior absorção de íons potássio (Kobayashi et al., 2017), para manter a relação Na⁺:K⁺ baixa na folha e restringir a movimentação de sódio para os tecidos vitais (Singh & Sarkar, 2014). Também pode ocorrer o transporte do sódio para a bainha e folhas mais velhas e a síntese de compostos contendo nitrogênio, fazendo com que sob salinidade, as folhas mais velhas apresentam maior concentração de nitrato do que as folhas mais novas (Reddy et al., 2017). Tal mecanismo, corrobora com o fato da aplicação de compostos orgânicos no solo reduzirem os efeitos da salinidade e melhorarem a produção (Medina Litardo et al., 2022), além de melhorar a estabilidade dos agregados do solo, o acúmulo de Ca e P e o crescimento das raízes (Chen et al., 2021).

A forma de produção, pelo manejo adotado, também altera a disponibilidade e absorção de nutrientes, principalmente do nitrogênio. A diferença entre o sistema inundado e sequeiro é a

formação de uma zona anaeróbia no solo (reduzida) no primeiro caso (Fageria & Knupp, 2013). Na condição alagada, quase todo nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-) presentes no solo são perdidos por desnitrificação, lixiviação ou ambos, dependendo das propriedades físicas do solo (Patrick & Wyatt, 1964). Assim, tem-se a mineralização do nitrogênio orgânico em amoniacal (NH_4^+), forma predominante de absorção pelo arroz nesses sistemas, enquanto no sistema aeróbio, o nitrato passa a ser a forma predominante (Fageria & Knupp, 2013).

Pesquisas têm mostrado que a recuperação de fertilizantes nitrogenados é maior em ambiente aeróbio do que inundado, com possibilidade de reduzir a necessidade de fertilizante sintético (Fukai & Mitchell, 2022; Sidhu et al., 2019). A reposição adequada de nutrientes no solo é importante para a produtividade das culturas, em geral, deficiência ou excesso de nitrogênio (N) são mais perceptíveis nas lavouras, devido às funções que o nitrogênio exerce nas plantas. No entanto, o excesso de nitrogênio na cultura do arroz poderá retardar a maturação, provocar o acamamento das plantas e o aparecimento de brusone (Fageria, 2014).

A recomendação da adubação nitrogenada para o arroz inundado é variável de acordo com o solo e a cultivar utilizada. Geralmente, recomendam-se duas aplicações de N em cobertura, sendo 50% no perfilhamento e 50% antes da diferenciação da panícula (Raij et al., 1997). No entanto, pouco se sabe sobre o manejo adequado do N e a eficiência no uso do N em sistema fertirrigado por gotejamento, bem como sobre os demais nutrientes importantes para a produtividade do arroz. O fornecimento desses fertilizantes nas doses adequadas, fontes e épocas de aplicação são fatores importantes que influenciam a produtividade e sustentabilidade da produção.

2.1.3. Manejo da água no cultivo do arroz

O cultivo do arroz no Brasil é predominante realizado em sistemas de irrigação por inundação e em terras altas. O plantio em terras altas corresponde a 25% da área cultivada e 10% da produção, enquanto o arroz inundado concentra 75% da área cultivada e 90% da produção (ANA, 2020).

A produção em sistema de terras altas ocorre em solos na condição aeróbia e pode ser cultivado sob irrigação por aspersão ou sequeiro, dependendo do regime pluvial (Lacerda & Nascente, 2021). O cultivo no sistema de sequeiro está sujeito à distribuição irregular das chuvas, ocasionando déficit hídrico nas plantas e perda de produtividade. Assim, para aumentar a produtividade nesses sistemas têm-se desenvolvido trabalhos de melhoramento genético das plantas, sob condições de estresse hídrico, e práticas de manejo que melhoram a eficiência do uso das terras agrícolas e da água (Ramirez-Villegas et al., 2018).

A produção em sistema inundado, conhecido como várzea, se concentra na região sul do Brasil e apresenta produtividade em torno de 7.403 kg ha^{-1} , enquanto no arroz de sequeiro é de 2.134 kg ha^{-1} (ANA, 2020). No sistema inundado são necessários um volume médio de água de 6 a 12 mil $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para um período de irrigação de 80 a 100 dias (SOSBAI, 2018), com média de $8,9 \text{ mil m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (ANA, 2020). Essa elevada demanda de água está relacionada as perdas por evaporação, percolação e fluxo lateral, que corresponde a 44% do volume total de água utilizado nos campos de arroz (Chapagain & Hoekstra, 2011).

Assim, diante do cenário de escassez hídrica e da proposta da ONU, com a Agenda 2030 por meio dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), são necessárias práticas e tecnologias que melhoram a eficiência do uso da água na cultura do arroz. Dentre essas práticas, podemos destacar: a irrigação intermitente (Suárez; Sánchez-Román, 2016); a manutenção da umidade do solo próxima à saturação (Carracelas et al., 2019); técnica de umedecimento e secamento do solo (Ishfaq et al., 2020; Poddar et al., 2022); irrigação por aspersão (Pinto et al., 2020); manutenção de diferentes potenciais de água no solo (-20 kPa a -60 kPa) (Kumar et al., 2017) e sistemas irrigados por gotejamento (Coltro et al., 2017; Sharda et al., 2017). No entanto, os resultados da aplicação dessas técnicas ainda não encontram consenso. Pesquisas mostram que a produtividade de grãos pode ser menor em condições de umidade do solo abaixo da saturação, devido a fatores como doenças, competição com plantas daninhas e disponibilidade de nutrientes (Carracelas et al., 2019).

Outro fator, está associado a cultivar, que quando desenvolvida para o ambiente inundado, se desenvolve melhor em condições semelhantes (Zain et al., 2014), como relatado por Pinto et al. (2020) ao estudar uma cultivar de arroz inundado em sistema de irrigação por aspersão.

Estratégias de desenvolvimento de cultivares tolerantes à seca aliada ao déficit hídrico foram estudadas por Kumar et al. (2017), que encontraram diferenças na produção entre cultivares conduzidas com potencial hídrico no solo de -30 e -40 kPa, devido a presença de aminoácidos antioxidantes que contribuíram para tolerar o estresse hídrico.

Estudos que relatam economia de água, sem afetar a produção e, portanto, melhoria da eficiência no uso da água (EUA) foram relatados por Ishfaq et al. (2020), com a técnica de umedecimento e secamento do solo, cujo aumento foi de 44% à 50% na EUA em relação ao sistema inundado, e Sharda et al. (2017) em sistema irrigado por gotejamento com 0,81 a 0,88 kg de grãos por m^{-3} de água.

Fukai & Mitchell (2022) ao estudarem 41 trabalhos de arroz cultivado em condições aeróbias encontraram uma ampla variação na EUA com valores entre 0,2 e $1,5 \text{ kg m}^{-3}$. Assim, é importante que para cada condição ambiental, de solo, cultivar e manejo sejam desenvolvidas ou adaptadas alternativas específicas, para melhorar a eficiência da água, sem comprometer a produtividade da cultura.

2.2. Irrigação por gotejamento

A irrigação por sistema de gotejamento é uma tecnologia que permite a aplicação da água próximo as raízes da planta, com baixa vazão e alta frequência. O efeito dessa aplicação no solo é a formação do bulbo molhado, de tamanho e forma variáveis dependendo da textura do solo. Assim, no solo arenoso, o bulbo tende a ser mais estreito e longo, sendo necessário que os gotejadores estejam mais próximos entre si, enquanto no solo argiloso, o bulbo é mais arredondado e menos profundo, com os gotejadores mais distantes entre si (Tessler, 2022).

A superposição dos bulbos forma a faixa molhada, local onde o desenvolvimento do sistema radicular é intenso, potencializando a absorção da água e nutrientes, reduzindo as perdas por lixiviação e volatilização e, conseqüentemente, melhorando a produtividade (Sidhu et al., 2019). Além disso, a irrigação por gotejamento permite a fertirrigação, nutrição e *drip protection*, fazendo com que a malha hidráulica seja um sistema eficiente de distribuição de água, solução nutritiva, defensivos agrícolas, biológicos e orgânicos necessários à lavoura, além de limitar a evaporação do solo, o crescimento das plantas invasoras e diminuir os custos operacionais (Tessler, 2022).

A irrigação por gotejamento pode ser superficial ou subsuperficial. A aplicação da água na subsuperfície do solo tem sido aplicada nas mais diversas culturas, como cereais, frutas e hortaliças, com aumento da produtividade e eficiência no uso da água, comparado ao gotejamento superficial (Wang et al., 2022). Na cultura do arroz, a irrigação localizada, tem proporcionado maior densidade de raízes (Parthasarathi et al., 2018), economia de água e energia (Sharda et al., 2017), redução da emissão de gases estufa e acidificação do solo (Coltro et al., 2017) e melhora na eficiência do uso do nitrogênio (Sidhu et al., 2019), sem comprometer a produtividade.

A substituição da irrigação por inundação, pelo gotejamento subsuperficial no cultivo do arroz, provocará alterações no comportamento agrônômico da planta e no ambiente, que requer a introdução de mudanças importantes no manejo da cultura para garantir uma produção eficiente. Dentre estes, podemos destacar o manejo da fertirrigação, controle de plantas daninhas, alterações no microclima, dinâmica da água e nutrientes no solo, entre outros. Além disso, deve-se considerar a profundidade e espaçamento entre gotejadores, uma vez que a vazão dos emissores são variáveis para cada tipo de solo, mesmo em pequenas profundidades (5cm) (Nogueira et al., 2021).

Quando se considera a aplicação de águas residuárias, a irrigação por gotejamento subsuperficial é uma importante tecnologia para garantir a segurança microbiológica em relação a cultura irrigada e ao irrigante, uma vez que não terão contato direto com a fonte de água. No entanto, por essas fontes de água conterem nutrientes e sais, o manejo nessa condição também deve ser estudado para minimizar os riscos produtivos e de contaminação ambiental.

2.3. Reúso da água na agricultura

As primeiras notícias da utilização de águas residuárias para irrigação e fertilização de terras agrícolas foi documentado na Idade do Bronze (cerca de 3200–1100 aC) pelas civilizações que se desenvolveram na China, Egito, Vale do Indo, Mesopotâmia e Creta. Posteriormente, as civilizações grega e romana começaram a fazer uso da técnica e, nos tempos modernos, os primeiros adeptos foram as cidades europeias e americanas, sendo hoje projetada no mundo todo (Angelakis et al., 2018).

Quando a irrigação é manejada corretamente, os benefícios advindos dessa técnica são de ordem ambiental, social e econômica. Essa prática poderá reduzir a pressão sobre a captação de água e favorecer a economia de fertilizantes (Menegassi et al., 2020), com incremento de matéria orgânica e nutrientes no solo (Abegunrin et al., 2016) e da atividade microbiana (Liu & Haynes, 2013). Os produtores também serão capazes de atender a demanda hídrica da cultura, permitindo uma oferta regular de alimentos.

Por outro lado, a viabilidade do reúso depende da combinação de diversos fatores como a proximidade entre a planta de tratamento do efluente e o local de aplicação. O reúso da água advindo das agroindústrias favorece essa logística, uma vez que o resíduo gerado na unidade produtora pode ser utilizado dentro da propriedade, como insumo, em outro sistema produtivo.

Outros aspectos, são as características do efluente tratado, o tipo de solo, as condições climáticas da região e a cultura que será irrigada. A qualidade biológica e química dos efluentes utilizados na irrigação deve ser constantemente monitorada, a fim de não proporcionar a propagação de patógenos e a contaminação do solo (Sou Dakouré et al., 2013) e o entupimento do sistema. As taxas de aplicação dessas fontes de água não devem elevar as concentrações de elementos contaminantes no solo, como metais pesados e sódio, vindo a se tornar fontes de contaminação das águas subterrâneas. Nesse contexto, a escolha da cultura é de suma importância, com preferência aquelas com elevada capacidade de absorção, produção de matéria seca e tolerância a salinidade e toxicidade.

Estudos têm encontrado respostas positivas do arroz quanto à irrigação com água residuária proveniente de esgoto doméstico (Trinh et al., 2013), com aumento no rendimento e teor de proteína dos grãos (Ouoba et al., 2022). Respostas positivas também têm sido relatadas com efluente de laticínio (Kaur et al., 2018) e lixiviado industrial (Carlos et al., 2015). No entanto, quando se considera águas residuárias com elevadas concentrações de nutrientes e sais, diluições entre 25% e 50% têm sido consideradas adequadas para manter os parâmetros produtivos (Kaur et al., 2018) e minimizar os efeitos de contaminação do solo (Carlos et al., 2015). A aplicação de forma diluída e

fracionada também reduz as perdas de volatilização e lixiviação do nitrogênio, fazendo com que a eficiência de absorção do mesmo aumente (Li et al., 2022).

2.3.1. Legislação para reúso da água

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, também conhecida como Lei das Águas, considera a água como bem de domínio público e um recurso natural limitado, dotado de valor econômico. Estabelece, ainda, que em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais e que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas (BRASIL, 1997). Como um dos objetivos da Lei é a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, o reúso é uma alternativa para promover estes preceitos e para o desenvolvimento sustentável.

A Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), nº 54/2005, define reúso da água como a utilização de água residuária. Segundo a mesma resolução, o reúso direto da água pode ser definido como a condução direta da água de reúso aos locais em que serão utilizadas, sem o lançamento ou diluição em corpos hídricos superficiais ou subterrâneos (BRASIL, 2005b). As modalidades de reúso da água que são contemplados pela resolução são: reúso para fins urbanos, agrícolas e florestais, ambientais, industriais e para a aquicultura. Dentro da modalidade de reúso para fins agrícolas e florestais, a Resolução nº 121 de 16 de dezembro de 2010 (BRASIL, 2010), estabelece diretrizes e critérios para esta prática: “Art. 5º - A aplicação de água de reúso para fins agrícolas e florestais não pode apresentar riscos ou causar danos ambientais e à saúde pública.”

Além disso, o produtor da água de reúso é responsável pelas informações constantes da caracterização e monitoramento da qualidade dessa água. Dessa forma, qualquer impacto oriundo da aplicação da água de reúso, deverá ser informado ao órgão competente e ao respectivo Comitê de Bacia Hidrográfica (BRASIL, 2010).

No estado de São Paulo, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), publicou duas normas para regulamentar a aplicação de efluentes agroindustriais. Dentre estas, tem-se a Norma CETESB P4.231/2005, com o objetivo de estabelecer critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento de cana-de-açúcar, revisada três vezes, sendo a última atualização publicada em 2015, e, a Norma CETESB P04.002/2010, com o objetivo de estabelecer critérios e procedimentos para armazenamento, transporte e aplicação, em solo agrícola, de efluentes líquidos e lodos gerados pela atividade de processamento de frutas cítricas.

Recentemente, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução nº 503/2021 definiu critérios e procedimentos para o reúso em sistemas de fertirrigação de efluentes provenientes de indústrias de alimentos, bebidas, laticínios, frigoríficos e graxarias. Essa resolução estabelece que o efluente deve estar estabilizado antes da aplicação, devendo atender os seguintes parâmetros: remoção de DBO maior que 60%, pH entre 5 e 9; óleos minerais: até 20 mg L⁻¹; óleos vegetais e gorduras animais: até 50 mg L⁻¹; parâmetros e valores máximos estabelecidos na Resolução CONAMA nº 430, de 2011, art. 16, II, exceto aqueles de interesse agrônomo, como boro total, cobre dissolvido, ferro dissolvido, manganês dissolvido, nitrogênio amoniacal e zinco total (BRASIL, 2011).

Como mostrado na Resolução nº 503/2021, alguns dispositivos legais não tratam especificamente do reúso da água, entretanto, devem ser considerados no desenvolvimento desta prática, como a NBR 13.969/1997, estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que dá providências do esgoto de origem doméstica e cita que o esgoto pode ser reutilizado para fins em que não seja exigido o uso de água potável, desde que este seja sanitariamente seguro, como por exemplo, lavagem de pisos e veículos, descarga de vasos sanitários e irrigação de jardins (ABNT, 1997).

Outro exemplo, é a Resolução CONAMA nº 357/2005, alterada pela Resolução CONAMA nº 430/ 2011 que trata da classificação dos corpos de água e diretrizes para o seu enquadramento, além de estabelecer as condições e padrões de lançamento de efluentes. A Deliberação do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CRH) do Estado de São Paulo, nº 156/2013, que apesar de não estar relacionada a fins agrícolas e florestais, estabelece diretrizes para o reúso direto de água não potável, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) de sistemas públicos para fins urbanos e a Resolução 8.468/1976 que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente e determina como deve ser o descarte de efluentes, considerando o lançamento direto e indireto no corpo receptor de efluentes.

Embora a legislação sobre a prática de reúso da água vem avançando nos últimos anos, fica evidente que a regulamentação do setor está em estágio incipiente, devido à escassez de informações no nível federal, estadual e municipal, que garantam a segurança dos usuários (consumidores, operadores), para as diferentes possibilidades de reúso, em relação a diversidade das fontes geradoras. Além do mais, a diversidade brasileira em termos de clima, solo, fontes de efluente, sistemas de tratamentos dos efluentes, nível social e econômico da região, evidenciam as lacunas do conhecimento técnico e científico que precisam ser sanados, para que o arcabouço legal não seja frágil a ponto de permitir o uso indiscriminado da prática, colocando em risco a saúde das pessoas e o meio ambiente, nem muito restritiva, tornando a prática do reúso inviável.

2.4. Efluente da produção de lácteos

A produção de leite e as indústrias de laticínios desempenham um importante papel na economia brasileira, pois o Brasil é o sexto produtor mundial de leite (FAO, 2021), cujos os estados com maior produção são: Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo e Goiás, responsáveis por 83,9% do total de leite no país (CONAB, 2021).

O setor lácteo é caracterizado por uma diversidade de produtos, sendo a matéria-prima o leite, definido como o produto oriundo da ordenha, de animais saudáveis, que quando submetido ao processamento resulta em diversos produtos lácteos, obtidos mediante a elaboração do leite, que podem conter aditivos alimentícios e outros ingredientes necessários para sua elaboração, tais como leite pasteurizado, queijo, manteiga, margarina, requeijão, iogurte, creme de leite, leite condensado, leite em pó, sorvetes e dentre outros (BRASIL, 2005a).

As indústrias de laticínios no Brasil também são diversificadas compreendendo pequenos produtores, cooperativas e multinacionais. As operações fundamentais e comuns a todos os processos produtivos envolvem as etapas de: recepção do leite e ingredientes, processamento (filtração, clarificação, padronização e pasteurização), tratamento térmico, elaboração de produtos, envase e embalagem, armazenamento e expedição, além da limpeza, presente em cada etapa do processo produtivo (CETESB, 2008).

O consumo de água em um laticínio é bastante variável em decorrência do produto processado (Tabela 1) e do porte do empreendimento. Silva et al. (2018) avaliaram que o consumo de água entre laticínios de pequeno, médio e grande porte foram de 1,1 a 12,0 litros de água por litro de leite processado, sendo os laticínios de pequeno porte os maiores consumidores.

Tabela 1. Carga volumétrica por operação na indústria de laticínio.

| Operação | m ³ de água por m ³ de leite processado |
|------------------------------------|---|
| Lavagem de tanques e tubulações | 0,05 – 0,11 |
| Lavagem de caminhão tanque | 0,01 – 0,02 |
| Fabricação de manteiga | 0,10 – 0,40 |
| Pasteurização e embalagem do leite | 0,19 – 0,70 |
| Fabricação de leite condensado | 1,20 – 5,00 |
| Fabricação de queijo | 1,00 – 5,00 |

Fonte: Adaptado Brião et al. (2022).

A água é consumida principalmente durante a limpeza das instalações e como meio de transferência de calor para processos de aquecimento e resfriamento (Prasad et al., 2011). As etapas de limpeza consomem mais de 80% da demanda de água, devido a presença de resíduos orgânicos e

minerais aderidos às superfícies dos equipamentos, como proteínas, gorduras, carboidratos e sais minerais (Elabras Veiga et al., 2022).

De modo geral, 36% do volume de água retirado pelos laticínios é consumido durante o processo e 64% desse volume retorna para o ambiente (ANA, 2017). Assim, essas agroindústrias geram grande quantidade de águas residuárias, que em decorrência da diversidade dos produtos fabricados, possuem características variáveis.

O efluente lácteo é composto por uma mistura do resíduo do leite e produtos derivados, com agentes de limpeza (Brião et al., 2022). São caracterizados por elevadas concentrações de nutrientes (sobretudo nitrogênio e fósforo), matéria orgânica e sais, mesmo após tratamento (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros analisados nos efluentes lácteos antes e após tratamento.

| Parâmetro | Sem tratamento | | | Após tratamento | |
|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| | Múrcia et al. (2018) ^a | Silva et al. (2018) ^a | Donatti et al. (2018) ^{b1} | Múrcia et al. (2018) ^{a2} | Silva et al. (2018) ^{a3} |
| DBO (mgL ⁻¹) | 1.786 - 2.500 | 1.544 - 19.964 | - | 71 - 357 | 2.013 - 8.278 |
| DQO (mgL ⁻¹) | 4.225 - 51.000 | 4.823 - 61.045 | - | 1.792 - 32.900 | 6.458 - 25.506 |
| SST (mgL ⁻¹) | 5,04 – 15,52 | 23 – 3.541 | - | 2,69 - 10,80 | 1.033 - 2.241 |
| N amoniacal (mgL ⁻¹) | 0,07 – 0,14 | - | 51,24 ± 31,11 | 0,07 – 0,14 | - |
| PT (mgL ⁻¹) | - | 11,70 – 456,00 | 5,70 ± 1,78 | - | 51,10 – 104,00 |
| pH | 4,07 - 5,72 | 3,00 – 11,80 | 8,03 ± 0,35 | 4,25 - 6,47 | 3,70 – 7,60 |
| CE (dS m ⁻¹) | - | 0,54 - 6,98 | 3,53 ± 1,35 | - | 2,06 - 4,48 |

DBO: demanda bioquímica de oxigênio; DQO: demanda química de oxigênio; SST: sólidos suspensos totais; NT: nitrogênio total; PT: fósforo total. a: valores mínimos e máximos. b: dado médio com seu respectivo desvio padrão. 1: após tratamento anaeróbico; 2: floculação e fotocatalise; 3: não informado. Fonte: Adaptado de (Brião et al., 2022; Murcia et al., 2018; Silva et al., 2018; Donatti et al., 2017).

A lactose, proteína oriunda da produção de queijo, é a principal fonte de matéria orgânica, os sais inorgânicos (sais de cálcio, fosfato e sódio) e o nitrato são provenientes dos agentes sanitizantes, e, os aromatizantes, corantes e o cloreto de sódio podem estar presentes nessas águas residuárias, dependendo dos produtos lácteos fabricados (Brião et al., 2022).

O soro gerado na fabricação do queijo, quando não utilizado para produção de subprodutos, tem sido considerado o principal poluente do setor, devido a sua alta carga orgânica e volume gerado. Em média, para cada quilo de queijo produzido, são necessários 10 litros de leite, gerando 9 litros de soro (Leite et al., 2012).

Esses efluentes para serem lançados nos corpos hídricos devem atender os padrões das legislações ambientais. A resolução CONAMA nº 430/2011 dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluente, conforme apresentado na Tabela 3.

A combinação das Tabelas 2 e 3 mostra, que alguns dos valores dos parâmetros analisados após tratamento (Tabela 2), não atendem o padrão de lançamento proposto pela legislação (Tabela 3), principalmente quando observado os teores de nitrogênio. O não atendimento aos padrões de lançamento, pode estar atribuído, a baixa eficiência dos sistemas de tratamento, a sobrecarga do processo, como por exemplo, o baixo aproveitamento do soro, entre outras causas (Silva et al., 2018).

Tabela 3. Parâmetros para efluentes líquidos lançados diretamente no corpo receptor.

| Parâmetros | Valores permitidos |
|---|--------------------|
| pH | 5 -9 |
| Temperatura (°C) | < 40 |
| Sólidos sedimentáveis (mg L ⁻¹) | < 1 |
| Sólidos suspensos (mg L ⁻¹) | 0 |
| Óleos e graxas (mg L ⁻¹) | < 50 |
| N amoniacal (mg L ⁻¹) | < 20 |
| Eficiência de remoção – DBO (%) | > 60 |

Fonte: Adaptado de BRASIL (2011).

Existe um passivo ambiental grande em relação aos resíduos gerados por esse setor, com potencial poluidor dos recursos hídricos. Diante desse contexto, o reúso da água na irrigação agrícola é uma estratégia sustentável para garantir a segurança hídrica, uma vez que reduz a descarga dos poluentes nos corpos receptores, conserva os recursos hídricos para usos mais nobres, como o abastecimento humano, além de suprir a demanda de água pelas culturas, principalmente nas estações mais secas e em regiões onde os recursos hídricos são limitados.

No entanto, é necessário monitorar as características do efluente à necessidade nutricional da cultura para aumentar a sustentabilidade econômica e ambiental do sistema (Mainardis et al., 2022). Considerando as concentrações variáveis dos elementos presentes nas águas residuárias dos laticínios, o monitoramento permanente, e a longo prazo, é necessário, principalmente do sódio. Também, deve-se considerar a avaliação dos riscos em condições locais ou regionais, uma vez que as características do solo e clima são variáveis (Partyka & Bond, 2022).

2.5. Análise de imagens térmicas na agricultura

O uso de imagem térmica tem sido amplamente aplicado nas mais diversas áreas, tais como: engenharia civil, medicina, aeroespacial, industrial, militar, farmacêutica e veterinária. Mais recentemente, têm-se utilizado a termovisão na agricultura para detecção de pragas e doenças em culturas, estresse hídrico, estimativa do status hídrico do solo, produtividade de culturas, avaliação da maturidade de frutas e vegetais, monitoramento da umidade do grão e pecuária (Vadivambal & Jayas, 2011).

O princípio da técnica consiste em detectar a temperatura superficial do objeto, por meio da absorção da energia infravermelha emitida pelo mesmo, uma vez que todo corpo com temperatura acima do zero absoluto emite radiação térmica (Cortizo et al., 2008).

Na situação de déficit hídrico a cultura tende a fechar os estômatos para diminuir as perdas de água por transpiração, aumentando assim a temperatura do dossel, uma vez que não há dissipação de calor para o meio (Taiz & Zeiger, 2013). Assim, a distribuição da temperatura superficial do dossel pode ser um bom indicador do estresse hídrico (Khorsandi et al., 2018) que pode ser medido por meio de termômetros infravermelhos ou câmeras térmicas.

Como os termômetros determinam a temperatura de forma pontual, ou seja, apenas em uma parte da folha, as câmeras térmicas são mais eficazes para estimar o estresse hídrico, uma vez que a distribuição da temperatura é baseada na área do dossel (Jones & Leinonen, 2003).

Um importante conceito que permitiu o desenvolvimento da técnica para o estudo do status de água na cultura foi a definição do índice *Stress Degree Day* (SDD), como a diferença entre a temperatura do dossel e do ar (Jackson et al., 1977). Posteriormente, Idso et al. (1981) propuseram a normalização do SDD, para levar em consideração as diferenças do déficit de pressão do vapor d'água (DPV). Assim, foi definido o *Crop Water Stress Index* (CWSI), que usa a temperatura de bulbo úmido como a linha de base inferior e a temperatura de bulbo seco como a linha de base superior para calcular o CWSI, com base na temperatura do ar e no déficit de pressão de vapor.

No entanto, no campo as mudanças das condições ambientais são frequentes e podem influenciar essas medições, além da dificuldade de determinar a temperatura de bulbo úmido e seco. Assim, é importante aprimorar os métodos de avaliação do estresse hídrico nas culturas, de acordo com cada região, cultura e manejo para que sejam simples, confiáveis, práticos e econômicos.

O índice *Normalized Relative Canopy Temperature* (NRCT) pode ajudar a identificar o status de estresse hídrico em grandes áreas, sem a necessidade de medições adicionais, como das variáveis climáticas para determinar a temperatura de bulbo úmido e seco (Elsayed et al., 2017). Esse índice é semelhante ao CWSI e é calculado com base na temperatura infravermelha real medida no dossel, sendo a temperatura de bulbo úmido e seco, respectivamente, a temperatura mais baixa (linha de

base inferior) e a temperatura mais elevada (linha de base superior) medida em todo o teste de campo (Elsayed et al., 2015).

Sob estresse salino, a planta reduz a transpiração, com diminuição da área foliar e da taxa de crescimento e, conseqüentemente, a produtividade (Tian et al., 2020). Assim, a temperatura do dossel está positivamente associada a maior produtividade. Estudos têm avaliado na cultura do arroz, forte correlação entre a produtividade e os índices de estresse, para detectar cultivares tolerantes a seca (Guimarães et al., 2010), estresse salino (Siddiqui et al., 2014), taxa fotossintética (Kondo et al., 2021), enchimento dos grãos (Li et al., 2021) e para discriminar e contar grãos cheios e não cheios de uma panícula de arroz (Kumar et al., 2020). No entanto, carece de estudos nessa área, que correlacionam o estresse hídrico e a produtividade da cultura sob irrigação com efluente, uma vez a irrigação com efluente altera a distribuição de temperatura do dossel, devido a presença de elementos presentes nesses resíduos (Dehnavi et al., 2015).

Assim, a análise da distribuição de temperatura superficial das culturas que são irrigadas com efluente é uma ferramenta que poderá auxiliar o manejo da irrigação, bem como o controle da dose de efluente a ser aplicada, que em conjunto com outras variáveis, poderá melhorar o manejo da água em sistemas irrigados com efluentes, principalmente nas regiões tropicais.

Referências

- Abegunrin, T. P., Awe, G. O., Idowu, D. O., & Adejumobi, M. A. (2016). Catena Impact of wastewater irrigation on soil physico-chemical properties, growth and water use pattern of two indigenous vegetables in southwest Nigeria. *Catena*, 139, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.014>
- Ayers R.S. & Westcot D.W. (1999). A qualidade da água na agricultura. Tradução de Gheyi H.R., Medeiros J.F., Damasceno F.A.V. Campina Grande: UFPB. 218p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). NBR 13969 - Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Disponível em: <https://www.acquasana.com.br/legislacao/nbr_13969.pdf>.
- ANA - Agência Nacional de Águas (2017). Água na indústria: uso e coeficientes técnicos / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 37p.
- ANA - Agência Nacional de Águas (2020). Mapeamento do arroz irrigado no Brasil. Brasília: ANA, 40 p.
- Angelakis, A. N., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B. E., & Tchobanoglous, G. (2018). Water reuse: From ancient to modern times and the future. *Frontiers in Environmental Science*, 6(MAY), 26. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2018.00026/BIBTEX>
- Arai-Sanoh, Y., Okamura, M., Hosoi, J., Nagata, K., Takai, T., Ogiwara, H., Ishikawa, J., Sakai, H., Tokida, T., & Kobayashi, N. (2020). Yield response of high-yielding rice cultivar Oonari to different environmental conditions. *Plant Production Science*, 23(1), 69–74. https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1651207/SUPPL_FILE/TPPS_A_1651207_SM1874.DOCX

- Bheemanahalli, R., Sathishraj, R., Tack, J., Nalley, L. L., Raveendran, M., & Jagadish, K. S. V. (2016). Temperature thresholds for spikelet sterility and associated warming impacts for sub-tropical rice. *Agricultural and Forest Meteorology*, 221, 122–130. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2016.02.003>
- BRASIL (1976). Resolução nº 8.468, de 8 de setembro de 1976. Dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente. Publicado no Diário Oficial.
- BRASIL (1997). Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília.
- BRASIL (2005a), Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Publicado no Diário Oficial.
- BRASIL (2005b). Resolução n. 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece diretrizes e critérios para a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal, definido pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Publicado no Diário Oficial.
- BRASIL (2010). Resolução n. 121, de 16 de dezembro de 2010. Estabelece diretrizes e critérios para a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal, definida na Resolução CNRH nº 54, de 28 de novembro de 2005. Publicado no Diário Oficial.
- BRASIL (2011). Resolução CONAMA nº 430, de 16 de maio de 2011. Diário Oficial da União, Brasília.
- BRASIL (2021). Resolução CONAMA nº 503, de 14 de dezembro de 2021. Diário Oficial da União, Brasília.
- Brião, V. B., Hemkemeier, M., Gamba, V., Brião, E. B., Seibel, F. I., & Borilli, L. (2022). Sustainable Processing: Dairy Plant Effluents – Minimization and Treatment. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 821–835. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818766-1.00353-6>
- Carlos, F. S., Marafon, A. J., Andrezza, R., Anghinoni, I., Tedesco, M. J., & Camargo, F. A. de O. (2015). Alterações eletroquímicas e dinâmica de nutrientes na solução do solo em arroz irrigado com lixiviado industrial tratado. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 39(2), 466–474. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20140127>
- Carracelas, G., Hornbuckle, J., Rosas, J., & Roel, A. (2019). Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. *Agricultural Water Management*, 222, 161–172. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.05.049>
- Casanova, D., Goudriaan, J., Forner, M. M. C., & Withagen, J. C. M. (2002). Rice yield prediction from yield components and limiting factors. *European Journal of Agronomy*, 17(1), 41–61. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(01\)00137-X](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(01)00137-X)
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2005). Norma Técnica P4-231. Vinhaça - Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/P4_231.pdf>.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2008). Guia técnico ambiental da indústria de produtos lácteos. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/consumosustentavel/wp-content/uploads/sites/20/2013/11/laticinio.pdf>>.

- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2010). Norma Técnica P4-002. Efluentes e lodos fluidos de indústrias cítricas - Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/servicos/normas/pdf/P4002.pdf>>.
- Chandio, A. A., Jiang, Y., Ahmad, F., Adhikari, S., & Ain, Q. U. (2021). Assessing the impacts of climatic and technological factors on rice production: Empirical evidence from Nepal. *Technology in Society*, 66, 101607. <https://doi.org/10.1016/J.TECHSOC.2021.101607>
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2011). *The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.11.012>
- Chen, M., Zhang, S., Liu, L., Wu, L., & Ding, X. (2021). Combined organic amendments and mineral fertilizer application increase rice yield by improving soil structure, P availability and root growth in saline-alkaline soil. *Soil and Tillage Research*, 212, 105060. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2021.105060>
- Coltro, L., Marton, L. F. M., Pilecco, F. P., Pilecco, A. C., & Mattei, L. F. (2017). Environmental profile of rice production in Southern Brazil: A comparison between irrigated and subsurface drip irrigated cropping systems. *Journal of Cleaner Production*, 153, 491–505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.207>
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (2021). Análise mensal leite e derivados, Jan/Fev 2021. Brasília. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-deleite/item/download>
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (2022). Acompanhamento da safra brasileira de grãos. v. 9, Safra 2021/22, n. 4, Brasília.
- Cortizo, E. C., Barbosa, M. P., & Souza, L. A. C. (2008). Estado da arte da termografia. *Forum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável*, 2, 158–193.
- Counce, P.A & Wells, B.R (1990). Rice plant population density effect on early-season nitrogen requirement. *J. Prod. Agric.*, 3, 390-393.
- CRH - Conselho Estadual de Recursos Hídricos (2013). Deliberação nº 156 de 11 de dezembro de 2013. Disponível em: https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/deliberation//6132/deliberacao-crh-156_reuso.pdf
- Dehnavi, S., Abkar, A. A., Maghsoudi, Y., & Dehnavi, E. (2015). a Study for Remote Detection of Industrial Effluents' Effect on Rice Using Thermal Images. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1-W5, 147–152. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W5-147-2015>
- Deng, N., Ling, X., Sun, Y., Zhang, C., Fahad, S., Peng, S., Cui, K., Nie, L., & Huang, J. (2015). Influence of temperature and solar radiation on grain yield and quality in irrigated rice system. *European Journal of Agronomy*, 64, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.12.008>
- Donatti, R. N., Gomes, T. M., Menegassi, L. C., Tommaso, G., & Rossi, F. (2017). Sodium phytoremediation by green manure growing in soil irrigated with wastewater of dairy industry. *Engenharia Agrícola*, 37(4), 665–675. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n4p665-675/2017>

- Donoso Ñanculao, G., Paredes Cárcamo, M., Arbiza de los Santos, O., & Becerra Velásquez, V. (2013). Cold tolerance evaluation in Chilean rice genotypes at the germination stage. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 73(1), 3–8. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392013000100001>
- Elabras Veiga, L. B., de Souza, S. L. Q., & Vendramel, S. M. R. (2022). Environmental aspects in dairy processing. *Dairy Foods*, 311–337. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820478-8.00008-0>
- Elsayed, S., Elhoweity, M., Ibrahim, H. H., Dewir, Y. H., Migdadi, H. M., & Schmidhalter, U. (2017). Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water status and grain yield of wheat under different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 189, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.05.001>
- Elsayed, S., Rischbeck, P., & Schmidhalter, U. (2015). Comparing the performance of active and passive reflectance sensors to assess the normalized relative canopy temperature and grain yield of drought-stressed barley cultivars. *Field Crops Research*, 177, 148–160. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2015.03.010>
- Fageria, N. K. (2014). Mineral nutrition of rice. Boca Raton: CRC Press, 552p
- Fageria, N. K. & Knupp, A. M. (2013). Upland Rice Phenology and Nutrient Uptake in Tropical Climate. *Journal of Plant Nutrition*, 36(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.724136>
- Fageria, N. K. & Santos, A.B. (2013) Lowland rice growth and development and nutrient uptake during growth cycle. *Journal of Plant Nutrition*,36(12), 1841-1852. DOI: 10.1080/01904167.2013.816727
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2018). Rice market monitor. 21(1). Acesso em: <https://www.fao.org/3/I9243EN/i9243en.pdf>.
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2021). Dairy market review. Acesso em: <https://www.fao.org/3/cb4230en/cb4230en.pdf>
- Fukai, S., & Mitchell, J. (2022). Factors Determining Water Use Efficiency in Aerobic Rice. *Crop and Environment*. <https://doi.org/10.1016/J.CROPE.2022.03.008>
- Guimarães, C. M., Stone, L. F., Lorieux, M., De Oliveira, J. P., De, G. C., Alencar, O., & Dias, R. A. A. (2010). Infrared thermometry for drought phenotyping of inter and intra specific upland rice lines (Issue 2).
- Guimarães, C. M., Stone, L. F., & Silva, A. C. D. L. (2016). Evapotranspiration and grain yield of upland rice as affected by water déficit. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 441–446. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n5p441-446>
- Huang, M., Jiang, L., Zou, Y., & Zhang, W. (2013). On-farm assessment of effect of low temperature at seedling stage on early-season rice quality. *Field Crops Research*, 141, 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.10.019>
- Huang, M., Shan, S., Zhou, X., Chen, J., Cao, F., Jiang, L., & Zou, Y. (2016). Leaf photosynthetic performance related to higher radiation use efficiency and grain yield in hybrid rice. *Field Crops Research*, 193, 87–93. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2016.03.009>
- Idso, S.B, Jackson, R.D., Pinter Jr., P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L. (1981). Normalizando o parâmetro estresse-grau-dia para a variabilidade ambiental. *Agrícola. Meteorol.* , 24, 45-55

- ISHFAQ, M., AKBAR, N., ANJUM, S. A., & ANWAR-IJL-HAQ, M. (2020). Growth, yield and water productivity of dry direct seeded rice and transplanted aromatic rice under different irrigation management regimes. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(11), 2656–2673. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62876-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62876-5)
- Ito, V. C., & Lacerda, L. G. (2019). Black rice (*Oryza sativa* L.): A review of its historical aspects, chemical composition, nutritional and functional properties, and applications and processing technologies. *Food Chemistry*, 301(July), 125304. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125304>
- Jackson, R.D., Reginato, R.J., Idso, S.B. (1977). Temperatura do dossel do trigo: uma ferramenta prática para avaliar as necessidades de água. *Recursos Hídricos. Res.*, 13, 651-656
- Jones, H. G., & Leinonen, I. (2003). Thermal Imaging for the Study of Plant Water Relations. *Journal of Agricultural Meteorology*, 59(3), 205–217. <https://doi.org/10.2480/AGRMET.59.205>
- Kaur, V., Sharma, G., & Kirpalani, C. (2018). Agro-potentiality of dairy industry effluent on the characteristics of *Oryza sativa* L. (Paddy). *Environmental Technology & Innovation*, 12, 132–147. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2018.08.009>
- Kaushal, N., Bhandari, K., Siddique, K. H. M., & Nayyar, H. (2016). Food crops face rising temperatures: An overview of responses, adaptive mechanisms, and approaches to improve heat tolerance. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1134380>
- Khorsandi, A., Hemmat, A., Mireei, S. A., Amirfattahi, R., & Ehsanzadeh, P. (2018). Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. *Agricultural Water Management*, 204, 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.012>
- Kobayashi, N. I., Yamaji, N., Yamamoto, H., Okubo, K., Ueno, H., Costa, A., Tanoi, K., Matsumura, H., Fujii-Kashino, M., Horiuchi, T., Nayef, M. al, Shabala, S., An, G., Ma, J. F., & Horie, T. (2017). OsHKT1;5 mediates Na⁺ exclusion in the vasculature to protect leaf blades and reproductive tissues from salt toxicity in rice. *The Plant Journal*, 91(4), 657–670. <https://doi.org/10.1111/TPJ.13595>
- Kondo, R., Tanaka, Y., Katayama, H., Homma, K., & Shiraiwa, T. (2021). Continuous estimation of rice (*Oryza sativa* (L.)) canopy transpiration realized by modifying the heat balance model. *Biosystems Engineering*, 204, 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.01.016>
- Kumar, K., Kumar, M., Kim, S. R., Ryu, H., & Cho, Y. G. (2013). Insights into genomics of salt stress response in rice. *Rice*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/1939-8433-6-27/FIGURES/2>
- Kumar, A., Nayak, A. K., Pani, D. R., & Das, B. S. (2017). Physiological and morphological responses of four different rice cultivars to soil water potential based deficit irrigation management strategies. *Field Crops Research*, 205, 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.026>
- Kumar, A., Taparia, M., Madapu, A., Rajalakshmi, P., Marathi, B., & Desai, U. B. (2020). Discrimination of filled and unfilled grains of rice panicles using thermal and RGB images. *Journal of Cereal Science*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103037>
- Lacerda, M.C. & Nascente, A.S. (2021). Tecnologias para o cultivo do arroz de terras altas em sistema de plantio direto na região do Cerrado. Circular técnica 94, Santo Antônio de Goiás.

- Leite, M. T., Antonio De Souza Barrozo, M., & Ulio Ribeiro, E. J. ´. (2012). Canonical Analysis Technique as an Approach to Determine Optimal Conditions for Lactic Acid Production by *Lactobacillus helveticus* ATCC 15009. *International Journal of Chemical Engineering*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/303874>
- Liu, Y. Y., & Haynes, R. J. (2013). Effect of disposal of effluent and paunch from a meat processing factory on soil chemical and microbial properties. *Water, Air, and Soil Pollution*, 224(9). <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1655-5>
- Liu, C., Fukumoto, T., Matsumoto, T., Gena, P., Frascaria, D., Kaneko, T., Katsuhara, M., Zhong, S., Sun, X., Zhu, Y., Iwasaki, I., Ding, X., Calamita, G., & Kitagawa, Y. (2013). Aquaporin OsPIP1;1 promotes rice salt resistance and seed germination. *Plant Physiology and Biochemistry*, 63, 151–158. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2012.11.018>
- Li, Y., Xu, J., Liu, X., Liu, B., Liu, W., Jiao, X., & Zhou, J. (2022). Win-win for monosodium glutamate industry and paddy agriculture: Replacing chemical nitrogen with liquid organic fertilizer from wastewater mitigates reactive nitrogen losses while sustaining yields. *Journal of Cleaner Production*, 347, 131287. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131287>
- Li, Y., Zhou, Q., He, M., Xu, H., Li, G., Ding, Y., Paul, M., & Liu, Z. (2021). Dissection of environmental and physiological effects on the temperature difference between superior and inferior spikelets within a rice panicle. *Crop Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.10.016>
- Mainardis, M., Cecconet, D., Moretti, A., Callegari, A., Goi, D., Freguia, S., & Capodaglio, A. G. (2022). Wastewater fertigation in agriculture: Issues and opportunities for improved water management and circular economy. *Environmental Pollution*, 296, 118755. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.118755>
- Medina Litardo, R. C., García Bendezú, S. J., Carrillo Zenteno, M. D., Pérez-Almeida, I. B., Parismoreno, L. L., & Lombeida García, E. D. (2022). Effect of mineral and organic amendments on rice growth and yield in saline soils. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21(1), 29–37. <https://doi.org/10.1016/J.JSSAS.2021.06.015>
- Menegassi, L. C., Rossi, F., Dominical, L. D., Tommaso, G., Montes, C. R., Gomide, C. A., & Gomes, T. M. (2020). Reuse in the agro-industrial: Irrigation with treated slaughterhouse effluent in grass. *Journal of Cleaner Production*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119698>
- Mongiano, G., Titone, P., Pagnoncelli, S., Sacco, D., Tamborini, L., Pilu, R., & Bregaglio, S. (2020). Phenotypic variability in Italian rice germplasm. *European Journal of Agronomy*, 120, 126131. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2020.126131>
- Murcia, J. J., Hernández-Laverde, M., Rojas, H., Muñoz, E., Navío, J. A., & Hidalgo, M. C. (2018). Study of the effectiveness of the flocculation-photocatalysis in the treatment of wastewater coming from dairy industries. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 358, 256–264. <https://doi.org/10.1016/J.JPHOTOCHEM.2018.03.034>
- Nogueira, V. H. B., Diotto, A. V., Thebaldi, M. S., Colombo, A., Silva, Y. F., Lima, E. M. de C., & Resende, G. F. L. (2021). Variation in the flow rate of drip emitters in a subsurface irrigation system for different soil types. *Agricultural Water Management*, 243, 106485. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106485>

- Ouoba, N., Phung, L. D., Sasaki, A., Pham, D. V., & Watanabe, T. (2022). Drip fertigation with treated municipal wastewater and soil amendment with composted sewage sludge for sustainable protein-rich rice cultivation. *Environmental Technology & Innovation*, 102569. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2022.102569>
- Parthasarathi, T., Vanitha, K., Mohandass, S., Vered, E. (2018). Evaluation of Drip Irrigation System for Water Productivity and Yield of Rice. *Agronomy Journal*, 110(6), 2378–2389. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2018.01.0002>
- Partyka, M. L., & Bond, R. F. (2022). Wastewater reuse for irrigation of produce: A review of research, regulations, and risks. *Science of The Total Environment*, 828, 154385. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.154385>
- Patrick, Wm. H., & Wyatt, R. (1964). Soil Nitrogen Loss as a Result of Alternate Submergence and Drying. *Soil Science Society of America Journal*, 28(5), 647–653. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1964.03615995002800050021X>
- Pinto, M. A. B., Parfitt, J. M. B., Timm, L. C., Faria, L. C., Concenço, G., Stumpf, L., & Nörenberg, B. G. (2020). Sprinkler irrigation in lowland rice: Crop yield and its components as a function of water availability in different phenological phases. *Field Crops Research*, 248, 107714. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2020.107714>
- Poddar, R., Acharjee, P. U., Bhattacharyya, K., & Patra, S. K. (2022). Effect of irrigation regime and varietal selection on the yield, water productivity, energy indices and economics of rice production in the lower Gangetic Plains of Eastern India. *Agricultural Water Management*, 262, 107327. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107327>
- Prasad, P., Pagan, R., Kauter, M., Price, N. (2011). Eco-efficiency for the dairy processing industry. Environmental Management Centre, 141p.
- Prathap, V., Kishwar, Ali., Singh, Archana., Vishwakarma, Chandrapal., Krishnan, V., Chinnusamy, V., & Tyagi, A. (2019). Starch accumulation in rice grains subjected to drought during grain filling stage. *Plant Physiology and Biochemistry*, 142, 440–451. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.07.027>
- Raij, B. van. et al. (1997). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 285p. (Boletim técnico 100).
- Ramirez-Villegas, J., Heinemann, A. B., Pereira de Castro, A., Breseghello, F., Navarro-Racines, C., Li, T., Rebolledo, M. C., & Challinor, A. J. (2018). Breeding implications of drought stress under future climate for upland rice in Brazil. *Global Change Biology*, 24(5), 2035–2050. <https://doi.org/10.1111/GCB.14071>
- Reddy, I. N. B. L., Kim, B. K., Yoon, I. S., Kim, K. H., & Kwon, T. R. (2017). Salt Tolerance in Rice: Focus on Mechanisms and Approaches. In *Rice Science* (Vol. 24, Issue 3, pp. 123–144). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2016.09.004>
- Sánchez, B., Rasmussen, A., & Porter, J. R. (2014). Temperatures and the growth and development of maize and rice: A review. *Global Change Biology*, 20(2), 408–417. <https://doi.org/10.1111/GCB.12389>

- Sánchez-Reinoso, A. D., Garcés-Varón, G., & Restrepo-Díaz, H. (2014). Biochemical and physiological characterization of three rice cultivars under different daytime temperature conditions. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 74(4), 373–379. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392014000400001>
- Sharda, R., Mahajan, G., Siag, M., Singh, A., & Chauhan, B. S. (2017). Performance of drip-irrigated dry-seeded rice (*Oryza sativa* L.) in South Asia. *Paddy and Water Environment*, 15(1), 93–100. <https://doi.org/10.1007/s10333-016-0531-5>
- Siddiqui, Z. S., Cho, J. il, Park, S. H., Kwon, T. R., Ahn, B. O., Lee, G. S., Jeong, M. J., Kim, K. W., Lee, S. K., & Park, S. C. (2014). Phenotyping of rice in salt stress environment using high-throughput infrared imaging. *Acta Botanica Croatica*, 73(1), 149–158. <https://doi.org/10.2478/botcro-2013-0027>
- Sidhu, H. S., Jat, M. L., Singh, Y., Sidhu, R. K., Gupta, N., Singh, P., Singh, P., Jat, H. S., & Gerard, B. (2019). Sub-surface drip fertigation with conservation agriculture in a rice-wheat system: A breakthrough for addressing water and nitrogen use efficiency. *Agricultural Water Management*, 216, 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.019>
- Silva, R. R., Siqueira, E. Q., Nogueira, I. S. (2018). Impactos ambientais de efluentes de laticínios em curso d'água na Bacia do Rio Pomba. *Eng. Sanit. Ambiental*, 23(2), 217-228. DOI: 10.1590/S1413-41522018138062
- Singh, D. P., & Sarkar, R. K. (2014). Distinction and characterization of salinity tolerant and sensitive rice cultivars as probed by the chlorophyll fluorescence characteristics and growth parameters. *Functional Plant Biology*, 41(7), 727–736. <https://doi.org/10.1071/FP13229>
- Sou Dakouré, M. Y., Mermoud, A., Yacouba, H., Boivin, P. (2013). Impacts of irrigation with industrial treated wastewater on soil properties. *Geoderma*, 200–201, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.008>
- SOSBAI - Sociedade sul-brasileira de arroz irrigado (2018). Arroz Irrigado: recomendações da pesquisa para o Sul do Brasil. Cachoeirinha: SOSBAI, 205p.
- Streck, N.A., Bosco, L.C, Michelon, S., Rosa, H.T., Walter, L.C., de Paula, G.M., Camera, C., Lago, I., Marcolin, E. (2006). Avaliação da resposta ao fotoperíodo em genótipos de arroz irrigado. *Bragantia*, 65(4), 533-541. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052006000400001>
- Suárez, D. F. P. & Sánchez-Román, R. M. (2016). Consumo de água em arroz irrigado por inundação em sistema de múltiplas entradas. *Irriga*, 1(1), 78–95.
- Taiz, L. & Zeiger, E. (2013). *Fisiologia vegetal*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.
- Tessler, M.H. (2022). Irrigação por gotejamento: histórico e evolução tecnológica. In: *Agricultura irrigada no Brasil: ciência e tecnologia*, 1ed. Piracicaba: ESALQ; Viçosa: ABID, 397 p. DOI: 10.11606/9786587391236
- Tian, F., Hou, M., Qiu, Y., Zhang, T., & Yuan, Y. (2020). Salinity stress effects on transpiration and plant growth under different salinity soil levels based on thermal infrared remote (TIR) technique. *Geoderma*, 357, 113961. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2019.113961>

- Trinh, L. T., Duong, C. C., van der Steen, P., & Lens, P. N. L. (2013). Exploring the potential for wastewater reuse in agriculture as a climate change adaptation measure for Can Tho City, Vietnam. *Agricultural Water Management*, 128, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.06.003>
- Tsujimoto, Y., Fuseini, A., Inusah, B. I. Y., Dogbe, W., Yoshimoto, M., & Fukuoka, M. (2021). Different effects of water-saving management on canopy microclimate, spikelet sterility, and rice yield in the dry and wet seasons of the sub-humid tropics in northern Ghana. *Field Crops Research*, 260, 107978. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2020.107978>
- Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2011). Applications of Thermal Imaging in Agriculture and Food Industry-A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 4(2), 186–199. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0333-5>
- Vijayalakshmi, P., Vishnukiran, T., Ramana Kumari, B., Srikanth, B., Subhakar Rao, I., Swamy, K. N., Surekha, K., Sailaja, N., Subbarao, L. v., Raghuvveer Rao, P., Subrahmanyam, D., Neeraja, C. N., & Voleti, S. R. (2015). Biochemical and physiological characterization for nitrogen use efficiency in aromatic rice genotypes. *Field Crops Research*, 179, 132–143. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2015.04.012>
- Walter, M., Marchesan, E., Massoni, P. F. S., da Silva, L. P., Sartori, G. M. S., & Ferreira, R. B. (2013). Antioxidant properties of rice grains with light brown, red and black pericarp colors and the effect of processing. *Food Research International*, 50(2), 698–703. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.09.002>
- Wang, H., Wang, N., Quan, H., Zhang, F., Fan, J., Feng, H., Cheng, M., Liao, Z., Wang, X., & Xiang, Y. (2022). Yield and water productivity of crops, vegetables and fruits under subsurface drip irrigation: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 269, 107645. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107645>
- Weerakoon, W. M. W., Maruyama, A., & Ohba, K. (2008). Impact of humidity on temperature-induced grain sterility in rice (*Oryza sativa* L). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194(2), 135–140. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00293.x>
- YAN, C., DING, Y., WANG, Q., LIU, Z., LI, G., MUHAMMAD, I., & WANG, S. (2010). The impact of relative humidity, genotypes and fertilizer application rates on panicle, leaf temperature, fertility and seed setting of rice. *Journal Of Agricultural Science*, 148, 329–339. <https://doi.org/10.1017/S0021859610000018>
- Yang, S., Zou, Y., Liang, Y., Xia, B., Liu, S., Ibrahim, M., Li, D., Li, Y., Chen, L., Zeng, Y., Liu, L., Chen, Y., Li, P., & Zhu, J. (2012). Role of soil total nitrogen in aroma synthesis of traditional regional aromatic rice in China. *Field Crops Research*, 125, 151–160.
- Yoshida, S (1981). Fundamentals of rice crop science. Los Banos: IRRI. 269p
- Zain, N. A. M., Ismail, M. R., Putted, A., Mahmood, M., & Islam, M. R. (2014). Impact of cyclic water stress on growth, physiological responses and yield of rice (*Oryza sativa* L.) grown in tropical environment. *Ciência Rural*, 44(12), 2136–2141. <https://doi.org/10.1590/0103-8478CR20131154>

ZHOU, N. bing, ZHANG, jun, FANG, S. liang, WEI, H. yan, & ZHANG, H. cheng. (2021). Effects of temperature and solar radiation on yield of good eating-quality rice in the lower reaches of the Huai River Basin, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(7), 1762–1774. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63561-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63561-4)

3. DESEMPENHO AGRÔNOMICO DE TRÊS CULTIVARES DE ARROZ DO TIPO ESPECIAL IRRIGADAS COM EFLUENTE TRATADO DE LATICÍNIO

Resumo

O cultivo do arroz irrigado, tradicionalmente pelo sistema inundado, consome grande volume de água, com baixa eficiência. Como alternativa para uma agricultura conservacionista propõe-se a irrigação localizada por gotejamento subsuperficial, além da substituição da fonte de água, por meio do reúso dos efluentes agroindustriais, como dos laticínios. Dessa forma, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a aplicação de efluente tratado de laticínio (ETL), por sistema de gotejamento subsuperficial, em três cultivares de arroz, do tipo especial, em ambiente protegido. O experimento foi desenvolvido em ambiente protegido, no campus da USP Fernando Costa, na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), Pirassununga-SP. O clima da região é considerado do tipo Cwa na classificação de Koppen e o solo foi classificado como Latossolo vermelho distrófico, textura média arenosa. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial (3x3), sendo três cultivares, IAC 301 (italiano), IAC 400 (japônico) e IAC 600 (preto), irrigados com três fontes de irrigação (100% água, 50% ETL e 50% água e 100% ETL), com quatro repetições. Foram avaliadas as características do efluente, a solução química do solo, o desempenho produtivo, eficiência no uso da água de irrigação e o uso do nitrogênio. Os resultados mostram grande potencial do aporte de nutrientes pelo efluente de laticínio, principalmente para N e K, mas com alto risco salino. Todas as cultivares se desenvolveram com o uso da irrigação localizada, com lâminas que variaram de 678 mm a 904 mm. O arroz japonês foi o mais afetado pela presença do sódio no efluente, quando comparada a produtividade dos grãos (PG) com a fonte 100% água. As fontes de irrigação não alteraram a PG para o arroz arbóreo e preto. A mistura de 50% água e 50% ETL foi capaz de suprir 100% da necessidade de fertilizante sintético (nitrogênio e potássio). Os valores de eficiência no uso da água variaram entre 2,37 a 3,13 kg m⁻³, sem influência da dose de efluente, confirmando o potencial da irrigação por gotejamento, com efluente, no cultivo do arroz. Os teores de nitrogênio foliar obtidos a partir do fornecido pelas fontes com efluente foram adequados, no entanto apresentou baixa eficiência no uso deste nutriente.

Palavras-chave: Eficiência no uso da água; eficiência do nitrogênio; agricultura conservacionista

Abstract

The irrigated rice cultivation, traditionally by the flooded system, consumes a large volume of water, with low efficiency. As alternative to conservation agriculture, it is proposed irrigation located by subsurface drip, in addition to the replacement of the water source, through the reuse of agroindustrial effluents, as well as dairy products. Thus, the research objective was to evaluate the dairy treated effluent (DTE) application, by subsurface drip system, in three rice cultivars, special type, in a protected environment. The experiment was carried out in protected environment, on the campus of USP Fernando Costa, at the Faculty of Animal Science and Food Engineering (FZEA/USP), Pirassununga-SP. The climate is considered Cwa type in Koppen classification and the soil was classified as dystrophic red latosol, sandy medium texture. The experimental design was in randomized blocks, in a factorial scheme (3x3), three cultivars, IAC 301 (Italian), IAC 400 (Japonic) and IAC 600 (black), irrigated with three irrigation sources (100% water, 50% DTE and 50% water and 100% DTE), with four replications. Effluent characteristics, soil chemical solution, productive performance, efficiency in irrigation water use and nitrogen use were evaluated. The results show great potential of nutrient intake by dairy effluent, mainly N and K, but with high saline risk. All cultivars developed with the use of localized irrigation, with slides ranging from 678 mm to 904 mm.

Japanese rice was most affected by sodium effluent, when compared to grain yield (GY) with the source 100% water. The irrigation sources did not change GY for Italian and black rice. The mixture of 50% water and 50% DTE was able to supply 100% of the need for synthetic fertilizer (N and K). The water use efficiency ranged from 2.37 to 3.13 kg m⁻³, without influence of effluent dose, confirming the potential of drip irrigation, with effluent, in rice cultivation. The leaf nitrogen contents obtained from that provided by the sources with effluent were adequate, however, showed low efficiency in the use of this nutrient.

Keywords: Water use efficiency; nitrogen efficiency; conservation agriculture.

3.1. Introdução

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos mais importantes cereais que compõe a alimentação de subsistência da população mundial (IRRI, 2017). No Brasil, o consumo anual está estimado em torno de 11 milhões de toneladas (CONAB, 2022) e a área plantada em torno de 1.710.049 ha (FAOESTAT, 2021), sendo responsável por 17% da área irrigada no país (ANA, 2021).

A maior parte da produção global do arroz acontece sob irrigação por inundação. Esse sistema demanda uma grande quantidade de água e baixa eficiência no uso de nitrogênio (Sandhu et al., 2019), levando a mudanças espaciais das áreas de cultivo, principalmente pelos danos ambientais relacionados à escassez de água (Lan et al., 2021).

Os desafios impostos pelas mudanças climáticas e a necessidade no aumento da produção de alimentos para suprir a estimativa de 10,2 bilhões de pessoas em 2050 (UNDESA, 2018), alerta sobre a necessidade na gestão dos recursos naturais. Além da água, ao incluir demanda por mais terra, as soluções podem passar pela intensificação da produção baseada na adoção de sistemas de cultivos, que envolvam o aperfeiçoamento dos serviços ecossistêmicos para reduzir os insumos externos (FAO, 2011).

Nos arrozais, tecnologias de irrigação e práticas de conservação do solo, promovem maior eficiência no uso da água pela cultura e são urgentes para reduzir os riscos ambientais e promover benefícios econômicos (Chen et al., 2021). Pesquisas têm mostrado significativas reduções no consumo de água e da necessidade de fertilizante nitrogenado sintético, quando se utiliza cobertura morta de resíduos vegetais (Sidhu et al., 2019) e irrigação por gotejamento (Coltro et al., 2017; Sandhu et al., 2019).

A possibilidade de redução da umidade do solo durante o cultivo do arroz, pela técnica de umedecimento e secamento alternado (USA), tem mostrado melhores resultados na eficiência no uso da água, quando comparado à irrigação contínua (Ishfaq et al. 2020; Poddar et al. 2022), assim como os sistemas de cultivo de arroz aeróbio, melhoram a absorção de nitrogênio (Reis et al., 2018).

Outro ponto importante, para promover uma agricultura sustentável, está relacionado ao suprimento de água para a irrigação, optando quando possível, pela substituição das fontes

destinadas ao consumo humano, por águas de menor qualidade. Dentre as diversas soluções que têm sido propostas para reduzir o déficit de água para o uso agrícola, destacam-se: o controle e reúso da água de escoamento superficial e profundo, dessalinização de águas salinas e a reutilização de águas residuárias (Ricart & Rico, 2019).

Na realidade brasileira, a irrigação com águas residuárias não é só uma alternativa à demanda por recursos hídricos não convencionais, como uma forma complementar ao tratamento de efluente, que em muitos casos, tem condições tecnológicas insuficientes para atender os padrões de lançamento e padrões restritivos para lançamento de nitrogênio e fósforo.

Os efluentes gerados pelas agroindústrias apresentam características favoráveis para uso nos sistemas de irrigação, principalmente pelo fato de serem ricos em matéria orgânica, ter baixo potencial patogênico e, em muitas situações, estão localizados próximos aos campos de cultivos, facilitando a logística de aplicação. Um exemplo são os laticínios, que consomem elevado volume de água durante os seus processos produtivos e geram uma quantidade de efluente três vezes maior (Silva et al. 2018), que além de nutrientes podem conter elevada quantidade de sódio, devido a fabricação de queijos (Donatti et al., 2017).

Quando avaliado os impactos da cadeia dos fertilizantes sintéticos, principalmente o nitrogênio, frente ao aumento acelerado para atender a demanda por alimentos e proteínas da população global, os processos de ciclagem de nitrogênio surgem como estratégia para uma produção agrícola sustentável, do ponto de vista ambiental, social e econômico (Yang et al., 2021) e com redução da emissão dos gases de efeito estufa.

Ainda deve destacar, que o uso frequente de águas residuárias tratadas, com alto teor de sais, pode aumentar o risco de salinização, principalmente devido ao acúmulo de sódio e cloreto, que pode comprometer o rendimento dos cultivos (Dridi et al., 2017; Chen et al. 2021) e as propriedades físicas do solo (Ganjegunte et al., 2018).

Dessa forma, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o desempenho agrônômico de cultivares de arroz, do tipo italiano (arbório), japonês e preto, irrigadas com efluente tratado de laticínio, por gotejamento subsuperficial, na construção de sistemas produtivos sustentáveis, com relação ao uso da água. Neste contexto, foram levantados os seguintes questionamentos: qual a dose de efluente e a cultivar mais produtiva, considerando o aspecto salino dessas águas? Qual a economia de fertilizantes sintéticos? Qual a eficiência do uso da água e do nitrogênio?

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Área de estudo e classificação climática

O experimento foi realizado em ambiente protegido, em estufa do tipo arco com área de 210 m², no campus da USP Fernando Costa, na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), Pirassununga-SP (627 m a.s.l., 21°59'S e 47°25'W). O clima da região é considerado do tipo Cwa na classificação de Koppen (Koppen & Geiger, 1928).

A temperatura do ar foi monitorada por estação meteorológica automática (DRIA, modelo 0111), localizada na parte central da estufa. A evapotranspiração (ETc) foi determinada pela multiplicação da evapotranspiração de referência (ET_o), estimada por tanque classe A reduzido instalado na parte central da estufa, e o coeficiente da cultura (K_c) em cada fase de desenvolvimento (Doorenbos & Kassam, 1994). O turno de rega foi de dois dias. A temperatura média do ar variou entre 20,1 °C e 34,7 °C, enquanto o ETc total durante o ciclo foi de 422,7 mm, com valores médios de 3,3 mm por dia⁻¹ (Figura 1).

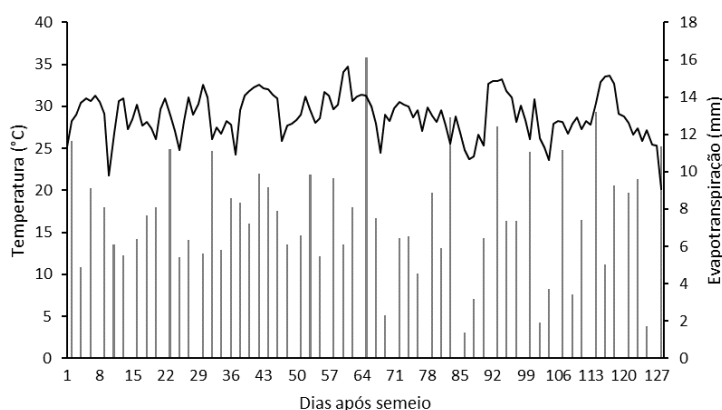


Figura 1. Temperatura média diária do ar (linha contínua) e evapotranspiração da cultura (ETc, barras), durante o ciclo de cultivo. As barras representam a soma da ETc, em turno de rega a cada dois dias.

3.2.2. Delineamento experimental e semeio

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial (3x3), com quatro repetições. Foram utilizadas três cultivares de arroz do tipo especial e três fontes de irrigação: 100% água (100 W), 50% água e 50% efluente tratado de laticínio (50 WETL) e 100% efluente tratado de laticínio (100 ETL) (Figura 2).



Figura 2. Desenho experimental.

Cada parcela experimental foi constituída por uma caixa de fibra de vidro, com área superficial de 1 m² e profundidade de 0,5 m, totalizando 36 unidades. As caixas continham sistema de drenagem, constituído por um cano de PVC perfurado, instalado no sentido longitudinal da caixa, ligado a um registro para o lado externo e coberto por manta geotêxtil, sob uma camada de brita (Figura 3A).

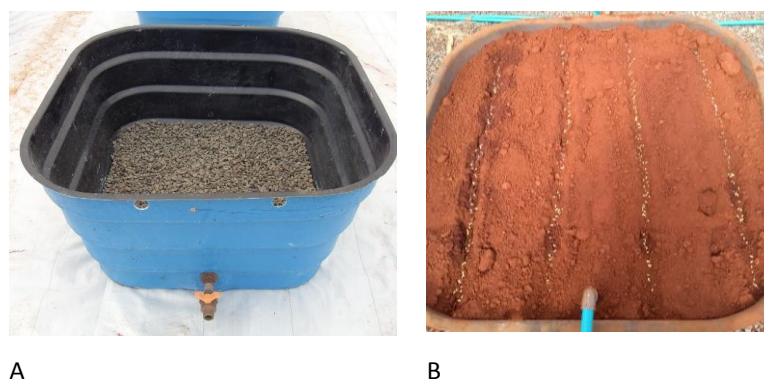


Figura 3. Detalhe da drenagem (A) e do semeio (B) da parcela experimental.

As cultivares de arroz utilizadas foram: IAC 301 (culinária italiana - arbório), IAC 400 (culinária japonesa) e IAC 600 (preto). O semeio foi realizado em linhas com espaçamento de 0,20 m entrelinhas, densidade de 50 sementes m⁻¹, sendo 4 linhas por parcela experimental (Figura 3B). A área considerada útil para avaliação, foram as duas linhas centrais, que totalizaram uma área de 0,5 m², sendo que as duas fileiras externas foram consideradas bordaduras.

No dia 01/11/2019 foi realizado o semeio para todas as cultivares. Após a emergência das plantas foram verificadas falhas na cultivar IAC 301, semeada novamente em 22/11/2019. Assim, o ciclo de cultivo para cada cultivar (301, 400 e 600) foi de 122, 128 e 95 dias, respectivamente.

3.2.3. Efluente

O efluente utilizado para aplicação dos tratamentos foi proveniente da Estação Experimental de Tratamento de Efluente do Laticínio Escola - FZEA/USP. O sistema de tratamento adotado foi do tipo biológico anaeróbio, com biomassa suspensa, com regime de operação em bateladas sequenciais, com tempo de ciclo de 48 horas. Antes de ser direcionado para o reator, o efluente passou por caixa de gordura e tanque de equalização, após o tratamento, foi filtrado em manta geotêxtil para remoção de sólidos suspensos.

A caracterização físico-química do efluente de laticínio foi realizada com frequência quinzenal, durante a condução do experimento, no Laboratório de Biotecnologia Ambiental/FZEA/USP e na Central Multiusuários de Análises Ambientais/ESALQ/USP, analisados de acordo APHA (2012). Os parâmetros analisados foram: condutividade elétrica, pH, série nitrogenada (N-NTK, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, N-NO₂⁻, N-org), P-PO₄⁻, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, Fe²⁺, Mn²⁺, alcalinidade em bicarbonato e ácidos voláteis totais. A Razão de absorção de sódio (RAS) foi calculada de acordo com Ayers & Westcot (1999). As amostras também foram coletadas antes e depois do reator (Figura 4) para avaliação da demanda química total e solúvel de oxigênio (DQO). Os valores para água foram extraídos de Donatti et al. (2017), cuja pesquisa foi realizada no mesmo local, utilizando a mesma fonte.

O aporte de nutrientes via irrigação foi calculado por meio do produto entre o somatório da lâmina de efluente aplicada durante o ciclo e a concentração média do efluente.

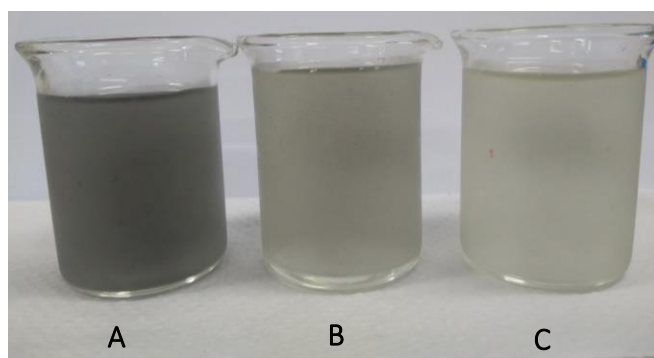


Figura 4. Amostra do efluente tratado de laticínio na entrada do reator (A), na saída do tratamento biológico anaeróbio (B) e após ser filtrado em manta geotêxtil (C).

3.2.4. Solo, solução do solo e fertirrigação

O solo utilizado para preenchimento das parcelas experimentais foi classificado como Latossolo vermelho distrófico (EMBRAPA, 2013), obtido de barranco em área sem uso, nas proximidades da área de cultivo. Antes de iniciar o experimento foi realizada a caracterização química do solo (Tabela 1) e física, no Laboratório de Ciências Agrárias/Solos da FZEA, segundo metodologia descrita por Raij et al. (2001), com determinação também do sódio, para cálculo da porcentagem de sódio trocável (PST).

Tabela 1. Caracterização química do solo anterior à experimentação.

| pH | P mg dm ⁻³ | K -----mmolc dm ⁻³ ----- | Na | Ca | Mg | CTC | PST (%) | V (%) | MO ---g kg ⁻¹ --- | CT | Areia -----g dm ⁻³ ----- | Argila | Silte |
|-----|--------------------------|--|-----|-----|-----|------|------------|----------|---------------------------------|-----|--|--------|-------|
| 5,5 | 5,0 | 1,0 | 0,2 | 7,0 | 2,0 | 33,0 | 0,6 | 31,0 | 14,00 | 7,9 | 672 | 237 | 91 |

CTC: capacidade de troca de cátions; PST: porcentagem de sódio trocável; V: saturação por bases; MO: matéria orgânica; CT: carbono total.

A caracterização física apresentou valores de densidade do solo (1,35 g cm⁻¹), porcentagens de argila (38%), silte (19%) e areia (43%), classificando o solo como franco argiloso.

Com base no resultado da análise química do solo foi realizada a calagem, que elevou a saturação por bases para 90% da CTC. O calcário dolomítico (PRNT=88%) foi misturado ao solo com auxílio de betoneira, no momento do preenchimento das caixas. Todas as parcelas receberam adubação de plantio, via fertirrigação com bomba injetora de vazão de 5 L h⁻¹, sendo aplicados 70 kg ha⁻¹ de K₂O, 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), conforme recomendação para arroz irrigado (Raij et al., 1997). O nitrogênio e o potássio foram parcelados em quatro vezes, com frequência diária, enquanto que o fósforo metade foi aplicado via fertirrigação e metade diretamente no solo. As fontes utilizadas foram: nitrato de cálcio (15,5% de N e 19% de Ca), nitrato de potássio (Krista - 12% de N, 43% de K₂O, 1% de S e 1% de Mg) e monofosfato de potássio (MKP - 34% de K₂O e 52% de P₂O₅), com solubilidade de 310 g L⁻¹, 300 g L⁻¹ e 180 g L⁻¹, respectivamente, em água a 20°C.

A fertirrigação de cobertura foi realizada a partir da emergência das plantas, entre o estágio vegetativo até o início do reprodutivo (Crusciol et al., 2016), nos tratamentos irrigados somente com água (T1, T2 e T3), para o fornecimento de N e K, com aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N e 90 kg ha⁻¹ de K₂O, via fertirrigação. As fontes utilizadas foram nitrato de cálcio e nitrato de potássio, parcelada em cinco aplicações, com frequência semanal.

Ao final do experimento foi realizada análise química do solo, por amostras compostas de cada parcela experimental para cada tratamento, na camada de 0-0,15 e 0,15-0,30 m. A solução do solo foi coletada ao final do ciclo por extratores de solução instalados a 0,10 m dos tensiômetros, na

profundidade de 0,20 m. Para a coleta foi realizado vácuo, por meio de uma seringa plástica de 60 mL, 24 horas antes da extração, que foi realizada também por seringa. Os parâmetros analisados foram: condutividade elétrica (CE), amônio ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrato ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), nitrito ($\text{NO}_2^-\text{-N}$), potássio (K^+) e sódio (Na^+), segundo a APHA (2012).

3.2.5. Irrigação e aporte de nitrogênio

O sistema de irrigação adotado foi o gotejamento subsuperficial. Cada parcela continha quatro linhas de tubo gotejadores, enterrados a 0,15 m de profundidade (Sidhu et al., 2019), com 1 m de comprimento cada e gotejadores espaçados entre si de 0,15 m e entre linhas de irrigação com 0,20 m (Figura 5A). O gotejador escolhido foi do tipo integrado, não compensante de pressão, anti sifão, modelo Aires, marca Netafim, vazão 1.6 Lh^{-1} e pressão de serviço de 15 m.c.a, espaçados a 0,15 m, entre gotejadores.



A

B

Figura 5. Instalação das mangueiras gotejadoras (A) e do tensiômetro e extrator de solução (B) na parcela experimental.

Os tratamentos foram individualizados por válvulas solenóides, uma para cada tratamento, operadas por painel controlador modelo Pro-C, marca Hunter® e duas moto-bombas, uma para cada fonte de água (água e efluente). A saída de cada moto-bomba foi constituída por um filtro de disco, para retenção de sólidos, e manômetros, para controle da pressão. Cada tratamento recebeu um hidrômetro para controle do volume de água, além do regulador de pressão de 25 PSI.

O manejo da irrigação foi realizado, com base na determinação da umidade do solo, por tensiômetros instalados na parte central da parcela experimental (Figura 5B), na profundidade de 0,20 m, em três repetições por tratamento (blocos 1, 3 e 4), com turno de rega de dois dias, para a manutenção da umidade do solo próximo à saturação.

A leitura de tensão foi realizada por tensímetro digital e os valores de tensão obtidos pelas leituras dos tensiômetros foram transformados para umidade, pela Curva Característica de Retenção da Água no Solo (CCRAS), na profundidade de 0,20m, confeccionada no Laboratório do Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental/Centro de Ciências Agrárias/UFSCar. Os dados obtidos em laboratório foram ajustados pelo modelo de van Genuchten (1980), por meio do software RETC (van Genuchten et al., 1991) versão 6.00 (Figura 6), os quais forneceram os valores de umidade adotados para a definição das lâminas de irrigação.

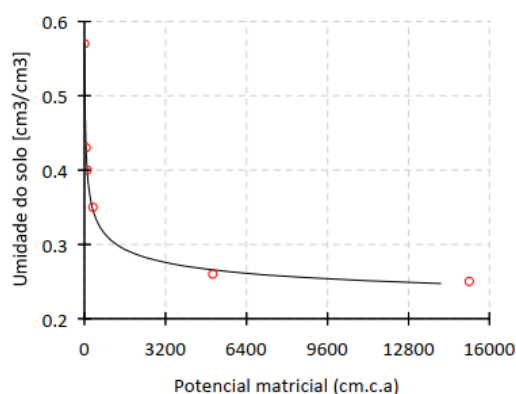


Figura 6. Curva Característica de Retenção da Água no Solo na profundidade de 0,20m.

3.2.6. Desempenho agrônômico, eficiência no uso da água e eficiência no uso do nitrogênio

Para avaliação dos componentes de produção, cessou-se a irrigação quatro dias antes da colheita para completo amadurecimento dos grãos. Inicialmente foram separadas as panículas e a folha bandeira, posteriormente a parte aérea da planta foi cortada rente ao solo, com o auxílio de uma tesoura. Em laboratório, o material vegetativo foi seco em estufa com circulação forçada à 65 °C, até peso constante, após foi determinado a biomassa seca, em balança de precisão. Os grãos foram separados para determinar os componentes de produção.

Os componentes de produção analisados foram a fertilidade de espiguetas (FE), produtividade de grãos (PG) e biomassa seca (BS). Para determinar o FE (Equação 1), vinte panículas foram coletadas aleatoriamente por parcela. O número de espiguetas por panícula (NE) foi obtido por contagem, somando o número de espiguetas cheias e cochas. Para a PG (Equação 2), o número de panículas (NP) foi determinado contando as panículas na área útil da parcela, multiplicando o valor por dois e o peso de mil grãos (MG) foi determinado através da pesagem de 1000 grãos cheios, com teor de umidade ajustado para 13%. A BS foi pesada após secagem e os dados foram

transformados em kg ha^{-1} . A eficiência no uso da água – EUA (kg m^{-3}) foi calculada pela Equação 3 (Reddi & Reddy, 2006).

Ao final do ciclo foi determinado o teor de nitrogênio nas folhas e grãos. As amostras de folhas foram lavadas com solução de água e ácido clorídrico em uma diluição de 0,1% para remover impurezas. Folhas e grãos foram secos com circulação forçada à 65°C , posteriormente, foram processados em moinho e enviados para análise, segundo Malavolta et al. (1997), pelo Laboratório de Ciência do Solo Agrícola da FZEA. Os teores de nitrogênio obtidos foram comparados com os valores sugeridos por Fageria et al. (2011).

A eficiência no uso do nitrogênio (EUN, indicador de massa de produção incrementado por massa de N aplicado), foi calculada pela Equação 4 (Fageria & Baligar, 2005). As equações para a determinação dos componentes estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Equações para a determinação dos componentes de avaliação.

| Componente | Equação | Equação |
|-----------------------------|--|---|
| FE (%) | $FE = \frac{\text{espiguetas cheias}}{NE} * 100$ | FE: porcentagem de fertilidade de espiguetas NE = número de espiguetas por panículas (1) |
| PG (kg ha^{-1}) | $PG = NP * NE * FE * MG * 0.01$ | PG: produtividade de grãos (kg ha^{-1}) NP: número de panículas por m^2 NE: número de espiguetas por panícula FE: porcentagem de fertilidade de espiguetas MG: peso de 1000 grãos (g) (2) |
| EUA (kg m^{-3}) | $EUA = \frac{PG}{TI}$ | EUA: eficiência no uso da água (kg m^{-3}) PG: produtividade de grãos (kg ha^{-1}) TI: lâmina total de irrigação (m^{-3}) (3) |
| EUN (kg kg^{-1}) | $EUN = \frac{PG + BS}{NA}$ | EUN: eficiência no uso do nitrogênio (kg kg^{-1}) PG: produção de grãos (kg ha^{-1}) BS: biomassa seca (kg ha^{-1}) NA: quantidade de N aplicado (kg ha^{-1}) (4) |

3.2.7. Análise dos dados

Para os componentes avaliados foram realizadas análises da variância, quando constatado diferença significativa aos níveis de 1% ou 5% de probabilidade, foram realizadas comparações de médias entre tratamentos pelo teste de Tukey, utilizando o software SISVAR, versão 5.7 (Ferreira, 2011).

3.3. Resultados e Discussão

3.3.1. Irrigação, fonte de irrigação e aporte de nitrogênio

O potencial da água no solo variou de -5,8 a -0,9 kPa para as diferentes cultivares de arroz, resultado do manejo adotado para manter a umidade do solo próxima à saturação (Figura 7). O comportamento da umidade é representado por picos diários, referentes à reposição da umidade no solo e o consumo de água pela planta. Aos 50, 86 e 98 DAE, as cultivares IAC 600, IAC 301 e IAC 400, respectivamente, apresentaram maior demanda de água, devido estarem na fase de enchimento do grão, sendo a disponibilidade de água nessa fase, crítica para o desenvolvimento da cultura. Os picos aos finais do cultivo, correspondem a suspensão da irrigação, visando a maturação dos grãos.

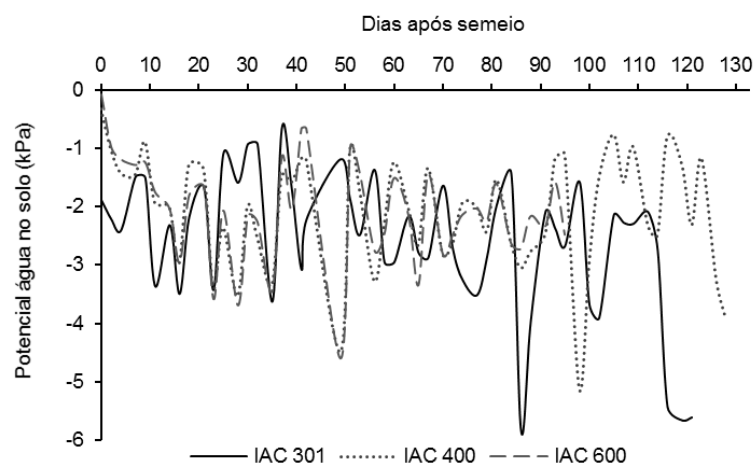


Figura 7. Potencial médio de água do solo (kPa) durante o cultivo para as cultivares IAC 301, IAC 400 e IAC 600.

Na Figura 8 são apresentadas as lâminas de irrigação, diferenciadas pelas fontes, aplicadas em cada tratamento. As maiores lâminas de irrigação podem ser observadas para a cultivar IAC 400 (T2, T5 e T8), em decorrência do maior ciclo de cultivo (128 dias) e pelos valores de tensão no solo (Figura 7). As menores lâminas registradas foram no tratamento T6 (IAC 600) e T1 (IAC 301). As cultivares apresentaram comportamentos distintos em relação a demanda hídrica dentro das fontes de irrigação. A IAC 600 apresentou maior demanda para a fonte 100% água, enquanto a IAC 301 e IAC 400, foram para as fontes com efluentes, 50% água + 50% efluente e 100% efluente, respectivamente.

Nesta pesquisa, a maior lâmina aplicada durante o ciclo de cultivo foi de 904 mm, valor semelhante ao relatado por Coltro et al. (2017), na comparação da irrigação localizada, que

encontraram valores de 900 mm para o gotejamento e 1.400 mm para o cultivo de arroz irrigado por inundação.

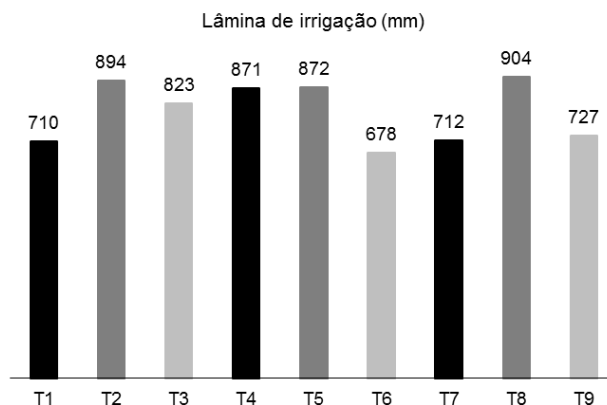


Figura 8. Lâmina de irrigação (mm) para cada tratamento.

T1, T2 e T3: cultivares IAC 301, IAC 400 e IAC 600, respectivamente, irrigados com 100% água; T4, T5 e T6: cultivares IAC 301, IAC 400 e IAC 600, respectivamente, irrigados com 50% água e 50% efluente tratado de laticínio; T7, T8 e T9: cultivares IAC 301, IAC 400 e IAC 600, respectivamente, irrigados com 100% efluente tratado de laticínio.

As lâminas de irrigação nos tratamentos irrigados com efluente tratado de laticínio (ETL) receberam elevados teores de nutrientes, principalmente do nitrogênio na forma amoniacal ($55,71 \pm 24,61 \text{ mg L}^{-1}$) e potássio ($85,19 \pm 39,63 \text{ mg L}^{-1}$) (Tabela 3). Devido as diferentes lâminas, os tratamentos com 50% e 100% da dose de efluente receberam entre 193 a 248 kg N ha^{-1} e 405 a 514 kg N ha^{-1} , respectivamente (Tabela 4). Tais valores estão acima do recomendado para o desenvolvimento da cultura (100 kg N ha^{-1} , Raj et al., 1997), com uma economia de 100% da adubação mineral, além da necessidade de diluição dessa fonte, para evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas, por excesso de nutrientes.

Tabela 3. Caracterização físico-química das fontes de irrigação (média e desvio padrão).

| Parâmetros | ETL | Água ¹ |
|---|-------------------|-------------------|
| N-NTK (mg L ⁻¹) | 94,18 ± 30,71 | 19,46 ± 2,47 |
| N-NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹) | 55,71 ± 24,61 | - |
| N-NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹) | 0,53 ± 0,32 | 0,26 ± 0,05 |
| N-NO ₂ ⁻ (mg L ⁻¹) | 0,56 ± 0,03 | - |
| N-org. (mg L ⁻¹) | 38,46 ± 16,05 | 19,46 ± 2,47 |
| PO ₄ ⁻ -P (mg L ⁻¹) | 2,54 ± 1,09 | 0,21 ± 0,17 |
| K ⁺ (mg L ⁻¹) | 85,19 ± 39,63 | 0,23 ± 0,05 |
| Ca ²⁺ (mg L ⁻¹) | 21,96 ± 15,34 | 6,85 ± 1,06 |
| Mg ²⁺ (mg L ⁻¹) | 36,42 ± 22,39 | 1,83 ± 0,27 |
| Fe ²⁺ (mg L ⁻¹) | 0,24 ± 0,09 | - |
| Mn ²⁺ (mg L ⁻¹) | 0,02 ± 0,00 | - |
| Na ⁺ (mg L ⁻¹) | 202,19 ± 60,39 | 1,78 ± 0,65 |
| RAS (mmol/L) ^{-1/2} | 7,15 ± 2,89 | 0,16 ± 0,05 |
| pH | 7,99 ± 0,38 | 6,92 ± 0,18 |
| CE (dS m ⁻¹) | 3,47 ± 0,89 | 0,07 ± 0,01 |
| Alcalinidade bicarbonato (mg L ⁻¹) | 1.100,00 ± 551,92 | - |
| Ácidos voláteis totais (mg L ⁻¹) | 239,36 ± 234,60 | - |

¹Donatti et al. (2017); ETL: efluente tratado de laticínio; NTK: nitrogênio total Kjeldahl; org: orgânico; RAS: razão de absorção de sódio; CE: condutividade elétrica.

Tabela 4. Aporte de nitrogênio (kg ha⁻¹) pela água de irrigação, adubação e total (irrigação mais adubação).

| | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | T8 | T9 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Irrigação | 2 | 2 | 2 | 248 | 245 | 193 | 405 | 514 | 413 |
| Adubação | 133 | 133 | 133 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Total | 135 | 135 | 135 | 278 | 275 | 223 | 435 | 544 | 443 |

T1, T2 e T3: cultivares IAC 301, IAC 400 e IAC 600, respectivamente, irrigados com 100% água; T4, T5 e T6: cultivares IAC 301, IAC 400 e IAC 600, respectivamente, irrigados com 50% água e 50% efluente tratado de laticínio; T7, T8 e T9: cultivares IAC 301, IAC 400 e IAC 600, respectivamente, irrigados com 100% efluente tratado de laticínio.

Quanto ao potencial salino, o ETL apresentou restrição de uso, com potencial para reduzir em 10% a produtividade da cultura, pois apresentou CE acima de 3,3 dS m⁻¹. Entretanto, não há risco de sodificação do solo, quando considerado conjuntamente os valores de CE e RAS (Ayers & Westcot, 1999). O valor de pH ficou próximo da neutralidade. Seguindo a tendência da CE, os valores de sódio ficaram acima da concentração máxima estabelecida pela agência ambiental do estado de São Paulo e os demais parâmetros não apresentaram restrição quanto ao uso de efluente na irrigação de culturas (Cetesb, 2006). Comparado com a fonte de água, o ETL apresentou elevada concentração de nutrientes.

A produção de alcalinidade em bicarbonato e o consumo de ácidos são importantes parâmetros no monitoramento do reator com digestão anaeróbia. A produção de alcalinidade média foi de 1.100,00 ± 551,92 mg L⁻¹ e o consumo médio de ácidos foi de 239,36 ± 234,60 mg L⁻¹. As concentrações médias de matéria orgânica expressas em DQO total e solúvel para o efluente na entrada do reator foram 5.169,26 ± 3.003,50 mg L⁻¹ e 3.832,13 ± 1.961,65 mg L⁻¹, respectivamente.

Após o tratamento, houve redução de $89\% \pm 5,14\%$ e $87\% \pm 5,25\%$ da DQO total e solúvel, com concentração média de $546,22 \pm 408,32 \text{ mg L}^{-1}$ e $513,65 \pm 407,36 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente, na saída do reator.

Esses resultados demonstram a robustez operacional do reator em manter o processo estável, levando em consideração a produção de alcalinidade, consumo de ácidos e baixa variabilidade na remoção de DQO, mesmo com a heterogeneidade do efluente que entra nos sistemas de tratamento. Essa heterogeneidade nas indústrias de laticínios de pequeno e médio porte estão relacionados aos processos e produtos fabricados (Silva et al., 2018), além da capacidade do processamento na indústria, equipamentos utilizados, processos e produtos de limpeza que levam as variações no volume e características dos efluentes gerados (Bella & Rao, 2021).

Mesmo após tratamento, o ETL apresentou elevada concentração de macronutrientes, principalmente N, K, Ca, Mg e pH próximo da neutralidade, podendo suprir, mesmo na irrigação com mistura (50 WE), totalmente a necessidade de N e K da cultura (Tabela 4). O tratamento biológico por sistema anaeróbio (Tabela 3), seguido do reúso agrícola, torna-se assim uma alternativa ao tratamento das águas residuárias em países em desenvolvimento, que apresentam baixo tratamento e uso dessas fontes de água (Valipour & Singh, 2016). Esta prática pode ser um importante instrumento na implementação de modelos que fomentam a economia circular, devido o potencial do reúso dessas fontes de água, economia de fertilizantes e a produção de gás metano, como fonte de energia renovável (Stanchev et al., 2020).

Ao considerar o reúso da água, substituindo uma fonte de melhor qualidade por efluentes lácteos, essa economia é ainda mais significativa em termos ambientais e econômicos, uma vez que há o uso do efluente, que seria lançado no corpo d'água, em muitos casos sem cumprir a legislação ambiental, em processos de ciclagem de nutrientes, por meio da aplicação na agricultura (Yang et al., 2021). Assim, a principal vantagem da irrigação com efluente tratado é o fornecimento de nutrientes que podem ser suficientes para substituir, ou, pelo menos reduzir, o uso de fertilizantes sintéticos na agricultura (Menegassi et al., 2020).

Os tratamentos irrigados com 100% efluente mostraram excesso de nitrogênio. Este é um fator de atenção quando se considera o uso de efluente em condições de solos tropicais, onde a mineralização dos componentes orgânicos é rápida, podendo causar eutrofização ou toxicidade em outros habitats (Stradioto et al., 2019).

3.3.2. Solo e solução do solo

A caracterização química do solo após a irrigação é apresentada na Tabela 5. Os efeitos das fontes e manejo da irrigação visando a saturação do solo nos 0,20 m, incrementou os teores dos nutrientes na camada superficial, resultado da lâmina aplicada. As diferentes fontes de irrigação alteraram os parâmetros químicos do solo, exceto para o enxofre. De forma geral, os teores foram incrementados com a irrigação com efluente.

Tabela 5. Características químicas do solo após irrigação com efluente tratado de laticínio (ETL), em diferentes fontes de irrigação e nas profundidades de 0-0,15 e 0,15-0,30 m.

| Profundidade | pH** | P* | S ^{ns} | K** | Na** | Ca* | Mg** | CTC** | CT ^{ns} | MO ^{ns} | V** | PST ^{ns} |
|---------------------|-------------------|----------------------------|-----------------|-------|-------|------------------------|--------|---------|-----------------------------|------------------|--------|-------------------|
| | CaCl ₂ | ---mg dm ⁻³ --- | | | | mmolc dm ⁻³ | | | ----g kg ⁻¹ ---- | | % | % |
| 0 - 0,15 m | 7,3 a | 6,0 a | 12,7 | 4,6 a | 1,8 a | 94,94 a | 28,3a | 140,8 a | 9,2 | 15,8 | 91,9 a | 1,2 |
| 0,15-0,30 m | 7,2 b | 5,4 b | 11,1 | 2,9 b | 1,3 b | 87,97 b | 24,9 b | 128,7 b | 9,3 | 15,9 | 90,9 b | 1,0 |
| CV (%) | 1,9 | 3,4 | 22,7 | 13,5 | 11,6 | 2,39 | 12,5 | 2,5 | 5,0 | 4,9 | 0,4 | 12,9 |
| Fontes de irrigação | pH** | P* | S ^{ns} | K** | Na** | Ca** | Mg** | CTC** | CT** | MO** | V** | PST** |
| | CaCl ₂ | ---mg dm ⁻³ --- | | | | mmolc dm ⁻³ | | | ----g kg ⁻¹ ---- | | % | % |
| 100 W | 7,0 c | 6,1 a | 12,0 | 2,5 b | 0,1 c | 84,1 b | 25,8 b | 124,5 b | 8,7 b | 14,9 b | 90,4 b | 0,07 c |
| 50 WE | 7,3b | 5,2 b | 11,1 | 5,5 a | 1,6 b | 97,8 a | 30,1 a | 146,4 a | 9,2 b | 15,8 b | 92,1 a | 1,1 b |
| 100 E | 7,5 a | 5,8 ab | 12,6 | 3,3 b | 2,9 a | 92,5 ab | 24,0 b | 133,3 b | 9,8 a | 16,9 a | 91,9 a | 2,2 a |
| CV (%) | 1,8 | 20,9 | 32,3 | 64,3 | 43,8 | 14,4 | 16,6 | 12,1 | 9,1 | 9,0 | 1,2 | 47,6 |

100W: 100% água; 50WE: 50% água e 50% ETL; 100E: 100% ETL. CTC: capacidade de troca de cátions; PST: porcentagem de sódio trocável; V: saturação por bases; MO: matéria orgânica; CT: carbono total. CV: coeficiente de variação. Médias seguidas por letras diferentes diferem pelo teste de Tukey, *, P < 0,05; **, P < 0,01; ns, não significativo.

Embora, a maior concentração de potássio tenha sido aplicada pelo tratamento 100E, não houve aumento significativo deste macronutriente no solo, apresentando valor superior na dose 50WE, assim como o teor de Mg, sugerindo uma competição entre esses cátions com o sódio na dose 100E. Como resultado do aporte pelo efluente, a PST foi superior na fonte 100E, devido a maior concentração de sódio presente nesta água, que resultou em maior concentração de sódio no solo, no entanto, sem apresentar risco de sodicidade (PST>15%), segundo Ayers & Westcot, 1999.

A Tabela 6 apresenta a análise da variância para pH, CE, íon amônio, nitrato, nitrito, Na⁺ e K⁺ da solução do solo, avaliados por ocasião da colheita do experimento. Não houve influência nos tratamentos para o pH, cuja média foi 7,25. As fontes de irrigação apresentaram efeitos significativos em todos os parâmetros, exceto amônio. A CE, o amônio e o nitrito foram alterados pela cultivar. Houve interação significativa entre cultivares e fontes para CE, Na e K.

Tabela 6. Análise da variância para pH, condutividade elétrica (CE), amônio (NH₄⁺-N), nitrato (NO₃⁻-N), nitrito (NO₂⁻-N), sódio (Na⁺) e potássio (K⁺) da solução do solo, como efeitos das cultivares, fontes de irrigação e interação. Valores-F são apresentados para efeitos significativos.

| Fatores | pH | CE | N-NH ₄ ⁺ | N-NO ₃ ⁻ | N-NO ₂ ⁻ | Na ⁺ | K ⁺ |
|---------|------|---------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------|
| C | ns | 7,12** | 4,02* | ns | 6,46** | ns | ns |
| FI | ns | 65,38** | ns | 6,16** | 4,47* | 62,41** | 42,77** |
| C x FI | ns | 4,96** | ns | ns | ns | 3,63* | 3,92* |
| CV (%) | 3,10 | 30,84 | 37,21 | 58,12 | 47,86 | 28,60 | 31,01 |

C: cultivares. FI: fontes de irrigação. CV: coeficiente de variação. *P < 0,05. **P < 0,01. ns, não significativo.

As cultivares de arroz e fontes de irrigação apresentaram efeitos significativos para a CE, com incremento na solução do solo, para os tratamentos com efluente, em todas as cultivares, devido à disponibilidade de íons nesses tratamentos, como observado para nitrato, nitrito, sódio e potássio (Tabela 7). No entanto, os valores encontrados no tratamento 100E ($> 5,1 \text{ dS m}^{-1}$) pode comprometer 25% do potencial de rendimento da cultura (Ayers & Westcot, 1999).

O nitrogênio amoniacal, forma predominante no ETL, apresentou maior concentração para a cultivar IAC 400 ($0,24 \text{ mg L}^{-1}$) e a menor para IAC 301 ($0,14 \text{ mg L}^{-1}$), ambas sem diferença da IAC 600 cultivar. O teor de nitrato na solução do solo foi alterado pela aplicação do efluente, sendo os maiores valores para 100W e 100E. No tratamento com a mistura de água e efluente (50WE) observa-se o menor teor de nitrato ($7,62 \text{ mg L}^{-1}$) e o maior teor de nitrito ($2,97 \text{ mg L}^{-1}$), demonstrando estar ocorrendo transformação entre essas formas de nitrogênio. Segundo a Portaria nº 5/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017), os valores máximos permitidos para o padrão de potabilidade do nitrato e nitrito são 10 mg L^{-1} e 1 mg L^{-1} , respectivamente. Assim, para evitar a poluição das águas subterrâneas pelo nitrato (Stradioto et al., 2019), ao considerar o reúso da água, o ajuste da dose de aplicação do efluente e da lâmina de irrigação são extremamente importantes para reduzir o risco de contaminação dessas águas.

Segundo Fageria & Knupp (2013), no arroz alagado predomina a absorção de nitrogênio na forma amoniacal. Nas condições desta pesquisa, a solução do solo tem concentrações superiores de nitrato, seguida por nitrito e amônio (Tabela 7), evidenciando a dinâmica do nitrogênio pelo processo de nitrificação. Embora a forma presente de N no ETL seja amônio, devido ao tratamento anaeróbio, quando na solução do solo em condição de irrigação por gotejamento (aeróbia), a forma predominante passou ser o nitrato.

O Na^+ apresentou o mesmo comportamento da CE, com aumento na solução do solo para as fontes com efluente. A concentração de K^+ no efluente ($85,19 \pm 39,63 \text{ mg L}^{-1}$) não resultou em aumento significativo na solução do solo, na dose de 100E (Tabela 7).

Tabela 7. Valores de condutividade elétrica (CE), amônio (N-NH₄⁺), nitrato (N-NO₃⁻), nitrito (N-NO₂⁻), sódio (Na⁺) e potássio (K⁺) na solução do solo, ao final do cultivo do arroz irrigado por gotejamento subsuperficial com efluente tratado de laticínio (ETL).

| Fontes de Irrigação | IAC 301 | IAC 400 | IAC 600 | Média |
|--|-----------|-----------|-----------|----------|
| CE (dS m ⁻¹) | | | | |
| 100 W | 0,90 Ac | 0,82 Ac | 1,03 Ab | 0,91 c |
| 50 WE | 2,85 Ab | 4,67 Ab | 3,57 Aa | 3,69 b |
| 100 E | 7,82 Aba | 10,51 Aa | 4,77 Ba | 7,70 a |
| Média | 3,85 AB | 5,33 A | 3,12 B | |
| N-NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹) | | | | |
| 100 W | 0,10 | 0,22 | 0,20 | 0,17 |
| 50 WE | 0,17 | 0,27 | 0,22 | 0,22 |
| 100 E | 0,16 | 0,23 | 0,18 | 0,19 |
| Média | 0,14 B | 0,24 A | 0,20 AB | |
| N-NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹) | | | | |
| 100 W | 32,88 | 7,77 | 16,17 | 18,94 a |
| 50 WE | 4,37 | 7,64 | 10,86 | 7,62 b |
| 100 E | 19,09 | 18,46 | 31,15 | 22,90 a |
| Média | 18,78 | 11,29 | 19,39 | |
| N-NO ₂ ⁻ (mg L ⁻¹) | | | | |
| 100 W | 2,57 | 0,90 | 1,82 | 1,77 ab |
| 50 WE | 3,11 | 1,87 | 3,93 | 2,97 a |
| 100 E | 1,31 | 0,86 | 2,86 | 1,67 b |
| Média | 2,33 AB | 1,21 B | 2,87 A | |
| Na ⁺ (mg L ⁻¹) | | | | |
| 100 W | 17,55 Ab | 6,96 Ab | 15,77 Ab | 13,43 b |
| 50 WE | 123,30 Aa | 139,50 Aa | 159,90 Aa | 140,90 a |
| 100 E | 175,20 Aa | 176,40 Aa | 100,50 Ba | 150,70 a |
| Média | 105,35 | 107,62 | 92,06 | |
| K ⁺ (mg L ⁻¹) | | | | |
| 100 W | 12,70 Ab | 3,68 Ab | 3,86 Ab | 6,74 c |
| 50 WE | 34,78 Aa | 47,90 Aa | 36,38 Aa | 39,69 a |
| 100 E | 35,26 Aa | 16,54 Bb | 30,62 ABa | 27,47 b |
| Média | 27,58 | 22,70 | 23,62 | |

100W: 100% água; 50WE: 50% água e 50% ETL; 100E: 100% ETL. Médias seguidas por letras diferentes, maiúscula na linha e minúscula na coluna, diferem pelo teste de Tukey.

Santos et al., (2017) encontraram aumento do Na⁺ e diminuição do K⁺, em solo irrigado com esgoto doméstico tratado, demonstrando competição entre esses íons. O excesso de Na⁺ resultou no aumento da PST na maior dose com efluente (Tabela 5), sugerindo a possível causa da redução do K⁺ no solo (Pereira et al., 2011). Assim, o Na⁺, quando em excesso, deve ser o primeiro elemento de referência a ser considerado, para o reúso de água na agricultura (Santos et al., 2017).

Nesta pesquisa, os valores indicativos de salinidade são elevados (CE e Na⁺), resultando em grande potencial de salinização do solo. No ano de 2012 foi contabilizado um total de 10% de toda área irrigada do mundo, com solos salinizados, pelo acúmulo de sais provenientes das fontes de água (WWAP, 2012). Os efeitos adversos dos sais dissolvidos nas águas ou acumulados nos solos, na maioria dos casos, podem prejudicar o crescimento das plantas, reduzir a produção e qualidade (Chen et al. 2021), como consequência dos efeitos diretos sobre o potencial osmótico, desbalanço

nutricional e efeito tóxico dos íons, principalmente o cloro e o sódio (Santos et al. 2017). Também pode ocorrer alterações nas propriedades físicas do solo, reduzindo a infiltração da água e prejudicando a aeração das raízes (Ganjegunte et al. 2018).

Os resultados deste estudo confirmam o potencial de incremento na fertilidade do solo quando irrigado com efluente de origem orgânica (Ahmad et al., 2020), assim como o risco de salinidade e sodicidade (Santos et al., 2017; Chaganti et al. 2020). Dessa forma, a avaliação dos atributos do solo irrigado com efluente são necessários para a aplicação de técnicas de remediação nos planos de gestão dessas áreas.

3.3.3. Componentes de produção e eficiência no uso da água

As cultivares de arroz avaliadas apresentaram comportamentos diferentes para os parâmetros produtivos e houve interação entre as cultivares e fontes de irrigação para a FE e PG (Tabela 8).

Tabela 8. Análise da variância para os componentes de produção, eficiência no uso da água (EUA), nitrogênio foliar, nitrogênio nos grãos e eficiência no uso do nitrogênio (EUN) como efeito das cultivares, fontes de irrigação e interações. Valores-F são apresentados para efeitos significativos.

| Fatores | Fertilidade espiguetas | Biomassa seca | Produção de grãos | EUA | N foliar | N grãos | EUN |
|---------|------------------------|---------------|-------------------|--------|----------|---------|----------|
| C | 18,23** | 47,54** | 18,20** | 5,49** | ns | ns | 32,30** |
| FI | ns | ns | ns | ns | 14,03** | 3,93* | 157,13** |
| C x FI | 4,48** | ns | 2,74* | ns | 3,78* | ns | 7,29** |
| CV (%) | 3,72 | 25,14 | 19,93 | 20,88 | 11,36 | 10,21 | 17,54 |

C: cultivares. FI: fontes de irrigação. CV: coeficiente de variação. *P < 0,05. **P < 0,01. ns, não significativo.

A cultivar IAC 400 apresentou maior produção de BS e houve diferença na EUA entre as cultivares IAC 600 (2,37 kg m⁻³) e IAC 400 (3,13 kg m⁻³) (Tabela 9). A interação entre fontes de irrigação e cultivares para FE e PG confirma que a aplicação das doses de efluente causa comportamentos distintos em relação a tolerância à salinidade. É possível observar que a cultivar IAC 400 tem maior sensibilidade à salinidade presente no ETL, pelos baixos valores de FE e PG, quando comparado ao controle. A cultivar IAC 600 mostrou a melhor FE para a dose 50WE, no entanto, não houve diferença entre as cultivares para a dose 100E. As fontes de irrigação não afetaram a FE para as cultivares IAC 301 e IAC 600 e, a cultivar IAC 400 apresentou menor FE na dose de 50WE.

A irrigação não alterou a PG para IAC 301 e IAC 600, entretanto a cultivar IAC 400 apresentou maior PG na fonte com água (100W) e menor para as doses de efluente. De modo geral, a PG foi superior na cultivar IAC 400 que apresentou maior BS e FE. Esses resultados estão de acordo com outros estudos (Feng et al., 2021; Jung et al., 2014), que encontraram correlações significativas

entre esses atributos. A capacidade de perfilhamento e produção de panículas tem relação com a maior PG (Morais Junior et al., 2017), devido às diferenças de eficiência fotossintética de cada cultivar (Gorh & Baruah, 2019).

Tabela 9. Atributos de produção e eficiência no uso da água (EUA) após cultivo irrigado do arroz, por gotejamento subsuperficial com efluente tratado de laticínio (ETL).

| Fontes de Irrigação | IAC 301 | IAC 400 | IAC 600 | Média |
|--|--------------|-------------|-------------|----------|
| Fertilidade de espiguetas (%) | | | | |
| 100 W | 83,75 Ba | 95,13 Aa | 96,25 Aa | 91,71 |
| 50 WE | 86,48 Ba | 85,82 Bb | 94,70 Aa | 89,00 |
| 100 E | 89,43 Aa | 93,38 Aa | 93,60 Aa | 92,14 |
| Média | 86,55 B | 91,44 A | 94,85 A | |
| Biomassa seca (kg ha ⁻¹) | | | | |
| 100 W | 4.335,65 | 5.465,16 | 2.556,05 | 4.118,95 |
| 50 WE | 4.034,85 | 6.046,65 | 2.118,45 | 4.066,65 |
| 100 E | 3.729,40 | 7.580,95 | 1.858,90 | 4.389,75 |
| Média | 4.033,30 B | 6.364,25 A | 2.177,80 C | |
| Produção de grãos (kg ha ⁻¹) | | | | |
| 100 W | 4.511,19 Ba | 8.232,51 Aa | 4.848,83 Ba | 5.864,18 |
| 50 WE | 5.673,44 Aa | 6.022,87 Ab | 4.722,87 Aa | 5.473,06 |
| 100 E | 4.920,62 ABa | 6.654,55 Ab | 3.606,20 Ba | 5.060,70 |
| Média | 5.035,08 B | 6.969,98 A | 4.392,87 B | |
| EUA (kg m ⁻³) | | | | |
| 100 W | 2,54 | 3,68 | 2,35 | 2,86 |
| 50 WE | 2,60 | 2,76 | 2,79 | 2,72 |
| 100 E | 2,76 | 2,95 | 1,98 | 2,56 |
| Média | 2,64 AB | 3,13 A | 2,37B | |

100W: 100% água; 50WE: 50% água e 50% ETL; 100E: 100% ETL. Média seguidas por letras diferentes, maiúscula na linha e minúscula na coluna, diferem pelo teste de Tukey.

O uso da irrigação por gotejamento subsuperficial e a substituição da fonte de água não comprometeram a produtividade da cultura, mesmo sob valores elevados de CE na solução do solo (Tabela 7). Nas condições edafoclimáticas e de manejo em que o experimento foi realizado, a PG de todas as cultivares foram superiores quando comparadas ao sistema inundado, cujos valores foram 3.609,00; 3.090,00 e 4.978,00 kg ha⁻¹ para IAC 301, IAC 600 e IAC 400, respectivamente (IAC, 2005). Os resultados também estão próximos daqueles reportados em outros estudos com diferentes regimes de irrigação, como a fertirrigação por gotejamento subsuperficial no sistema de rotação arroz-trigo (Sidhu et al., 2019) e o umedecimento e secamento alternados (Ishfaq et al. 2020; Feng et al., 2021).

A cultivar IAC 400 (japonês) foi a mais sensível a salinidade, sendo as cultivares IAC 301 (arbório) e IAC 600 (preto) as mais indicadas para a aplicação de fontes de águas salinas. Isto está associado ao fato de a salinidade reduzir a viabilidade do pólen na fase de floração, reduzindo a fertilidade do arroz, que por sua vez afeta a produção (Khatun et al., 1995). Essas respostas apresentam variações genotípicas (Khatun et al., 1995), devido as diferentes respostas fisiológicas, bioquímicas e moleculares das plantas em tolerar a salinidade (Chen et al. 2021).

Vale ressaltar, que a variação da FE foi de 83,75% (IAC 301) a 96,25% (IAC 600), ambas na mesma fonte de irrigação (100W). Tais achados confirmam que mesmo em condições não salinas, o genótipo da planta, aliado a outros fatores bióticos e abióticos, afetam a FE. Dessa forma, esses estudos são importantes para testar cultivares mais adaptadas às novas possibilidades de cultivos, visando uma produção mais sustentável.

Tradicionalmente é considerado que a irrigação por sistema de inundação contínua na cultura do arroz propicia maiores produtividades, devido à eliminação do estresse hídrico, melhor controle de plantas invasoras e controle da temperatura do solo (Tsutsui, 1972). Nos últimos anos, esse conceito tem sido questionado por muitas pesquisas que mostraram resultados promissores na produção da cultura e na eficiência no uso da água, pelo método de umedecimento e secamento alternado (Ishfaq et al. 2020; Feng et al. 2021). Próximo a este manejo, pela redução na umidade do solo, os métodos localizados, no caso o gotejamento, mostraram uma redução significativa no consumo de água (Coltro et al., 2017, Sandhu et al., 2019), principalmente pelo fato de reduzir as altas taxas de evaporação e percolação encontradas nos campos alagados (Chapagain & Hoekstra, 2011).

Os valores de EUA encontrados neste estudo corroboram com a discussão anterior, onde a irrigação por gotejamento traz significativa economia dos recursos hídricos, com manutenção da produção, tornando-se uma importante estratégia para garantir a produção do arroz, ameaçada mundialmente pela escassez de água (Feng et al 2021).

Como apresentado na Tabela 9, os valores de EUA ficaram entre 2,37 a 2,64 kg m⁻³, resultado superior a Ishfaq et al. (2020), que obteve valores entre 1,0 a 1,6 kg m⁻³, ao avaliar cultivares de arroz aromático em condições de inundação contínua (umidade do solo maior que -10 kPa), umedecimento e secamento alternados (umidade do solo = -20 kPa) e arroz aeróbio (umidade do solo = -40 kPa). Importante ressaltar que a EUA não foi alterada pelas fontes de irrigação. Isso se deve ao fato, da manutenção da umidade do solo para todas as cultivares, mas também mostra que a salinidade presente no efluente não alterou a absorção de água pelas plantas. Com relação às cultivares, os maiores valores de EUA foram encontrados para IAC 400, em relação a IAC 600, sem ambas diferirem da IAC 301.

3.3.4. Nitrogênio e eficiência no uso do nitrogênio

O teor de nitrogênio foliar e nos grãos de arroz, bem como a eficiência no uso do nitrogênio (EUN) foram alterados pelas fontes de irrigação, com interação entre essas e as cultivares, exceto para o N nos grãos (Tabela 10). As cultivares IAC 301 e IAC 400 apresentaram maior concentração de N foliar nas fontes com efluente, enquanto a IAC 600 o teor não foi alterado. Não houve diferença

entre as cultivares no teor de N foliar para as fontes de irrigação com efluente, enquanto que na fonte de irrigação 100W, o teor foi menor para a cultivar IAC 301.

Os valores de N foliar nos tratamentos com efluentes ficaram dentro da faixa recomendada, enquanto o controle (100W) apresentou valores abaixo, sem limitar a produção de grãos. Este resultado comprova que a irrigação com efluente, em ambas as doses, pode suprir 100% da necessidade nutricional do arroz, promovendo economia total de fertilizantes nitrogenados sintéticos.

Tabela 10. Nitrogênio foliar, nitrogênio no grão e eficiência no uso do nitrogênio (EUN), após cultivo irrigado do arroz, por gotejamento subsuperficial com efluente tratado de laticínio (ETL).

| Fontes de irrigação | IAC 301 | IAC 400 | IAC 600 | Média |
|--|-----------|-----------|----------|---------|
| N foliar: 27-35 [#] (g kg ⁻¹) | | | | |
| 100 W | 17,56 Bb | 24,51 Ab | 26,36 Aa | 22,81 b |
| 50 WE | 28,27 Aa | 30,42 Aa | 27,86 Aa | 28,85 a |
| 100 E | 28,65 Aa | 27,38 Aab | 27,86 Aa | 27,96 a |
| Média | 24,83 | 27,44 | 27,36 | |
| N grão (g kg ⁻¹) | | | | |
| 100 W | 15,63 | 17,56 | 16,61 | 16,60 b |
| 50 WE | 18,87 | 18,26 | 18,11 | 18,41 a |
| 100 E | 20,46 | 17,76 | 16,95 | 18,39 a |
| Média | 18,32 | 17,86 | 17,23 | |
| EUN (kg kg ⁻¹) | | | | |
| 100 W | 65,60 Ba | 101,22 Aa | 54,80 Ba | 73,87 a |
| 50 WE | 35,48 Ab | 44,05 Ab | 31,15 Ab | 36,89 b |
| 100 E | 20,26 ABc | 26,67 Ac | 12,57 Bc | 19,83 c |
| Média | 40,45 B | 57,31 A | 32,84 B | |

100W: 100% água; 50WE: 50% água e 50% ETL; 100E: 100% ETL. Médias seguidas por letras diferentes, maiúscula na linha e minúscula na coluna, diferem pelo teste de Tukey. #: Fageria et al. (2011).

O teor de nitrogênio no grão foi maior para as fontes com efluente e, ao comparar os níveis de nitrogênio entre as folhas e grãos de arroz, é possível observar uma translocação menor para os grãos. Essas observações são diferentes das encontradas por Fageria et al. (2011), sugerindo que a planta não usou eficientemente o N aportado na síntese dos grãos.

Os resultados mostram que as cultivares estudadas, cuja literatura é deficiente em informações sobre a curva de absorção, precisam de maior suplementação de N, uma vez que os valores recomendados (100 kg ha⁻¹) para cultivar irrigada do tipo agulhinha (Raj et al., 1997), não foram capazes de suprir a demanda nutricional da cultura.

As cultivares apresentaram o mesmo comportamento do N foliar para a EUN na mistura de água e efluente (50WE). No entanto, todas as cultivares que receberam ETL total ou parcial não responderam à alta aplicação de N, uma vez que a EUN foi menor nessas doses. Assim, poderia aplicar o ETL de forma mais diluída.

O decréscimo na EUN de 109 a 25 kg kg⁻¹ N foi encontrada por Djaman et al. (2018), com doses de 50 a 200 kg N ha⁻¹, respectivamente, em lavoura de arroz irrigada por umedecimento e secamento alternados. Segundo os mesmos autores, os processos bioquímicos e físicos de nitrificação, desnitrificação, mineralização e lixiviação alteram a dinâmica na absorção do N. No entanto, esta resposta também pode estar associada ao desbalanço nutricional das fontes com efluente, como apresentado anteriormente, pelos altos teores de sódio e pela presença do nitrogênio amoniacal, produzindo alterações bioquímicas e fisiológicas no metabolismo das plantas (Chen et al. 2021).

Dessa forma, os resultados desta pesquisa mostram que a proporção de 50% do ETL, mostrou-se adequada para o manejo da aplicação de N. Essa dose proporcionou aporte de 248 kg N ha⁻¹, suprimindo a demanda nutricional da cultura com economia de 100% de fertilizante sintético. Além do mais, a nutrição das plantas foi adequada nessa dose, bem como a PG e a CE da solução do solo, no caso deste último parâmetro, os valores ficaram dentro do máximo tolerado pela cultura.

3.4. Conclusões

O efluente de laticínio tratado por sistema anaeróbio apresentou características favoráveis ao reuso da água para o cultivo do arroz, pelo aporte de nutrientes, principalmente nitrogênio e potássio. O potencial salino dessa água residuária se mostrou elevado, constituindo a principal desvantagem desta prática.

No solo, o efeito do efluente mostrou um incremento nas camadas superficiais e a presença do sódio nas doses com efluente, causou interferência na dinâmica de K e Mg, sugerindo que a mistura de 50% água e 50% efluente de laticínio pode garantir a disponibilidade destes nutrientes às plantas, com baixa influência salina. Na solução do solo, a aplicação do efluente incrementou a CE e os teores de sódio, potássio e nitrogênio, no caso deste último, com potencial de contaminação das águas subterrâneas.

A produção de grãos do arroz das cultivares estudadas, na condição de gotejamento subsuperficial, em ambiente protegido e em escala piloto, e na presença de fontes de irrigação com efluente de laticínio foi garantida com valores superiores ao relatado pelo Instituto Agrônomo (IAC), quando comparada às condições de campos inundados. Assim, a adoção do gotejamento subsuperficial melhorou a eficiência no uso da água nessas condições.

A interação entre as fontes de irrigação e as cultivares confirmam que a aplicação das doses de efluente provocam comportamentos distintos em relação a tolerância à salinidade, na produção

dos grãos e fertilidade de espiguetas. A cultivar do tipo japônica mostrou maior sensibilidade à presença do sódio, nas fontes com efluente, quando comparada com o arroz arbóreo e o preto.

A elevada concentração de nitrogênio no efluente de laticínio proporcionou nutrição adequada às plantas de arroz e a mistura de água e efluente (50 WE) foi suficiente para suprir 100% da necessidade nutricional. No entanto, houve baixa eficiência no uso de nitrogênio.

Esta pesquisa no Brasil é o ponto inicial para o desenvolvimento de tecnologias que promovam uma agricultura irrigada sustentável no cultivo do arroz. Os estudos devem seguir para responder questões principalmente relacionadas ao balanço de nutrientes nos efluentes e a dinâmica dos mesmos no solo e na absorção pelas plantas. Assim como, testes de cultivares mais adequadas à proposta da irrigação localizada, modificação do status da umidade do solo e tolerância à salinidade.

Referências

- Ahmad, A., Arif, M.S., Yasmeen, T., Riaz, M., Rizwan, M., Shahzad, S.M., Ali, S, Riaz, M.A, & Sarosh, M. (2020). Seasonal variations of phosphorus and associated fertility indicators in wastewater-irrigated urban aridisol. *Chemosphere*, 239: 124725, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124725>.
- ANA - Agência Nacional de Águas (2021). Mapeamento do arroz irrigado no Brasil. Brasília: ANA, 40 p.
- APHA, AWWA, WEF. (2012). Standard methods for the examination for water and wastewater. Twenty-second ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, DC, USA.
- Ayers, R.S., & Westcot, D.W. (1999). Water Quality for Agriculture. Irrigation and Drainage Paper, 29 Rev 1. FAO, Rome, Italy.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação Nº5. de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Anexo XX. Diário Oficial da União: República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, n.190, 03.out.2017.
- Bella, K., & Rao, P.V. (2021). Anaerobic digestion of dairy wastewater: effect of different parameters and co-digestion options—a review. *Biomass Conv. Bioref*, doi.org/10.1007/s13399-020-01247-2.
- Companhia De Tecnologia De Saneamento Ambiental – CETESB. (2006). Orientação para apresentação de projeto visando à aplicação de água de reúso proveniente de estação de tratamento de esgoto doméstico na agricultura. CETESB. 11.
- Chen, Z., Li, P., Jiang, S., Chen, H., Wang, J., & Cao, C. (2021). Evaluation of resource and energy utilization, environmental and economic benefits of rice water-saving irrigation technologies in a rice-wheat rotation system. *Science of the total environment*, 757: 143748, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143748>.

- Chapagain, A.K., & Hoekstra, A.Y. (2011). The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, 70(4): 749–758, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.11.012>.
- Coltro, L., Marton, L.F.M., Pilecco, F.P., Pilecco, A.C., & Mattei, L.F. (2017). Environmental profile of rice production in Southern Brazil: A comparison between irrigated and subsurface drip irrigated cropping systems. *Journal of Cleaner Production*, 153: 491–505, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.207>.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (2022). Acompanhamento da safra brasileira de grãos. v. 9, Safra 2021/22, n. 4, Brasília.
- Crusciol, C.A.C., Fernandes, A.M., Carmeis Filho, A.C.A., & Alvarez, R.C.F. (2016). Macronutrient uptake and removal by upland rice cultivars with different plant architecture. *Rev. Bras. Ciência do Solo*. 40: e0150115, <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150115>.
- Djaman, K., Mel, V.C., Diop, L., Sow, A., El-Namkay, R., Manneh, B., Saito, K., Futakuchi, K., & Irmak, S. (2018). Effects of Alternate Wetting and Drying Irrigation Regime and Nitrogen Fertilizer on Yield and Nitrogen Use Efficiency of Irrigated Rice in the Sahel. *Water*. 10: 10.3390/w10060711, <https://doi.org/10.3390/w10060711>.
- Donatti, R.N., Gomes, T.M., Menegassi, L.C., Tommaso, G., & Rossi, F. (2017). Sodium phytoremediation by green manure growing in soil irrigated with wastewater of dairy industry. *Agricultural Engineering, Jaboticabal*, 37(4): 665-675, <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n4p665-675/2017>.
- Doorenbos, J., & Kassam, A.H. (1994). Effect of water on crop yield. Trad. de H. R. Gheyi et al. Campina Grande: UFPB, 306. (FAO Irrigation and Drainage, 33) (in portuguese).
- Dridi, I., Louati, A., Arfaoui, A., Hamrouni, H., & Gueddari, M. (2017). Effects of a 25-year application of treated wastewater on soil properties of Cebala-Borj Touil irrigated perimeter (North Tunisia). *Desalin. Water Treat.* 83: 281-28, doi:10.5004/dwt.2017.20914.
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Brasília. 353.
- Fageria, N.K., & Baligar, V.C. (2005). Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, 88: 97–185, [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88004-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6).
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., & Jones, C.A. (2011). Growth and mineral nutrition of field crops. 3. Ed. CRC Press, 590.
- Fageria N K, Knupp A M (2013) Upland Rice Phenology and Nutrient Uptake in Tropical Climate. *Journal of Plant Nutrition* 36(1) 1–14. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.724136>
- Feng, Z.Y., Qin, T., Du, X.Z., Sheng, F., & Li, C.F. (2021). Effects of irrigation regime and rice variety on greenhouse gas emissions and grain yields from paddy fields in central China. *Agricultural Water Management*, 250: 106830, <https://10.1016/j.agwat.2021.106830>.
- Ferreira, D.F. (2011). Sisvar: a computer statistical analysis system. *Sci. Agrotechnol.* 35(6): 1039-1042. doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001

- Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. (2011). Climate change, water and food security: 36. Rome, 200 p. Acesso em: <http://www.fao.org/3/i2096e/i2096e.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations/Statistics Division – FAOSTAT. (2021). Food and agriculture data. Rome, Italy: FAOSTAT. Acesso em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Ganjegunte, G., Ulery, A., Niu, G., & Wu, Y. (2018). Organic carbon, nutrient, and salt dynamics in saline soil and switchgrass (*Panicum virgatum* L.) irrigated with treated municipal wastewater. *Land Degrad. Dev.* 29(1), 80-90, <https://doi.org/10.1002/ldr.2841>.
- Gorh, D., & Baruah, K.K. (2019). Estimation of methane and nitrous oxide emission from wetland rice paddies with reference to global warming potential. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26: 16331-16344, <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05026-z>.
- IAC (Instituto Agrônômico). (2005). Cultivares de arroz. <http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/graos/arroz.php> (acesso: 09 março 2021).
- International Rice Research Institute - IRRI. (2017). Rice knowledge bank. Accessed March 18th 2020). In: www.knowledgebank.irri.org/submergedsoils/index.php/rice-growing-environments/lesson-2.
- Ishfaq, M., Akbar, N., Anjum, S.A., & Anwar-Ul-haq, M. (2020). Growth, yield and water productivity of dry direct seeded rice and transplanted aromatic rice under different irrigation management regimes. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(11): 2656-2673, [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62876-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62876-5).
- Jung, K., Jang, T., Jeong, H., & Park, S. (2014). Assessment of growth and yield components of rice irrigated with reclaimed wastewater, *Agricultural Water Management*, 138: 17-25, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.02.017>.
- Khatun, S., Rizzo, C.A., & Flowers, T.J. (1995). Genotypic variation in the effect of salinity on fertility in rice. *Plant and Soil*, 173(2): 239-250, <https://doi.org/10.1007/BF00011461>.
- Köppen, W.; Geiger, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.
- Lan, K., Chen, X., Ridoutt, B.G., Huang, J., & Scherer, L. (2021). Closing yield and harvest area gaps to mitigate water scarcity related to China's rice production. *Agricultural Water Management*, 245: 106602, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106602>
- Malavolta, E., Vitti, G.C., Oliveira, S.A. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 319.
- Menegassi, L. C., Rossi, F., Dominical, L. D., Tommaso, G., Montes, C. R., Gomide, C. A., & Gomes, T. M. (2020). Reuse in the agro-industrial: Irrigation with treated slaughterhouse effluent in grass. *Journal of Cleaner Production*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119698>
- Morais Junior, O.P., Melo, P.G.S., Morais, O.P., & Colombari Filho, J.M. (2017). Genetic variability during four cycles of recurrent selection in rice, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 52: 1033-1041, <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017001100009>.

- Pereira, B.F.F., He, Z.L., Silva, M.S., Herpin, U., Nogueira, S.F., Montes, C.R., & Melfi, A.J. (2011). Reclaimed wastewater: impact on soil-plant system under tropical conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 192(1): 54-61, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.095>.
- Poddar, R., Acharjee, P. U., Bhattacharyya, K., & Patra, S. K. (2022). Effect of irrigation regime and varietal selection on the yield, water productivity, energy indices and economics of rice production in the lower Gangetic Plains of Eastern India. *Agricultural Water Management*, 262, 107327. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107327>
- Raij, B. van. (2001). Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo, 285 p.
- Raij, B. van, Cantarella, H., Quaggio, J.A., Furlani, A.M.C. (1997). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas. 285. (IAC. Boletim Técnico, 100).
- Reddi, G.H.S., & Reddy, T.Y. (2006). Efficiency use of irrigation water, Kalyani Publishers, Ludhiana.
- Reis, A.F.B., Vasconcelos, A.L.S., Almeida, R.E.M., Lago, B.C., Dias, C.T.S., & Favarin, J.L. (2018). Relationship of nitrogen and crop performance in aerobic rice and continuous flooding irrigation in weathered tropical lowland, *European Journal of Agronomy*. 95: 14-23, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.01.016>.
- Ricart, S., & Rico, A.M. (2019). Assessing technical land social driving factors of water reuse in agriculture: A review on risks, regulation and the yuck factor. *Agricultural Water Management*, 217: 426-439, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.017>.
- Sandhu, O.S., Gupta, R.K., Thinda, H.S., Jat, M.L., Sidhu, H.S., & Singh, Y. (2019). Drip irrigation and nitrogen management for improving crop yields, nitrogen use efficiency and water productivity of maize-wheat system on permanent beds in north-west India. *Agricultural Water Management*, 219: 19-26, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.040>.
- Santos, S.R., Ribeiro, D.P., Matos, A.T., Kondo, M.K., & Araújo, E.D. (2017). Changes in soil chemical properties promoted by fertigation with treated sanitary wastewater. *Agricultural Engineering*, 37(2): 343-352, <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n2p343-352/2017>.
- Sidhu, H.S., Jat, M.L., Singh, Y., Sidhu, R.K., Gupta, N., Singh, P., Singh, P., Jat, H.S., & Gerard, B. (2019). Sub-surface drip fertigation with conservation agriculture in a rice-wheat system: A breakthrough for addressing water and nitrogen use efficiency. *Agricultural Water Management*, 216: 273–283, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.019>.
- Silva, R. R., Siqueira, E. Q., Nogueira, I. S. (2018). Impactos ambientais de efluentes de laticínios em curso d'água na Bacia do Rio Pomba. *Eng. Sanit. Ambiental*, 23(2), 217-228. DOI: 10.1590/S1413-41522018138062
- Stanchev, P., Vasilaki, V., Egas, D., Colon, J., Ponsá, S., & Katsou, E. (2020). Multilevel environmental assessment of the anaerobic treatment of dairy processing effluents in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 261: 121139, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121139>.
- Stradioto, M. R., Teramoto, E. H., & Chang, H. K. (2019). Nitrato em águas subterrâneas do Estado de São Paulo. *Revista Do Instituto Geológico (Descontinuada)*, 40(3), 1–12. <https://doi.org/10.33958/REVIG.V40I3.672>

Tsutsui, H. (1972). Water management for rice production. *Rice crop*. 269: 36-41 (in portuguese).

United Nations Department of Economic and Social Affairs – UNDESA. (2018). The World's Cities in 2018: Data Booklet. New York, United Nations. Acesso em: http://www.un.org/en/events/citiesday/assets/pdf/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf

Valipour, M., & Singh, V.P. (2016). Global Experiences on Wastewater Irrigation: Challenges and Prospects. In *Balanced Urban Development: Options and Strategies for Liveable Cities*; Maheshwari, B., Singh, V.P., Thoradeniya, B., Eds.; Springer: Bern, Switzerland, 289–327.

van GENUCHTEN, M.Tn. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p.892-898, 1980.

van GENUCHTEN, M. Th., F. J. LEIJ, S. R. YATES. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, EPA Report 600/2- 91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA-ARS, Riverside, California, 1991.

World Water Assessment Programme – WWAP. (2012). *The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk*, Paris: UNESCO.

Yang, X., Xu, M., Zou, R., Angelidaki, I., & Zhang, Y. (2021). Microbial protein production from CO₂, H₂, and recycled nitrogen: Focusing on ammonia toxicity and nitrogen sources. *Journal of Cleaner Production*, 291: 125921, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125921>.

4. EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA E DINÂMICA DE SAIS E NUTRIENTES NO CULTIVO DE ARROZ ARBÓRIO PELA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA COM EFLUENTE TRATADO DE LATICÍNIO

Resumo

A utilização de sistemas de irrigação mais eficientes na aplicação da água aos cultivos agrícolas, aliada ao reúso de efluentes agroindustriais, são estratégias para reduzir a demanda pelos recursos hídricos, comumente presente nos campos de arroz. Dessa forma, esta pesquisa buscou avaliar a aplicação de efluente tratado de laticínio (ETL), por gotejamento subsuperficial, na dinâmica do uso da água, nutrientes e na produtividade do arroz tipo arbório, utilizado na culinária internacional, principalmente a italiana, em duas condições de umidade do solo. O experimento foi desenvolvido, em escala piloto, em condições de ambiente protegido, no campus da USP Fernando Costa, na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), Pirassununga-SP. O clima da região é considerado do tipo Cwa na classificação de Köppen e o solo foi classificado como Latossolo vermelho distrófico, textura média arenosa. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com esquema fatorial (2x4) + dois controles, com quatro repetições, sendo duas condições de umidade do solo (saturação-SAT e capacidade de campo-CC) e quatro doses de ETL: 25% ETL e 75% água, 50% ETL e 50% água, 75% ETL e 25% água e 100% ETL. Os tratamentos adotados como controles foram constituídos de irrigação com água na umidade do solo na CC e na condição de saturação. Foram avaliadas as características do efluente, a dinâmica de nutrientes e sódio do solo à planta, a produtividade de grãos (PG), a eficiência no uso da água (EUA) e o peso seco de raiz (PSR). Os resultados mostram que a concentração de sódio no ETL elevou o teor de sais na solução do solo, com dissolução para a camada mais profunda do solo estudada. As doses do efluente não alteraram a eficiência do uso da água, a produtividade de grãos e o peso seco da raiz, na umidade do solo na capacidade de campo, enquanto na saturação, os mesmos parâmetros foram superiores para a dose 50% ETL. Em ambas as umidades, a dose de 50% ETL proporcionou uma economia de 100% dos fertilizantes sintéticos, como fonte de nitrogênio e potássio, sem risco de lixiviação na solução do solo para os elementos sódio e nitrato.

Palavras-Chave: *Oriza sativa*; águas residuárias; gotejamento subsuperficial; solução do solo; sódio; nitrato.

Abstract

The use of more efficient irrigation systems in the application of water to agricultural crops, combined with the reuse of agro-industrial effluents, are strategies to reduce water resources demand, commonly present in rice fields. Thus, this research aimed to evaluate treated dairy effluent (TDE) application, by subsurface drip, in water and nutrients use dynamics and italian rice productivity, in two soil moisture conditions. The experiment was carried out, on a pilot scale, under protected environment conditions, at the USP Fernando Costa campus, at the Faculty of Animal Science and Food Engineering (FZEA/USP), Pirassununga-SP. The climate of the region is considered Cwa type in Köppen classification and the soil was classified as dystrophic red latosol, sandy medium texture. The experimental design was in randomized blocks, with a factorial scheme (2x4) + two controls, with four replications, two soil moisture conditions (saturation-SAT and field capacity -FC) and four doses of TDE: 25% TDE and 75% water, 50% TDE and 50% water, 75% TDE and 25% water and 100% TDE. The treatments adopted as controls were constituted of irrigation with water in soil moisture in FC and saturation condition. Effluent characteristics, nutrient and sodium dynamics from soil to plant, grain yield (GY), water use efficiency (WUE) and root dry weight (RDW) were evaluated. The results show that the sodium concentration in the ETL increased the salt content in the soil solution, with dissolution for the deepest layer of the studied soil. The effluent doses did not alter WUE, GY and RDW at FC soil moisture, while in saturation, the same parameters were higher for the 50% TDE dose. In both humidities, the dose of 50% TDE provided a savings of 100% of synthetic

fertilizers, as a source of nitrogen and potassium, without risk of leaching in the soil solution for the element's sodium and nitrate.

Keywords: *Oryza sativa*; wastewater; subsurface drip; soil solution; sodium; nitrate.

4.1. Introdução

O consumo de água pela agricultura irrigada, em conjunto com os efeitos da crise climática, que afetam diretamente a distribuição das chuvas, são os maiores desafios no caminho para tornar a produção agrícola mais sustentável. É neste cenário, que o cultivo do arroz, predominantemente irrigado pelo método de irrigação superficial por inundação, apresenta-se como um grande paradigma a ser rompido, frente a produção mundial de alimentos.

Além da quantidade de água, a qualidade é outro ponto importante nos diferentes usos que se faz dos recursos hídricos, e o lançamento de efluentes é o ponto mais crítico deste sistema. Países considerados em desenvolvimento, como o Brasil, apresentam baixa coleta e tratamento dos efluentes gerados pelo setor industrial, agrícola e urbano (ANA, 2017), que tem deteriorado a qualidade da água nos mananciais (Silva et al., 2018).

Os padrões de lançamento de efluente em relação a nitrogênio e fósforo são muito restritivos, o que eleva o custo de remoção desses nutrientes. Assim, sistemas simplificados de tratamento, como o tratamento anaeróbio, aliado ao reúso da água na agricultura, é uma alternativa promissora na preservação da qualidade dos recursos hídricos.

A irrigação por gotejamento tem proporcionado produtividades de arroz superior ou semelhante ao sistema inundado (Coltro et al., 2017; Sharda et al., 2017; Sidhu et al., 2019), além de melhorar a densidade de raízes (Parthasarathi et al., 2018), economizar energia (Sharda et al., 2017), reduzir a emissão de gases de efeito estufa e acidificação do solo (Coltro et al., 2017), assim como incrementar a eficiência do uso do nitrogênio (Sidhu et al., 2019).

O reúso da água é uma prática que reduz a pressão sobre os mananciais, pela diminuição do volume captado e lançado e melhora a fertilidade do solo (Mainardis et al., 2022), devido a ciclagem de nutrientes presentes nessas fontes de água, que podem substituir os fertilizantes sintéticos e incrementar a produtividade das culturas (Menegassi et al., 2020).

No contexto do reúso, as águas residuárias geradas pela agroindústria possuem maior potencial de utilização, porque em muitos casos, a logística para distribuição e aplicação na agricultura é facilitada pela proximidade aos campos de cultivo. Um exemplo a considerar são os laticínios, no entanto, uma característica desse efluente é a salinidade (Donatti et al., 2017) que pode alterar as propriedades físico-químicas do solo, além de provocar estresse salino às plantas (Poustie et al., 2020).

A influência do sódio em sistema irrigado com efluente, no cultivo agrícola, depende de uma série de fatores, como a distribuição e tamanho das partículas do solo (Zhang et al., 2014), a concentração de sódio no efluente, a dinâmica com outros íons, como Ca, Mg, K, carbonatos (CO_3^{2-}) e bicarbonatos (HCO_3^-) (Leal et al., 2009), além da tolerância da espécie vegetal à salinidade (Nachshon & Levy, 2022). Assim, um fator essencial no manejo da irrigação com efluente salino é reduzir o acúmulo de sais no solo, devendo-se adequar a dose de aplicação (Kaur et al., 2018) para que os efeitos benéficos do aporte de nutrientes, não sejam superados pela salinidade.

Diante de todo o contexto e do pioneirismo do tema, que agrega a prática do reúso da água com efluente de laticínio e a irrigação por gotejamento subsuperficial no cultivo do arroz, essa pesquisa escolheu a cultivar de arroz IAC 301, tipo arbório, com maior valor agregado no preço de venda, para avaliar o comportamento da umidade do solo e das doses de efluente na produtividade da cultura, considerando o aspecto salino dessas águas, a economia de fertilizantes sintéticos e a eficiência no uso da água e do nitrogênio pelas plantas.

4.2. Material e Métodos

4.2.1. Área de estudo e delineamento

O experimento foi realizado no ambiente protegido, em estufa do tipo arco, com área de 210 m² no campus da USP Fernando Costa, na Faculdade Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), Pirassununga-SP (627 m a.s.l., 21°59'S e 47°25'W). O clima da região é considerado do tipo Cwa na classificação de Köppen (Köppen & Geiger, 1928).

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial (2x4) + dois controles, com quatro repetições, sendo duas condições de umidade do solo (saturação-SAT e capacidade de campo-CC) e quatro doses de efluente tratado de laticínio (ETL), sendo estas: 25% ETL e 75% água (25E); 50% ETL e 50% água (50E), 75% ETL e 25% água (75E) e 100% ETL (100E). Os tratamentos controles foram: irrigação com água para umidade do solo na capacidade de campo (WCC) e irrigação com água para umidade na saturação (WSAT).

Cada parcela experimental foi constituída por uma caixa de fibra de vidro, com área superficial de 1 m² e profundidade de 0,5 m, totalizando 40 unidades. As caixas foram compostas por sistema de drenagem, constituído por um cano de PVC perfurado, instalado no sentido longitudinal da caixa, ligado a um registro para o lado externo e coberto por manta geotêxtil, sob uma camada de brita.

A cultivar de arroz utilizada foi a IAC 301, tipo arbório, utilizada na culinária internacional, principalmente a italiana. O semeio foi realizado em linhas com espaçamento de 0,17 m entrelinhas,

densidade de 50 sementes m^{-1} , sendo 4 linhas por parcela experimental. O semeio foi realizado no dia 28/04/2021 e a colheita no dia 13/10/2021, totalizando 168 dias de cultivo. A aplicação dos tratamentos foi iniciada no dia 24/05/2021.

A variação da temperatura do ar ao longo do ciclo está apresentada na Figura 1. Nos meses do inverno (60 a 108 DAS), alguns dias ficaram com temperaturas médias abaixo do limite inferior estabelecido para a cultura (16,4 °C, Sánchez et al., 2014). Após, observa-se a elevação da temperatura ficando próxima do limite ótimo de desenvolvimento (28,4 °C, Sánchez et al., 2014).

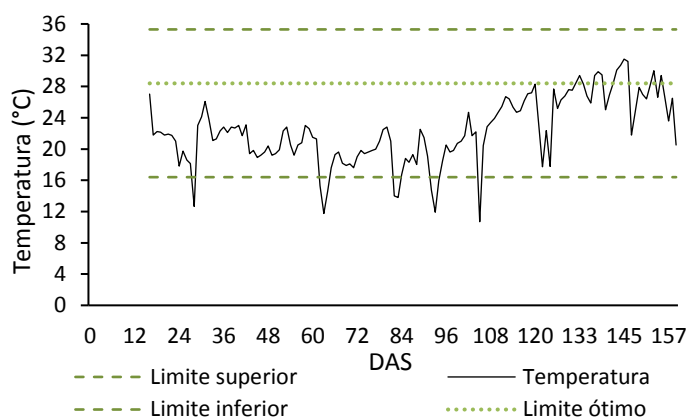


Figura 1. Temperatura média do ar nos dias após o semeio (DAS) do arroz, limites inferior, superior e ótimo, estabelecidos para a cultura arroz (Sánchez et al., 2014).

4.2.2. Efluente

O efluente utilizado para aplicação dos tratamentos foi proveniente de um laticínio comercial localizado no município de Santa Cruz da Conceição, o qual foi tratado na Estação Experimental de Tratamento de Efluentes do Campus USP “Fernando Costa”, próximo à área de cultivo. O sistema de tratamento adotado foi do tipo biológico anaeróbico, com biomassa suspensa, com regime de operação em bateladas sequenciais, com tempo de ciclo de 48 horas.

A caracterização físico-química do efluente de laticínio foi realizada com frequência quinzenal, durante a condução do experimento, no Laboratório de Biotecnologia Ambiental/FZEA/USP e na Central Multiusuários de Análises Ambientais/ESALQ/USP, analisados de acordo APHA (2012). Os parâmetros analisados foram: condutividade elétrica, pH, série nitrogenada (N-NTK, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, N-NO₂⁻, N-NT), P-PO₄⁻, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺. A Razão de absorção de sódio (RAS) foi calculada de acordo com Ayers & Westcot (1999). As amostras também foram coletadas antes e depois do reator para avaliação da demanda química total e solúvel de oxigênio (DQO).

O aporte de nutrientes via irrigação foi calculado por meio do produto entre o somatório da lâmina de efluente aplicada durante o ciclo e a concentração média do efluente.

4.2.3. Solo, solução do solo e fertirrigação

O solo utilizado para preenchimento das parcelas experimentais foi classificado como Latossolo vermelho distrófico, textura média arenosa (EMBRAPA, 2013), obtido de barranco em área sem uso nas proximidades da área de cultivo.

Antes de iniciar o experimento foi realizada a caracterização química do solo (Tabela 1) e física, no Laboratório de Ciências Agrárias/Solos da FZEA, segundo metodologia descrita por Raij et al. (2001), com determinação também do sódio, para cálculo da porcentagem de sódio trocável (PST).

Tabela 1. Caracterização química do solo anterior à experimentação.

| pH | P mg dm ⁻³ | K -----mmolc dm ⁻³ ----- | Na | Ca | Mg | CTC | PST (%) | V (%) | MO ----g kg ⁻¹ ---- | CT |
|------|--------------------------|--|------|-------|------|-------|------------|----------|-----------------------------------|-------|
| 4,90 | 6,00 | 0,80 | 0,19 | 15,00 | 2,00 | 51,00 | 0,37 | 35,30 | 23,00 | 13,34 |

CTC: capacidade de troca de cátions; PST: porcentagem de sódio trocável; V: saturação por bases; MO: matéria orgânica; CT: carbono total.

A caracterização física apresentou valores de densidade do solo (1,35 g cm⁻¹), porcentagens de argila (38%), silte (19%) e areia (43%), classificando o solo como franco argiloso.

Com base no resultado da análise química foi realizada a calagem, a qual foi estimada para elevar a saturação por bases para 50% da CTC. O calcário dolomítico (PRNT=88%) foi misturado ao solo com auxílio de betoneira, no momento do preenchimento das caixas com solo. Todas as parcelas receberam adubação de plantio, via fertirrigação com bomba injetora de vazão de 5 Lh⁻¹, sendo aplicados 70 kg ha⁻¹ de K₂O, 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), conforme recomendação para arroz irrigado (Raij et al., 1997). O nitrogênio e o potássio foram parcelados em três vezes, com frequência diária, enquanto o fósforo foi aplicado em uma única dose.

A fertirrigação de cobertura foi realizada, para o fornecimento de N e K, somente nos tratamentos irrigados com água (WCC e WSAT), a partir da emergência das plantas, entre os estádios vegetativo e início do reprodutivo (Crusciol et al., 2016). Foram aplicadas as doses de 120 kg ha⁻¹ de N e 90 kg ha⁻¹ de K₂O, parcelado em quatro vezes, com frequência semanal.

As fontes de fertilizantes sintéticos utilizadas foram: nitrato de cálcio (15,5% de N e 19% de Ca), nitrato de potássio (Krista - 12% de N, 43% de K₂O, 1% de S e 1% de Mg), com solubilidade de 310 g L⁻¹ e 300 g L⁻¹, respectivamente, em água a 20°C, e, ácido fosfórico (H₃PO₄).

Ao final do experimento foi realizada análise química do solo, por amostras compostas de cada parcela experimental para cada tratamento, na camada de 0-0,15 e 0,15-0,30 m. A solução do solo foi obtida por extratores de solução instalados a 0,10 m dos tensiômetros, na profundidade de 0,20 m. Para a coleta foi realizado vácuo, por meio de uma seringa plástica de 60 mL, 24 horas antes

da extração, que foi realizada também por seringa. Os parâmetros analisados foram: condutividade elétrica (CE), amônio (N-NH_4^+), nitrato (N-NO_3^-) e sódio (Na^+).

4.2.4. Irrigação

O sistema de irrigação adotado foi o gotejamento subsuperficial. Cada parcela recebeu quatro linhas de tubo gotejadores, enterrados a 0,15 m de profundidade (Sidhu et al., 2019), com 1 m de comprimento cada e gotejadores espaçados entre si de 0,15 m e entre linhas de irrigação com 0,20 m. O gotejador escolhido foi do tipo integrado, não compensante de pressão, anti sifão, modelo Aires, marca Netafim, vazão $1,6 \text{ L h}^{-1}$ e pressão de serviço de 15 m.c.a.

Os tratamentos foram individualizados por válvulas solenóides, uma para cada tratamento, operadas por painel controlador modelo Pro-C, marca Hunter® e duas moto-bombas, uma para cada fonte de água (água e efluente). A saída de cada moto-bomba foi constituída por um filtro de disco, para retenção de sólidos, e manômetros, para controle da pressão. Cada tratamento recebeu um hidrômetro para controle do volume de água, além do regulador de pressão de 25 PSI.

O manejo da irrigação foi realizado, com base na determinação da umidade do solo, por tensiômetros instalados na parte central da parcela experimental, na profundidade de 0,20 m, em três repetições por tratamento (blocos 1, 3 e 4), com turno de rega de dois dias. Os valores das tensões obtidos pelas leituras dos tensiômetros foram transformados para umidade, pela Curva Característica de Retenção da Água no Solo (CCRAS), na profundidade de 0,20 m, confeccionada no Laboratório do Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental/Centro de Ciências Agrárias/UFSCar.

A CCRAS foi ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980), por meio do software RETC (van Genuchten et al., 1991) versão 6.00. Os parâmetros gerados pelo ajuste foram $0,19 \text{ cm cm}^{-3}$, $0,57 \text{ cm cm}^{-3}$, 0,08, 1,28 e 0,22, para umidade residual (θ_r), umidade na saturação (θ_s), α , n e m , respectivamente. A umidade adotada como capacidade de campo foi de $0,45 \text{ cm cm}^{-3}$, valor correspondente no tensiômetro à 9 kPa, com base na curva, foram definidas as lâminas de irrigação, em função dos tratamentos adotados.

4.2.5. Desempenho agrônômico, eficiência do uso da água e eficiência no uso do nitrogênio

A área considerada útil para avaliação foram as duas linhas centrais, que totalizaram uma área de $0,5 \text{ m}^2$, e as duas fileiras externas foram consideradas bordadura. Inicialmente foram

separadas as panículas e a folha bandeira, posteriormente a parte aérea da planta foi cortada rente ao solo, com o auxílio de uma tesoura. Em laboratório, o material vegetativo foi seco em estufa com circulação forçada à 65 °C, até o peso constante, após foi determinado a biomassa seca, em balança de precisão. Os grãos foram separados para determinar os componentes de produção (Tabela 2).

A análise química foliar (folha bandeira) e do grão, para N, K e Na foi realizada conforme metodologia proposta por Malavolta et al. (1997), pelo Laboratório de Solos/ESALQ/USP, para o cálculo da extração de nutrientes (EN), determinados com base na produção (grãos e biomassa) e teor dos nutrientes em cada componente (Equação 1).

A eficiência no uso do nitrogênio (EUN), indicador de massa de produção incrementado por massa de N aplicado, foi calculado de acordo com a Equação 2 (Fageria & Baligar, 2005).

Tabela 2. Equações utilizadas na determinação dos componentes avaliados.

| Componente | Equação |
|---------------------------------|---|
| $EN = \frac{PB}{TN} * 0,001$ | EN: extração de nutrientes (kg ha ⁻¹) PB: produção (grãos e biomassa) (kg ha ⁻¹) TN: teor nutriente biomassa + grão (g kg ⁻¹) (1) |
| $EUN = \frac{PB}{NA}$ | EUN: eficiência do uso do nitrogênio (kg kg ⁻¹) PB: produção (grãos e biomassa) (kg ha ⁻¹) NA: quantidade de N aplicado (kg ha ⁻¹) (2) |
| $PG = NP * NE * FE * MG * 0.01$ | PG: produtividade dos grãos (kg ha ⁻¹) NP: número de panículas por m ² NE: número de espiguetas por panícula FE: porcentagem de fertilidade de espiguetas MG: peso de 1000 grãos (g) (3) |
| $EUA = \frac{PG}{TI}$ | EUA: eficiência no uso da água (kg m ⁻³) PG: produtividade de grãos (kg ha ⁻¹) TI: lâmina total de irrigação (m ³) (4) |

A produtividade dos grãos (PG) foi obtida mediante a relação dos componentes de produção (Equação 3). Para determinar os componentes, vinte panículas foram coletadas aleatoriamente por parcela (Figura 2A). O número de espiguetas por panícula (NE) foi obtido por contagem, somando o número de espiguetas cheias e cochas (Figura 2B). A fertilidade de espiguetas (FE) foi determinada através do quociente entre o número de espiguetas cheias e o NE. O número de panículas (NP) foi determinado contando as panículas na área útil da parcela, multiplicando o valor por dois e o peso de mil grãos (MG) foi determinado através da pesagem de 1000 grãos cheios, com teor de umidade ajustado para 13% (Figura 2C). A eficiência no uso da água (EUA), foi obtida pela Equação 4 (Reddi & Reddy, 2006).

Com o auxílio de um quadrado (0,50 m) coletou-se uma área de 0,25 m² de raiz na área útil da parcela. As raízes foram lavadas com água e uma solução de água e ácido clorídrico, com diluição de 0,1% para remover impurezas (Figura 2D). Após foram secas em estufas com circulação forçada à 65 °C até o peso constante, para determinar o peso seco de raiz (PSR), em balança de precisão.

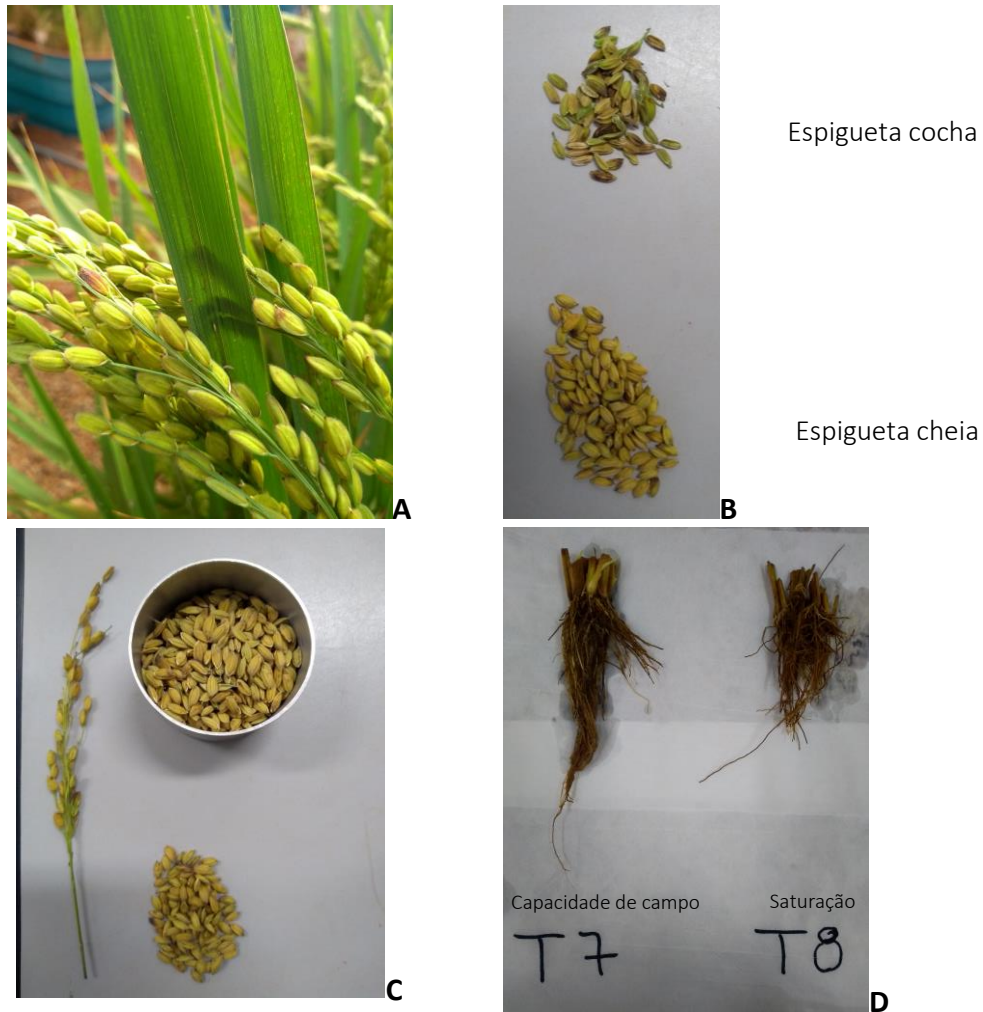


Figura 2. Vista da panícula no campo (A), separação das espiguetas cheias e cochas (B), contagem dos 1.000 grãos de arroz (C) e raiz do arroz após lavagem para remoção das impurezas (D).

4.2.6. Análise estatística

Os componentes avaliados foram submetidos à análise da variância, caso constatado diferenças significativas aos níveis de 1% ou 5% de probabilidade, foram realizadas comparações de médias entre as doses e umidade, pelo teste de Tukey.

Para as variáveis da solução do solo, PG e EUA foram realizadas análise de regressão, com ajuste linear ou quadrático, para os tratamentos com efluentes, em cada condição de umidade (CC e SAT). Na regressão, a comparação entre os tratamentos foi realizada pelo teste de Tukey. A análise foi realizada utilizando o software SISVAR, versão 5.7 (Ferreira, 2011).

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Irrigação e efluente tratado de laticínio

A irrigação por gotejamento forneceu água de forma eficiente para atender a demanda hídrica da cultura, como observado pelos valores do potencial da água no solo, os quais apresentaram variação semelhante entre as doses de ETL, dentro de cada condição de umidade.

Os valores de tensão da água no solo na saturação (Figura 3B) foram mantidos dentro da faixa de manejo durante todo o ciclo (0 e -5,43 kPa), com picos diários referente à reposição da umidade no solo e o consumo de água pela planta. Na umidade na capacidade de campo (Figura 3A), a tensão da água no solo foi mantida dentro da faixa de manejo até os 107 dias após semeio (DAS). Após esta data, observa-se o decréscimo da tensão, devido ao incremento da temperatura (Figura 1), que conseqüentemente demandou maior consumo de água. Ademais, aos 140 DAS ocorreu a emissão das panículas e o enchimento dos grãos, estádios de maior demanda hídrica pela cultura (Guimarães et al., 2016).

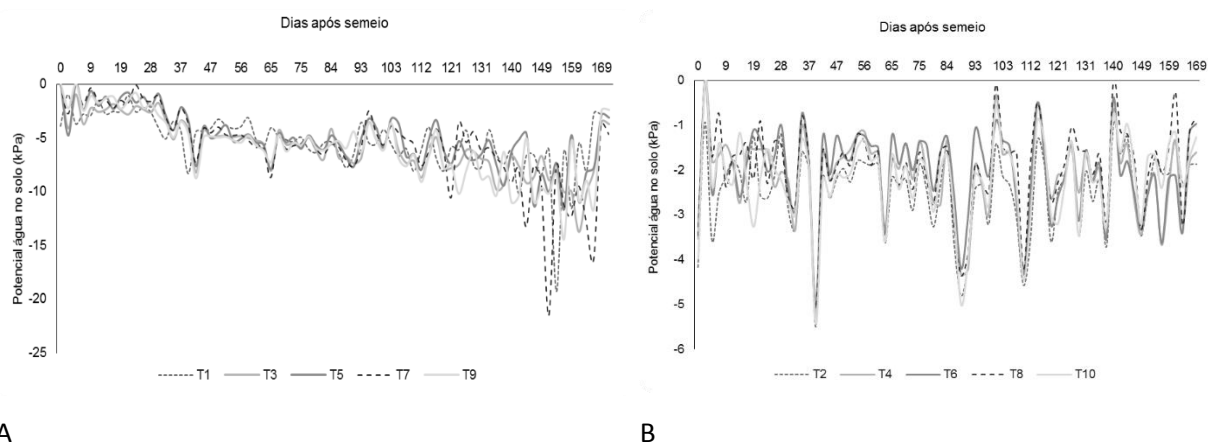


Figura 3. Potencial médio da água no solo (kPa) durante o cultivo do arroz, para o manejo na umidade de capacidade de campo (A) e saturação (B).

T1 e T2 irrigados com 100% água, na capacidade de campo (CC) e saturação (SAT), respectivamente; T3 e T4 irrigados com 75% água e 25% efluente tratado de laticínio (ETL), na CC e SAT, respectivamente; T5 e T6 irrigados com 50% água e 50% ETL, na CC e SAT, respectivamente; T7 e T8 irrigados com 25% água e 75% ETL, na CC e SAT, respectivamente; T9 e T10 irrigados com 100% ETL, na CC e SAT, respectivamente.

As lâminas das fontes de irrigação aplicadas em cada tratamento estão apresentadas na Figura 4. A irrigação com ETL foi iniciada aos 26 DAS, o que justifica as lâminas de água nos tratamentos 100E (T9 e T10). Como esperado, as maiores lâminas de irrigação foram aplicadas nos tratamentos com a manutenção da umidade próximo à saturação (T2, T4, T6, T8, T10) e as menores para os tratamentos na capacidade de campo (T1, T3, T5, T7, T9).

A lâmina média na CC foi de 565 mm, com economia de 54% de água quando comparada com a lâmina na SAT (1.226 mm). Coltro et al. (2017) encontraram valores de 1.400 mm para o cultivo de arroz irrigado por inundação e 900 mm por gotejamento. O maior consumo de água na saturação, quando comparada dentro da irrigação localizada, está relacionado ao tempo de cultivo (169 dias), que foi prolongado devido às baixas temperaturas ocorridas durante o período (Figura 1), bem como o potencial de água no solo superior à capacidade de campo.

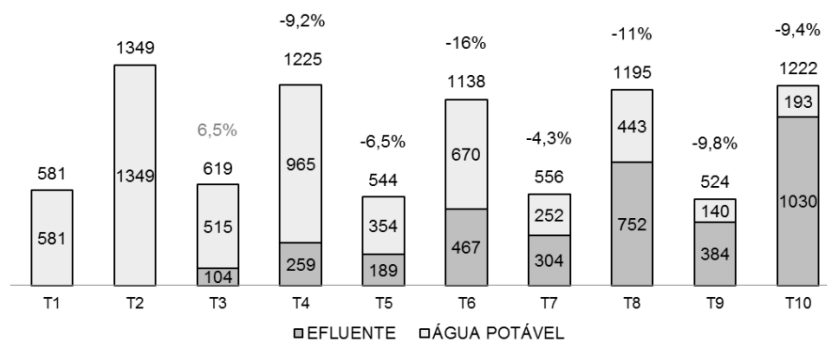


Figura 4. Lâmina de irrigação (mm) para cada tratamento e a porcentagem de acréscimo ou decréscimos dos valores, em relação ao controle.

T1 e T2 irrigados com 100% água, na capacidade de campo (CC) e saturação (SAT), respectivamente; T3 e T4 irrigados com 75% água e 25% efluente tratado de laticínio (ETL), na CC e SAT, respectivamente; T5 e T6 irrigados com 50% água e 50% ETL, na CC e SAT, respectivamente; T7 e T8 irrigados com 25% água e 75% ETL, na CC e SAT, respectivamente; T9 e T10 irrigados com 100% ETL, na CC e SAT, respectivamente.

A dose do ETL alterou a demanda hídrica em cada condição de umidade, com menor consumo de água em relação aos tratamentos controles (T1 e T2), exceto para o tratamento T3 na CC. A presença de sais no efluente (Tabela 3), provavelmente, aumentou o potencial osmótico, quando dissolvidos na solução do solo, e conseqüentemente, reduziu a disponibilidade de água às plantas (Poustie et al., 2020).

Na Tabela 3 é apresentada a caracterização química do ETL e o aporte de nutrientes via irrigação para cada tratamento, em função da lâmina aplicada. As concentrações de nitrogênio, predominantemente na forma amoniacal, apresentaram valores elevados ($69,39 \pm 16,55 \text{ mg L}^{-1}$), inadequado para o lançamento nos corpos hídricos, segundo padrão estabelecido (20 mg L^{-1}) pela legislação ambiental (Brasil, 2011), sendo necessário tratamento complementar para a remoção do N. Com relação aos outros macronutrientes (P, Ca, Mg, K), observa-se concentrações elevadas desses elementos, embora em menor concentração, quando comparado ao nitrogênio.

O teor de sódio está relacionado à salinidade e pode gerar restrição ao uso do efluente em longos períodos de aplicação. O valor observado para o Na (Tabela 3) está acima da concentração máxima para aplicação em culturas agrícolas (69 mg L^{-1}) e apresenta restrição de uso na irrigação (Cetesb, 2006). Devido às elevadas concentrações de sódio, em comparação às de cálcio e magnésio,

a razão de adsorção de sódio (RAS) do ETL apresentou valor médio de 11,37 ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)^{0,5}, valor próximo ao máximo sugerido pelo órgão ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb, 2006), para a irrigação de culturas.

Tabela 3. Caracterização química (média e desvio padrão) e aporte de nutrientes e sódio nos tratamentos irrigados com efluente tratado de laticínio.

| Parâmetro | ETL | Aporte (kg ha^{-1}) | | | | | | | |
|---|----------------|--------------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|---------|
| | Concentração | 25ECC | 25ESAT | 50ECC | 50ESAT | 75ECC | 75SEAT | 100ECC | 100ESAT |
| N-NTK (mg L^{-1}) | 101,48 ± 23,87 | 105 | 263 | 192 | 474 | 309 | 763 | 390 | 1.045 |
| N-NH ₄ ⁺ (mg L^{-1}) | 69,39 ± 16,55 | 72 | 180 | 131 | 324 | 211 | 522 | 267 | 715 |
| N-NO ₃ ⁻ (mg L^{-1}) | 0,47 ± 0,22 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 4 | 2 | 5 |
| N-NO ₂ ⁻ (mg L^{-1}) | 0,07 ± 0,10 | 0,07 | 0,18 | 0,13 | 0,33 | 0,21 | 0,53 | 0,27 | 0,72 |
| N-NT (mg L^{-1}) | 69,93 ± 16,57 | 73 | 181 | 132 | 327 | 213 | 526 | 269 | 720 |
| P-PO ₄ ⁻ (mg L^{-1}) | 8,97 ± 2,68 | 9 | 23 | 17 | 42 | 27 | 67 | 34 | 92 |
| K ⁺ (mg L^{-1}) | 41,48 ± 17,14 | 43 | 108 | 79 | 194 | 126 | 312 | 159 | 427 |
| Ca ²⁺ (mg L^{-1}) | 26,08 ± 9,37 | 27 | 68 | 49 | 122 | 79 | 196 | 100 | 269 |
| Mg ²⁺ (mg L^{-1}) | 11,05 ± 2,11 | 11 | 29 | 21 | 52 | 34 | 83 | 42 | 114 |
| Na ⁺ (mg L^{-1}) | 270,74 ± 85,88 | 281 | 702 | 513 | 1.265 | 823 | 2.035 | 1.040 | 2.788 |
| RAS (mmol/L) ^{-1/2} | 11,37 ± 3,58 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| pH | 8,39 ± 0,30 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| CE (dS m^{-1}) | 1,63 ± 0,82 | - | - | - | - | - | - | - | - |

ETL: efluente tratado de laticínio; NTK: nitrogênio total Kjeldahl; RAS: razão de absorção de sódio; CE: condutividade elétrica, CC: capacidade de campo; SAT: saturação. NT: nitrogênio total (somatório de NH₄⁺, NO₃⁻ e NO₂⁻).

Ayers & Westcot (1999) apontam diretrizes para avaliação da qualidade da água utilizada na irrigação referente a salinidade, cuja faixa de CE entre 0,7 - 3,0 dS m^{-1} , apresenta restrição ao uso de baixo a moderado. Segundo os mesmos autores, o arroz é considerado uma cultura moderadamente tolerante à salinidade, com potencial de produtividade máxima, quando a CE da fonte de água utilizada na irrigação for menor ou igual a 2,2 dS m^{-1} , valor acima do determinado neste estudo (1,63 ± 0,82 dS m^{-1}).

O pH alcalino do ETL está associado ao alto teor de cátions, que pode comprometer a disponibilidade de P e micronutrientes na solução do solo, além de alterar a dinâmica das transformações do nitrogênio no solo (Poustie et al., 2020).

Ao analisar o aporte de macronutrientes de interesse comercial para as culturas agrícolas, como N, K, P, Ca e Mg, observa-se quantidades expressivas, com capacidade de substituição dos fertilizantes sintéticos (Tabela 3). A ordem decrescente do aporte dos nutrientes pela irrigação com ETL foi: Na > nitrogênio total (N - NT) > K > Ca > Mg > P-PO₄. Os valores para sódio foram da ordem de 281,00 a 2.788,00 kg ha^{-1} , devido à elevada concentração no ETL. Os solos com altos níveis de sódio

trocável podem afetar o crescimento das plantas pela alteração das propriedades físico-químicas do solo, deficiências ou desequilíbrios nutricionais e toxicidade às plantas (Poustie et al., 2020).

O aporte de nitrogênio total na dose 50ECC (132 kg ha^{-1}) está próximo do recomendado para a cultura (100 kg ha^{-1}), enquanto as demais doses apresentaram variação de 73 a 720 kg ha^{-1} . Como esperado, os maiores valores são para as maiores doses na condição de saturação do solo. O mesmo comportamento é observado para os demais elementos, com quantidades significativas de K, Ca e Mg.

A DQO total e filtrada na entrada do sistema de tratamento foram $1.937 \pm 1.647 \text{ mg L}^{-1}$ e $1.309 \pm 1.278 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. Após o tratamento, houve uma eficiência de remoção de 80% e 77%, respectivamente, considerado alto para o tratamento biológico. A produção média de alcalinidade em bicarbonato e o consumo médio de ácidos foram $979 \pm 330 \text{ mg L}^{-1}$ e $112 \pm 49 \text{ mg L}^{-1}$, na saída do tratamento, demonstrando a robustez do sistema de tratamento, mesmo com alta variabilidade na composição do efluente.

4.3.2. Química do solo e solução do solo

A caracterização química do solo após a irrigação com ETL nas diferentes doses e umidades estão apresentadas na Tabela 4. A aplicação do ETL não teve efeito no teor de P e Mg no solo, na profundidade de 0-0,15 m, embora houve aporte crescente de 9 a 92 kg ha^{-1} e de 11 a 114 kg ha^{-1} , respectivamente, nas doses aplicadas (Tabela 3). No entanto, o Mg foi alterado na profundidade de 0,15-0,30m. Houve incremento do pH, porcentagem de sódio trocável (PST), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V) e dos teores de K, Na e Ca do solo, com o aumento das doses de ETL. A umidade na saturação também incrementou os teores desses elementos, em ambas as profundidades.

Tabela 4. Caracterização química do solo após irrigação com efluente tratado de laticínio, em diferentes doses e nas profundidades de 0-0,15 e 0,15-0,30 m.

| | pH | P mg dm ⁻³ | K | Na | Ca | Mg | CTC | PST (%) | V (%) |
|----------|---------|--------------------------|---------|---------|------------|----------|-----------|------------|----------|
| Dose ETL | | | | | 0-0,15m | | | | |
| W | 6,02 b | 27,75 | 1,66 b | 0,19 c | 61,62 c | 19,75 | 111,37 c | 0,17 c | 75,64 c |
| 25E | 6,32 a | 24,50 | 1,76 b | 1,01 b | 68,25 c | 17,50 | 115,00 c | 0,86 b | 76,90 bc |
| 50E | 6,39 a | 21,25 | 2,17 ab | 1,32 b | 90,62 bc | 19,37 | 138,87 bc | 0,96 ab | 81,52 ab |
| 75E | 6,47 a | 27,12 | 2,52 ab | 1,40 ab | 126,12 a | 20,00 | 174,50 a | 0,83 b | 85,44 a |
| 100E | 6,51 a | 16,75 | 2,71 a | 1,96 a | 102,75 ab | 20,50 | 152,25 ab | 1,32 a | 83,80 a |
| Umidade | | | | | | | | | |
| CC | 6,28 b | 27,55 | 2,14 | 0,89 b | 89,05 | 20,10 | 138,40 | 0,62 b | 80,76 |
| SAT | 6,41 a | 19,40 | 2,19 | 1,46 a | 90,70 | 18,75 | 138,40 | 1,03 a | 80,56 |
| CV | 2,71 | 58,61 | 29,55 | 34,07 | 22,10 | 14,52 | 14,69 | 35,08 | 4,16 |
| Dose | | | | | 0,15-0,30m | | | | |
| 0 | 5,81 c | 5,75 | 0,40 d | 0,07 d | 46,87 c | 12,37 b | 91,62 c | 0,07 c | 65,76 c |
| 25E | 6,22 b | 5,87 | 0,64 cd | 1,02 c | 58,00 bc | 13,50 ab | 101,87 bc | 1,00 b | 71,74 b |
| 50E | 6,31 ab | 6,50 | 1,06 bc | 1,69 b | 77,25 ab | 14,12 ab | 122,25 ab | 1,37 b | 76,70 a |
| 75E | 6,34 ab | 6,25 | 1,49 ab | 1,82 b | 93,37 a | 15,37 a | 139,37 a | 1,34 b | 79,90 a |
| 100E | 6,45 a | 6,37 | 1,96 a | 2,81 a | 87,00 a | 15,62 a | 134,25 a | 2,16 a | 79,67 a |
| Umidade | | | | | | | | | |
| CC | 6,11 b | 6,45 | 0,77 b | 1,13 b | 71,40 | 13,90 | 116,70 | 0,89 b | 73,67 b |
| SAT | 6,34 a | 5,85 | 1,44 a | 1,83 a | 73,60 | 14,50 | 119,05 | 1,49 a | 75,83 a |
| CV | 2,22 | 34,28 | 40,19 | 20,19 | 20,82 | 12,71 | 12,93 | 26,07 | 3,93 |

ETL: efluente tratado de laticínio; CTC: capacidade de troca de cátions; PST: porcentagem de sódio trocável; V: saturação por bases; CC: capacidade de campo; SAT: saturação; CV: coeficiente de variação. Médias seguidas por letras diferentes diferem pelo teste de Tukey. W: irrigação com 100% água; 25E: 25% ETL e 75% água; 50E: 50% ETL e 50% água; 75E: 75% ETL e 25% água; 100E: 100% ETL.

O pH elevado em solo fertirrigado com efluente também foi encontrado por outros autores (Menegassi et al., 2020; Musazura et al., 2019), o qual é atribuído aos valores encontrados no ETL (Tabela 3), além do fornecimento de cátions pelo mesmo (Aghajani Shahrivar et al., 2019).

Embora, o aporte de sódio via irrigação foi superior aos demais nutrientes (Tabela 3), no solo esse elemento foi inferior aos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺, nas duas profundidades, o que justifica o valor da PST (Tabela 4). A baixa concentração de sódio no complexo de troca do solo está relacionada a competição com Ca²⁺ e Mg²⁺, uma vez que este, tem maior força de adsorção (força de adsorção: Al³⁺ = H⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ = NH₄⁺ > Na⁺) (Epstein & Bloom, 2006).

A PST é utilizada como indicadora de alterações na estrutura físico-hídrica do solo em sistema irrigado com efluente. No entanto, o efeito deletério da PST depende da interação com a concentração eletrolítica da solução do solo, além desse efeito ser mais expressivo ao término da irrigação com efluente (Muyen et al., 2011). Nesta pesquisa, embora a PST tenha aumentado com as doses de efluente, os valores encontrados (0,07-2,16%) não apresentam potencial de risco de sodificação do solo (Ayers & Westcot, 1999). Além disso, o aumento do sódio trocável e da PST ao longo do tempo, está mais relacionado ao uso contínuo da irrigação com efluente do que à quantidade aplicada (Leal et al., 2009).

O incremento na dose aplicada de efluente refletiu no aporte de nutrientes (Tabela 3), que elevou a concentração de cátions no complexo de troca do solo (Tabela 4), resultando em maiores valores de CTC e V%, comparado ao início do experimento (Tabela 1). Embora a irrigação com ETL tenha apresentado elevada concentração de sódio e RAS, por conter quantidades significativas de K, Ca e Mg, o efeito da salinidade foi minimizado com o aumento da V% e CTC.

Ao analisar a concentração de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ trocável no perfil do solo, observa-se a lixiviação do Na^+ para a camada mais profunda (0,15-0,30m), enquanto os demais nutrientes se concentraram na camada superficial (Figura 5). O sódio apresenta menor afinidade ao complexo de troca do solo levando a maiores concentrações na solução do solo (Figura 6) e, conseqüentemente, maior migração do Na^+ no perfil do solo, principalmente em solos tropicais (Leal et al., 2009; Menegassi et al., 2020). Esses resultados são diferentes dos encontrados por Muyen et al. (2011), que relatam uma migração de Na^+ da solução do solo para o complexo de troca do solo, levando à uma progressiva sodificação do solo.

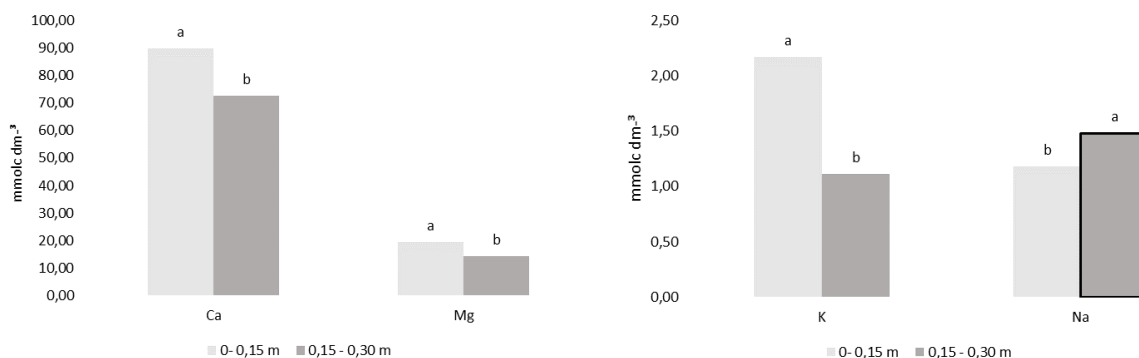


Figura 5. Concentração média de Ca, Mg, K e Na trocável no perfil do solo (0-0,15m e 0,15-0,30m), após irrigação com diferentes doses de efluente tratado de laticínio.

Quanto a solução do solo, coletada por extratores de solução de cápsula porosa, foi possível observar nas lâminas de irrigação com ETL, correlação linear positiva com os valores de CE, nitrato (NO_3^-) e sódio com o aumento da dose aplicada, no momento da colheita. No entanto, para todos os parâmetros, a dose 25E foi semelhante ao controle nas duas condições de umidade do solo (Figura 6).

A CE na umidade na CC (Figura 6A) e na saturação (Figura 6B) apresentaram comportamentos semelhantes e valores muito próximos. Na CC houve aumento de $1,32 \text{ dSm}^{-1}$, entre o controle ($0,15 \text{ dSm}^{-1}$) e a dose 100E ($1,47 \text{ dSm}^{-1}$), enquanto que na saturação o aumento foi de $1,51 \text{ dSm}^{-1}$, entre as mesmas doses ($0,14 - 1,65 \text{ dSm}^{-1}$). A elevação da CE na solução do solo é esperada com o aumento da dose de efluente. Shilpi et al. (2018) encontraram valores semelhantes ao irrigar milho com efluente tratado de laticínio e atribui tal resposta a própria salinidade presente no

efluente. Os valores de CE encontrados neste estudo não têm potencial para comprometer o rendimento da cultura, uma vez que o arroz é considerado moderadamente sensível a salinidade, tolerando valores de até $3,3 \text{ dSm}^{-1}$ de CE no extrato de solução (Ayers & Westcot, 1999).

A concentração de sódio foi superior para a dose 100E em ambas as condições de umidade do solo (Figuras 6CD), em relação ao controle. Na CC não houve diferença entre o controle ($0,31 \text{ mmolc dm}^{-3}$) e as dose 25E, 50E e 75E ($0,86 - 5,71 \text{ mmolc dm}^{-3}$). Entretanto, na saturação o controle ($0,78 \text{ mmolc dm}^{-3}$) foi semelhante apenas a dose 25E, com diferença entre as demais. O comportamento diferente entre as condições de umidade se deve ao aporte de sódio pelo efluente, que refletiu em maior concentração na solução do solo na condição de saturação, com valores entre $1,62$ a $10,62 \text{ mmolc dm}^{-3}$, entre a mínima e máxima dose do efluente.

Os tratamentos não alteraram a concentração de amônio na solução do solo, cuja média foi $0,05 \text{ mg L}^{-1}$, embora a concentração no ETL foi maior do que o nitrato (Tabela 3). Esse resultado é diferente do relatado por Libutti et al. (2018), cuja concentração de amônio superior no efluente elevou os níveis no solo.

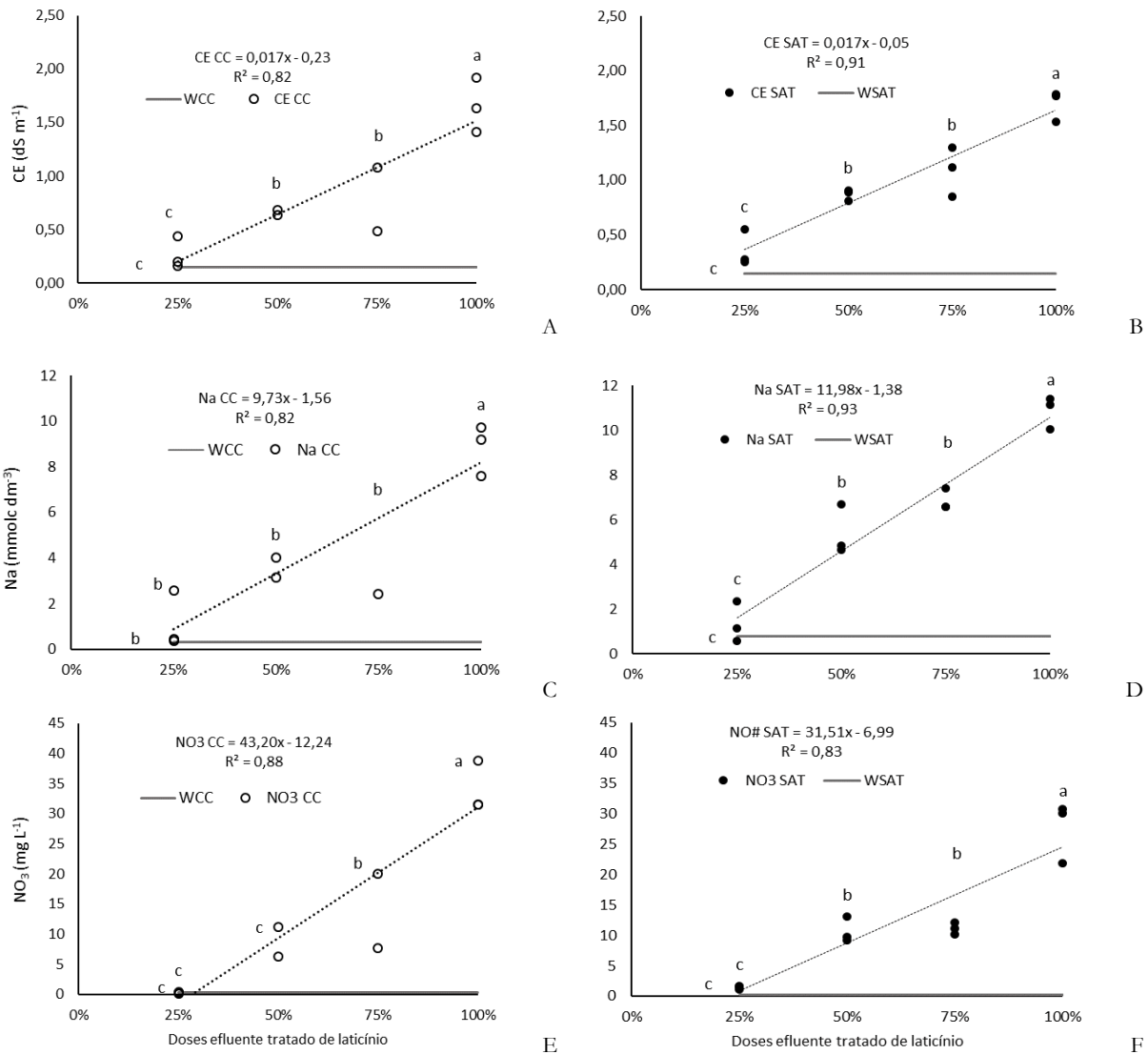


Figura 6. Condutividade elétrica (CE, A e B), concentração de sódio (Na, C e D) e nitrato (NO_3^- , E F) na solução do solo, no momento da colheita do arroz fertirrigado com doses de efluente tratado de laticínio (ETL), na umidade do solo na capacidade de campo (CC, esquerda) e saturação (SAT, direita).

WCC: irrigação com água na capacidade de campo; WSAT: irrigação com água na saturação; 25%: 25% ETL e 75% água; 50%: 50% ETL e 50% água; 75%: 75% ETL e 25% água; 100%: 100% ETL. Médias seguidas por letras diferentes, diferem entre si pelo teste de Tukey $p < 0,05$.

Na solução do solo observa-se o predomínio da concentração de nitrato (Figuras 6EF), resultante do processo de nitrificação. Quando o arroz é cultivado em sistema alagado, tende a absorver N na forma amoniacal, devido ao processo de oxido-redução do solo, e, quando é cultivado em sistemas aeróbio predomina o nitrato (Fageria & Knupp, 2013). Neste estudo, não foi mantida uma lâmina de água acima da superfície do solo, o que favoreceu o processo de nitrificação, justificado pelos teores de nitrato na solução do solo.

O aumento do nitrato com as doses de efluente é esperado devido à concentração do nitrogênio nesta fonte de água (Tabela 3). Na CC houve diferença na concentração do nitrato, ao comparar as doses 75E ($20,16 \text{ mg L}^{-1}$) e 100E ($30,96 \text{ mg L}^{-1}$), em relação ao controle ($0,34 \text{ mg L}^{-1}$). Na

saturação, não houve diferença entre a dose 25E e o controle ($0,25 \text{ mg L}^{-1}$) e a máxima concentração foi para a dose 100E ($24,51 \text{ mg L}^{-1}$).

O processo de nitrificação pode alterar a dinâmica do sódio sob elevadas concentrações de N (Che et al., 2021), uma vez que ao liberar prótons, reduz o pH do solo e aumenta a liberação de cátions para a solução do solo, acelerando a salinização (Han et al., 2015). A concentração de nitrato em ambas condições de umidade, podem ter contribuído para aumentar a dissolução do Na^+ na solução (Figuras 6CD), e, conseqüentemente, maior migração no perfil do solo (Figura 5).

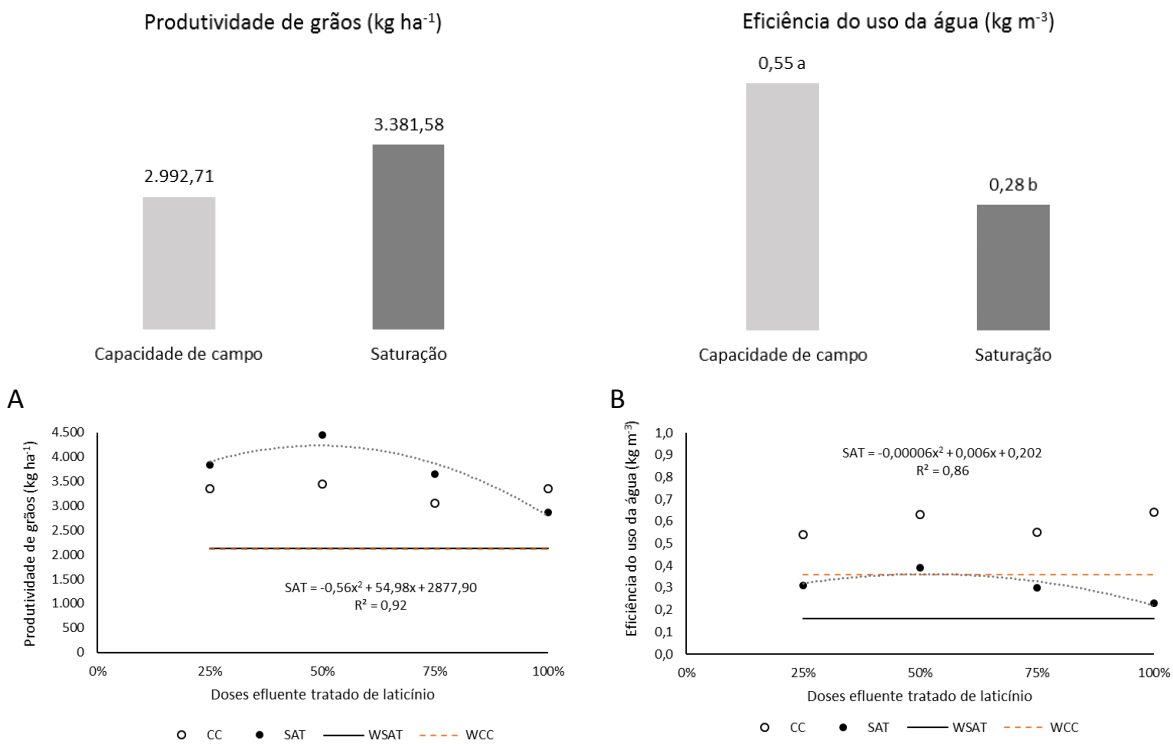
4.3.3. Produtividade de grãos e eficiência do uso da água

A produtividade dos grãos (PG) do arroz é a variável de interesse comercial e por isso objeto de avaliação, assim como a eficiência no uso da água (EUA), índice que quantifica a relação entre a produtividade obtida pela cultura pelo volume de água aplicada pela irrigação.

Não houve interação entre doses de efluente e umidade do solo para a PG e EUA. A PG não foi alterada pela umidade do solo (Figura 7A), com médias de $2.992,71 \text{ kg ha}^{-1}$ e $3.381,58 \text{ kg ha}^{-1}$, para CC e SAT, respectivamente, enquanto a EUA foi superior para CC ($0,55 \text{ kg m}^{-3}$) em relação a SAT ($0,28 \text{ kg m}^{-3}$, Figura 7B).

As doses de efluente não alteraram a PG e EUA na umidade na CC (Figuras 7CD e Tabela 5). Na SAT, a dose de 50E apresentou a maior PG ($4.449,25 \text{ kg ha}^{-1}$), sem diferir da dose 25E ($3.830,78 \text{ kg ha}^{-1}$) e, maior EUA ($0,39 \text{ kg m}^{-3}$), com diferença entre as demais doses.

Em termos absolutos, a PG na SAT foi superior a CC para todas as doses de efluente, exceto para a 100E ($2.865,10 \text{ kg ha}^{-1}$ e $3.349,74 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente), enquanto a PG para os controles foram semelhante ($2.120,21 \text{ kg ha}^{-1}$ e $2.117,60 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente), sugerindo que o decréscimo do potencial hídrico no solo, na umidade na CC (Figura 3), não comprometeu a PG nessa condição.



C **D**
Figura 7. Produtividade de grãos (A) e eficiência do uso da água (B) para a umidade do solo na capacidade de campo (CC) e na saturação (SAT). Comparação entre irrigação com doses de efluente tratado de laticínio (ETL, bola) e água (W, linha), dentro da umidade do solo na CC e SAT, para a produtividade de grãos (C) e eficiência do uso da água (D).

WCC: irrigação com água na CC; WSAT: irrigação com água na SAT; 25%: 25% ETL e 75% água; 50%: 50% ETL e 50% água; 75%: 75% ETL e 25% água; 100%: 100% ETL. Bola e linha, vazia e tracejada, respectivamente, regressão não significativa (CC) e cheia e contínua, respectivamente, regressão significativa (SAT).

Tabela 5. Produtividade de grãos (A) e eficiência do uso da água (B) para a umidade do solo na capacidade de campo (CC) e na saturação (SAT).

| Dose | Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹) | | Eficiência do uso da água (kg m ⁻³) | |
|-------|---|-------------|---|----------|
| | Capacidade de campo | Saturado | Capacidade de campo | Saturado |
| W | 2.117,60 | 2.120,21 d | 0,36 | 0,16 d |
| 25E | 3.349,79 | 3.830,78 ab | 0,54 | 0,31 b |
| 50E | 3.438,76 | 4.449,25 a | 0,63 | 0,39 a |
| 75E | 3.055,96 | 3.642,56 bc | 0,55 | 0,30 b |
| 100E | 3.349,74 | 2.865,10 cd | 0,64 | 0,23 c |
| CV(%) | 23,69 | 10,52 | 23,38 | 10,16 |

CV: coeficiente de variação. Médias seguidas por letras diferentes diferem pelo teste de Tukey $p < 0,05$. W: irrigação com 100% água; 25E: 25% ETL e 75% água; 50E: 50% ETL e 50% água; 75E: 75% ETL e 25% água; 100E: 100% ETL.

Nas duas condições de umidade do solo, os nutrientes presentes no ETL, principalmente o N, e a baixa absorção de sódio pela planta, favoreceram a produtividade do arroz nas condições estudadas, cujos valores de PG estão próximos do relatado no sistema inundado (3.609 kg ha⁻¹) para a mesma cultivar (IAC, 2005). Esses resultados estão de acordo com estudos que encontraram

economia de água no cultivo do arroz, sem afetar a produção (Ishfaq et al., 2020; Sharda et al., 2017), comparado ao sistema inundado.

Os valores da EUA estão abaixo do relatado em outros estudos com irrigação por gotejamento superficial (Sidhu et al., 2019) e molhamento e secagem alternados do solo (Feng et al., 2021). Esse fato está associado ao maior tempo de cultivo, pela condição de um período com baixas temperaturas, como relatado anteriormente, o que levou a maior aplicação das lâminas de irrigação.

4.3.4. Extração de nitrogênio, potássio, sódio, eficiência no uso do nitrogênio e peso seco de raiz

O aporte de nitrogênio e sais no solo são os fatores limitantes quando se considera a irrigação com águas residuárias. A transformação do nitrogênio para a forma de nitrato, assim como o sódio, pode ser lixiviada para as águas subterrâneas. No entanto, se as taxas de aplicação e de absorção pela cultura forem equilibradas, esse problema pode ser minimizado.

Na Figura 8A são apresentados a extração do nitrogênio, potássio e sódio pelo arroz ao final do ciclo de cultivo, em relação as doses de efluente na CC. Embora o menor aporte de N tenha sido para a dose 25E, a menor extração foi observada para o controle (97 kg ha^{-1}). O fornecimento crescente de N nas demais doses, não refletiram em maior absorção pela planta, uma vez que não houve diferença de extração de N entre as doses de efluente (variação de 150 a 162 kg ha^{-1}).

Quanto a absorção de K e Na entre os tratamentos, não foram constatadas diferenças. Em termos absolutos, o controle apresentou uma absorção de 77 kg ha^{-1} de K, superior as demais doses de efluente, exceto para a 75E (79 kg ha^{-1}). Os valores de extração do sódio foram desprezíveis, quando considerado o aporte pela irrigação (Figura 8A).

Na condição de saturação do solo, o aporte de N e K foi crescente de acordo com as doses de efluente e a extração foi menor para o controle, sem diferença entre os tratamentos com ETL. No controle, a absorção de N e K foi de 77 kg ha^{-1} e 54 kg ha^{-1} , respectivamente, enquanto nas doses de efluente a variação foi de 177 a 219 kg ha^{-1} para o N e 90 a 110 kg ha^{-1} para o K. Semelhante a CC, não houve diferença de absorção do sódio entre os tratamentos, sendo os valores desprezíveis comparado ao aporte pela irrigação (Figura 8B).

A combinação do maior aporte de nutrientes pela irrigação com efluente e a dissolução dos sais na solução do solo em profundidade, podem ter contribuído para uma melhor absorção de N e K nos tratamentos com ETL, na umidade de saturação (Figura 8B). O K^+ preferencialmente absorvido pelas raízes, comparado ao Na^+ (Figuras 8AB), levou a uma mitigação do estresse salino nas plantas. A preferência de absorção do K^+ pelas plantas de arroz, está relacionado a um mecanismo adaptativo

de tolerância ao sal, que ativa o sistema de absorção com alta afinidade ao K^+ , regulando a relação K^+/Na^+ no citosol das células (Chen et al., 2021).

A eficiência do uso do nitrogênio (EUN) apresentou comportamento diferente, entre as doses de efluente, para cada condição de umidade do solo (Figura 8C). Na CC, a maior EUN foi para a dose 25E, e a dose 50E foi semelhante ao controle, enquanto que na SAT, as maiores eficiências foram para o controle e a dose 25E. Na CC, o menor aporte de N foi para a dose 25E (73 kg ha^{-1}) que por apresentar PG semelhante ao demais tratamentos (Figura 7C), resultou em maior EUN (Figura 8C).

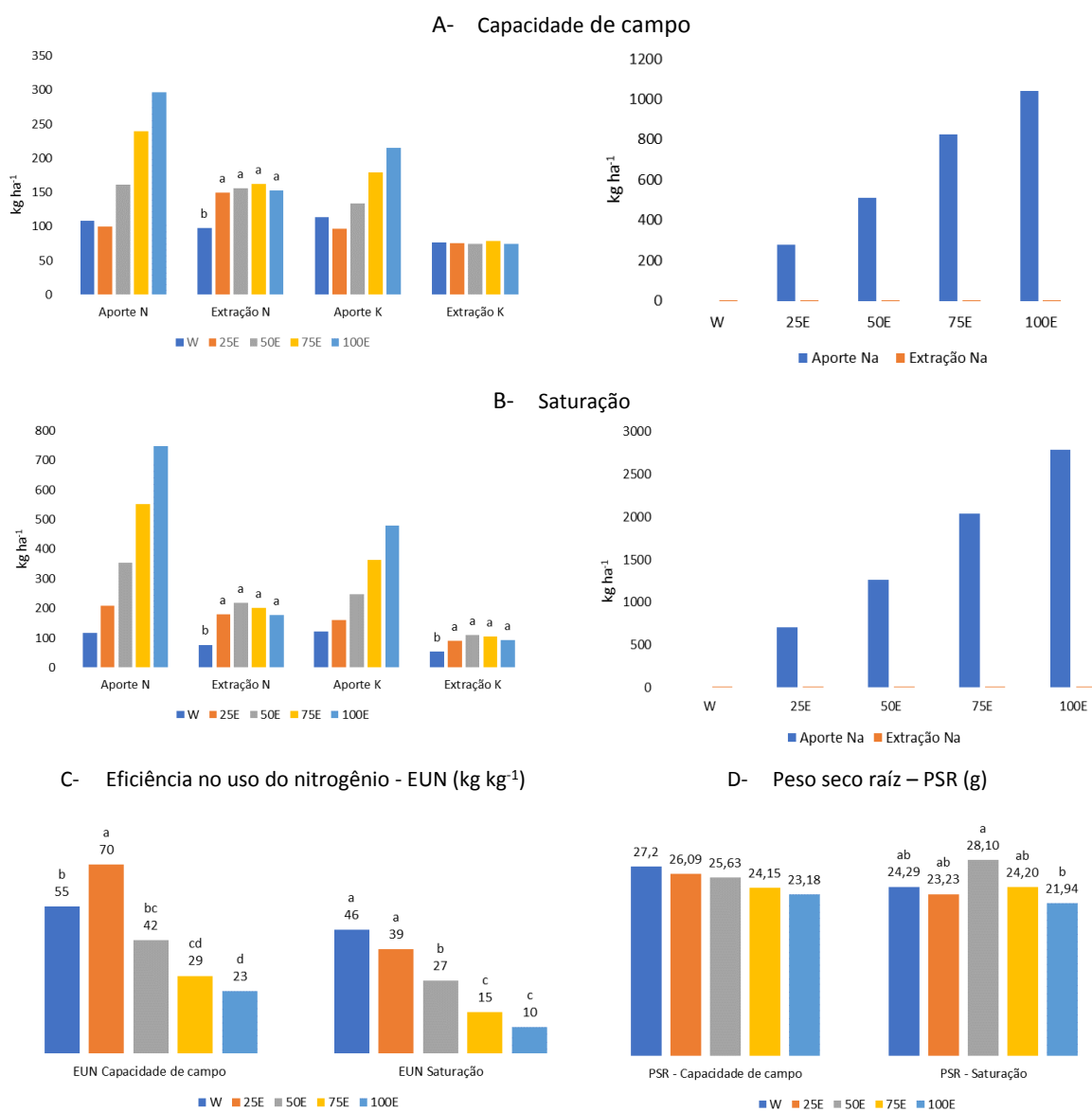


Figura 8. Aporte e extração do nitrogênio, potássio e sódio, na capacidade de campo (A) e saturação do solo (B), eficiência no uso do nitrogênio (EUN, C) e peso seco de raiz (PSR, D), em arroz fertirrigado com doses de efluente tratado de laticínio (ETL), ao final do ciclo de cultivo.

W: irrigação com 100% água; 25E: 25% ETL e 75% água; 50E: 50% ETL e 50% água; 75E: 75% ETL e 25% água; 100E: 100% ETL. Médias seguidas por letras diferentes, diferem entre si pelo teste de Tukey $p < 0,05$.

A EUN para a dose 25E na CC foi semelhante a relatada por Sidhu et al. (2019), cuja dose de N aplicada foi 120 kg ha⁻¹. No entanto, os tratamentos controles, para ambas umidades do solo, apresentaram aportes de N semelhantes aos mesmos autores, mas com EUN menores. Assim, o N fornecido pelo ETL está prontamente disponível as plantas e apresentou melhor eficiência comparado ao fertilizante sintético.

O arroz tem sido considerado uma cultura com baixa EUN (Fageria et al., 2003), devido às transformações do N nesses sistemas irrigados, por isso o manejo do N, aliado ao manejo da água tem sido bastante explorado (Feng et al., 2021; Mannan et al., 2012; Sidhu et al., 2019; Ye et al., 2013).

O manejo da umidade do solo e o sistema de irrigação localizado, adotados neste estudo, mitigaram o estresse salino, com baixa extração de sódio pelas plantas (Figuras 8AB). A irrigação diária por gotejamento tem sido associada a maior tolerância à salinidade (Nachshon & Levy, 2022), por apresentar uma zona de baixa concentração de sais perto dos emissores, fazendo com que os mesmos se concentrem nas extremidades da faixa molhada (Hanson & Bendixen, 1995), e, por manter continuamente uma zona de umidade nas camadas subsuperficiais do solo, favorecendo a dissolução dos solutos (Zamann et al., 2018).

Importante ressaltar, que este estudo foi conduzido em escala piloto, em ambiente protegido, cuja lixiviação do sódio (Figura 5) foi provocada pela lâmina de irrigação, uma vez que não sofreu influência das chuvas. No gotejamento subsuperficial, em função da profundidade de enterrio, os sais tem a tendência de aflorar para a superfície, acima dos gotejadores (Zamann et al., 2018). Uma estratégia para evitar esse acúmulo é a aplicação extra de água, acima da evapotranspiração da cultura, para fazer com que uma fração da água aplicada se movimente para baixo da zona radicular e elimine o excesso de sais (Nachshon & Levy, 2022). Dessa forma, nas condições em que o experimento foi conduzido, o aumento no período de cultivo, levou ao aumento da lâmina de irrigação aplicada, contribuindo para o processo de lixiviação dos sais (Figura 5).

A irrigação por gotejamento também tem favorecido a maior densidade de raízes no arroz, com melhora na absorção de nutrientes na zona radicular em solos não saturados, devido ao desenvolvimento das raízes em profundidade na captação de água e nutrientes (Parthasarathi et al., 2018).

Neste estudo, as doses de ETL não alteraram o peso seco das raízes (PSR) na CC, com média de 27,20 g, enquanto na saturação o maior PSR foi para a dose 50E (Figura 8D). Assim, o maior desenvolvimento radicular na dose 50E favoreceu a maior PG e EUA na umidade na saturação (Figuras 7CD). Segundo Fageria & Knupp (2013), depois da massa seca da parte aérea, a massa seca de raiz foi o parâmetro de crescimento que apresentou associação fortemente significativa com a PG.

Em ambas condições de umidade, o PSR do controle (W) foi semelhante as doses com efluente, portanto, a irrigação com ETL não comprometeu o desenvolvimento radicular. Ouoba et al. (2022) encontraram resultados semelhantes, ao irrigar arroz com efluente doméstico, e atribui tal resposta à disponibilidade de N pelo efluente, semelhante ao fertilizante sintético, reduzindo a necessidade do desenvolvimento radicular mais profundo ou amplo.

Na irrigação por gotejamento subsuperficial com a manutenção da umidade do solo na saturação, a substituição parcial (50E) da fonte de água apresentou maiores valores para a PG, a EUA e a EUN. Nesta mesma umidade, o efeito na dinâmica dos solutos no solo sugeriu risco de lixiviação de nutrientes a partir da dose de 75E. Na capacidade de campo, os maiores teores de CE e sódio na solução do solo para a dose 100E não alteraram a PG e EUA. Entretanto, a EUN e a dinâmica do nitrato na solução do solo mostraram que a dose 50E reduz o potencial do risco de lixiviação deste elemento. No entanto, em ambas as umidades do solo, a partir da dose de 50E foi observado uma economia de 100% dos fertilizantes sintéticos, como fontes de nitrogênio e potássio.

4.4. Conclusões

A irrigação por gotejamento subsuperficial em arroz do tipo especial (arbório) foi capaz de manter a produtividade dos grãos, nas duas condições de umidade do solo (capacidade de campo e saturação), embora esta cultivar tenha sido desenvolvida para o sistema inundado. Em ambas as umidades estudadas, a partir da dose de 50E foi observado uma economia de 100% dos fertilizantes sintéticos, como fonte de nitrogênio e potássio.

As doses do efluente não alteraram a eficiência do uso da água, a produtividade de grãos e o peso seco da raiz, na umidade do solo na capacidade de campo, enquanto na saturação, os mesmos parâmetros foram superiores para a dose 50% ETL.

A dinâmica dos solutos na solução do solo foi influenciada pela dose do efluente e pela umidade do solo. Nas doses acima de 50% ETL e 75% ETL para capacidade de campo e saturação, respectivamente, foram observados risco de lixiviação do nitrato e sódio, confirmando tais elementos como indicadores da necessidade de diluição, quando se considera o reúso dessas águas.

A irrigação por gotejamento subsuperficial em ambas condições de umidade favoreceu o processo de nitrificação no solo. No entanto, as doses até 50% ETL foi mais indicada, por resultar em maior eficiência no uso do nitrogênio.

A concentração do sódio no efluente de laticínio elevou os teores de sais na solução do solo, com lixiviação para a camada mais profunda analisada, o que favoreceu o desenvolvimento da cultura, resultado da baixa absorção de sódio pelas plantas.

Os nutrientes presentes no efluente tratado de laticínio, aliado ao sistema de gotejamento subsuperficial e a substituição com água, são estratégias que compensam o efeito salino dessas águas residuárias e garantem a produção dos grãos de arroz.

Referências

- Agência Nacional de Águas – ANA. (2017). Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília: ANA, 88 p.
- Aghajani Shahrivar, A., Rahman, M. M., Hagare, D., & Maheshwari, B. (2019). Variation in kikuyu grass yield in response to irrigation with secondary and advanced treated wastewaters. *Agricultural Water Management*, 222, 375–385. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.06.012>
- APHA, AWWA, WEF, (2012). Standard methods for the examination for water and wastewater. Twenty-second ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, DC, USA.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W. (1999). A qualidade da água na agricultura. Tradução de H. R. Gheyi, J. F. de Medeiros, F. A. V. Damasceno, 29 revisado 1 (FAO).
- Brasil (2011). Resolução Conama nº 430, de 16 de maio de 2011. Diário Oficial da União, Brasília.
- Che, Z., Wang, J., & Li, J. (2021). Effects of water quality, irrigation amount and nitrogen applied on soil salinity and cotton production under mulched drip irrigation in arid Northwest China. *Agricultural Water Management*, 247, 106738. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.106738>
- Chen, T., Shabala, S., Niu, Y., Chen, Z. H., Shabala, L., Meinke, H., Venkataraman, G., Pareek, A., Xu, J., & Zhou, M. (2021). Molecular mechanisms of salinity tolerance in rice. *The Crop Journal*, 9(3), 506–520. <https://doi.org/10.1016/J.CJ.2021.03.005>
- Coltro, L., Marton, L. F. M., Pilecco, F. P., Pilecco, A. C., & Mattei, L. F. (2017). Environmental profile of rice production in Southern Brazil: A comparison between irrigated and subsurface drip irrigated cropping systems. *Journal of Cleaner Production*, 153, 491–505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.207>
- Companhia De Tecnologia De Saneamento Ambiental – CETESB. (2006). Orientação para apresentação de projeto visando à aplicação de água de reúso proveniente de estação de tratamento de esgoto doméstico na agricultura. CETESB. 11.
- Crusciol, C. A. C., Fernandes, A. M., Carmeis Filho, A. C. de A., & Alvarez, R. de C. F. (2016). Macronutrient uptake and removal by upland rice cultivars with different plant architecture. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 40, 1–20. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150115>
- Donatti, R. N., Gomes, T. M., Menegassi, L. C., Tommaso, G., & Rossi, F. (2017). Sodium phytoremediation by green manure growing in soil irrigated with wastewater of dairy industry. *Engenharia Agrícola*, 37(4), 665–675. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n4p665-675/2017>
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Brasília. 353.

- Epstein, E., Bloom, A.J. (2006). Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives. 2 ed., Planta, Londrina, p. 404
- Fageria, N.K., & Baligar, V.C. (2005). Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, 88: 97–185, [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88004-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6).
- Fageria, N. K., Knupp, A. M. (2013). Upland Rice Phenology and Nutrient Uptake in Tropical Climate. *Journal of Plant Nutrition*, 36(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.724136>
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., Jones, C.A. (2011). Growth and mineral nutrition of field crops. 3. Ed. CRC Press, 590.
- Fageria, N. K., Slaton, N. A., Baligar, V. C. (2003). Nutrient Management for Improving Lowland Rice Productivity and Sustainability. *Advances in Agronomy*, 80, 63–152. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)80003-2)
- Feng, Z. Y., Qin, T., Du, X. Z., Sheng, F., & Li, C. F. (2021). Effects of irrigation regime and rice variety on greenhouse gas emissions and grain yields from paddy fields in central China. *Agricultural Water Management*, 250. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.106830>
- Ferreira, D. F. (2011). Sisvar: A computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia* 35:1039-1042.
- Guimarães, C. M., Stone, L. F., Silva, A. C. D. L. (2016). Evapotranspiration and grain yield of upland rice as affected by water deficit. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 441–446. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n5p441-446>
- Han, J., Shi, J., Zeng, L., Xu, J., & Wu, L. (2015). Effects of nitrogen fertilization on the acidity and salinity of greenhouse soils. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 22, 2976–2986. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3542-z>
- Hanson, B. R., Bendixen, W. E. (1995). Drip irrigation salinity under controls soil row crops. *California Agriculture*, 49(4), 19–23.
- IAC (Instituto Agronômico). (2005). Cultivares de arroz. <http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/graos/arroz.php> (acesso: 09 março 2021).
- Ishfaq, M., Akbar, N., Anjum, S. A., Anwar-Ijl-Haq, M. (2020). Growth, yield and water productivity of dry direct seeded rice and transplanted aromatic rice under different irrigation management regimes. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(11), 2656–2673. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62876-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62876-5)
- Kaur, V., Sharma, G., & Kirpalani, C. (2018). Agro-potentiality of dairy industry effluent on the characteristics of *Oryza sativa* L. (Paddy). *Environmental Technology & Innovation*, 12, 132–147. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2018.08.009>
- Köppen, W.; Geiger, R. (1928). Climate der Erde. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-map 150cmx200cm.
- Leal, R. M. P., Herpin, U., Fonseca, A. F. da, Firme, L. P., Montes, C. R., & Melfi, A. J. (2009). Sodidity and salinity in a Brazilian Oxisol cultivated with sugarcane irrigated with wastewater. *Agricultural Water Management*, 96(2), 307–316. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2008.08.009>

- Li, Y., Xu, J., Liu, X., Liu, B., Liu, W., Jiao, X., & Zhou, J. (2022). Win-win for monosodium glutamate industry and paddy agriculture: Replacing chemical nitrogen with liquid organic fertilizer from wastewater mitigates reactive nitrogen losses while sustaining yields. *Journal of Cleaner Production*, 347, 131287. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131287>
- Libutti, A., Gatta, G., Gagliardi, A., Vergine, P., Pollice, A., Beneduce, L., Disciglio, G., & Tarantino, E. (2018). Agro-industrial wastewater reuse for irrigation of a vegetable crop succession under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 196, 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2017.10.015>
- Mainardis, M., Cecconet, D., Moretti, A., Callegari, A., Goi, D., Freguia, S., & Capodaglio, A. G. (2022). Wastewater fertigation in agriculture: Issues and opportunities for improved water management and circular economy. *Environmental Pollution*, 296, 118755. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.118755>
- Malavolta, E., Vitti, G.C., Oliveira, S.A. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 319.
- Mannan, M., Bhuiya, M., Akhand, M., & Saman, M. (2012). Growth and Yield of Basmati and Traditional Aromatic Rice as Influenced by Water Stress and Nitrogen Level. *Journal of Science Foundation*, 10(2), 52–62. <https://doi.org/10.3329/JSF.V10I2.17958>
- Menegassi, L. C., Rossi, F., Dominical, L. D., Tommaso, G., Montes, C. R., Gomide, C. A., & Gomes, T. M. (2020). Reuse in the agro-industrial: Irrigation with treated slaughterhouse effluent in grass. *Journal of Cleaner Production*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119698>
- Musazura, W., Odindo, A. O., Tesfamariam, E. H., Hughes, J. C., & Buckley, C. A. (2019). Nitrogen and phosphorus dynamics in plants and soil fertigated with decentralised wastewater treatment effluent. *Agricultural Water Management*, 215, 55–62. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.01.005>
- Muyen, Z., Moore, G. A., & Wrigley, R. J. (2011). Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. *Agricultural Water Management*, 99(1), 33–41. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2011.07.021>
- Nachshon, U., & Levy, G. J. (2022). Soil salination processes and management. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00014-8>
- Ouoba, N., Phung, L. D., Sasaki, A., Pham, D. V., Watanabe, T. (2022). Drip fertigation with treated municipal wastewater and soil amendment with composted sewage sludge for sustainable protein-rich rice cultivation. *Environmental Technology & Innovation*, 102569. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2022.102569>
- Parthasarathi, T., Vanitha, K., Mohandass, S., & Vered, E. (2018). Evaluation of Drip Irrigation System for Water Productivity and Yield of Rice. *Agronomy Journal*, 110(6), 2378–2389. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2018.01.0002>
- Pinto, M. A. B., Parfitt, J. M. B., Timm, L. C., Faria, L. C., Concenço, G., Stumpf, L., Nörenberg, B. G. (2020). Sprinkler irrigation in lowland rice: Crop yield and its components as a function of water availability in different phenological phases. *Field Crops Research*, 248, 107714. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2020.107714>

- Poustie, A., Yang, Y., Verburg, P., Pagilla, K., Hanigan, D. (2020). Reclaimed wastewater as a viable water source for agricultural irrigation: A review of food crop growth inhibition and promotion in the context of environmental change. *Science of The Total Environment*, 739, 139756. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139756>
- Raij, B. van. (2001). Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo, 285 p.
- Raij, B. van, Cantarella, H., Quaggio, J.A., Furlani, A.M.C. (1997). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas. 285. (IAC. Boletim Técnico, 100).
- Reddi, G.H.S., Reddy, T.Y. (2006). Efficiency use of irrigation water, Kalyani Publishers, Ludhiana.
- Sánchez, B., Rasmussen, A., & Porter, J. R. (2014). Temperatures and the growth and development of maize and rice: A review. *Global Change Biology*, 20(2), 408–417. <https://doi.org/10.1111/GCB.12389>
- Sharda, R., Mahajan, G., Siag, M., Singh, A., Chauhan, B. S. (2017). Performance of drip-irrigated dry-seeded rice (*Oryza sativa* L.) in South Asia. *Paddy and Water Environment*, 15(1), 93–100. <https://doi.org/10.1007/s10333-016-0531-5>
- Shilpi, S., Seshadri, B., Sarkar, B., Bolan, N., Lamb, D., Naidu, R. (2018). Comparative values of various wastewater streams as a soil nutrient source. *Chemosphere*, 192, 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.118>
- Sidhu, H. S., Jat, M. L., Singh, Y., Sidhu, R. K., Gupta, N., Singh, P., Singh, P., Jat, H. S., & Gerard, B. (2019). Sub-surface drip fertigation with conservation agriculture in a rice-wheat system: A breakthrough for addressing water and nitrogen use efficiency. *Agricultural Water Management*, 216, 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.019>
- Silva, R. R., Siqueira, E. Q., Nogueira, I. S. (2018). Impactos ambientais de efluentes de laticínios em curso d'água na Bacia do Rio Pomba. *Eng. Sanit. Ambiental*, 23(2), 217-228. DOI: 10.1590/S1413-41522018138062
- van GENUCHTEN, M.Tn. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p.892-898.
- van GENUCHTEN, M. Th., F. J. LEIJ, S. R. YATES. (1991). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, EPA Report 600/2- 91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA-ARS, Riverside, California.
- Ye, Y., Liang, X., Chen, Y., Liu, J., Gu, J., Guo, R., & Li, L. (2013). Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use. *Field Crops Research*, 144, 212–224. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2012.12.003>
- Zain, N. A. M., Ismail, M. R., Puteh, A., Mahmood, M., & Islam, M. R. (2014). Impact of cyclic water stress on growth, physiological responses and yield of rice (*Oryza sativa* L.) grown in tropical environment. *Ciência Rural*, 44(12), 2136–2141. <https://doi.org/10.1590/0103-8478CR20131154>

- Zamann, M., Shahid, S. A., & Heng, L. (2018). Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques.
- Zhang, Z., Hu, H., Tian, F., Hu, H., Yao, X., & Zhong, R. (2014). Soil salt distribution under mulched drip irrigation in an arid area of northwestern China. *Journal of Arid Environments*, 104, 23–33. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2014.01.012>

5. IMAGENS TÉRMICAS PARA AVALIAÇÃO DE ESTRESSE EM PLANTAS DE ARROZ IRRIGADA POR GOTEJAMENTO COM EFLUENTE TRATADO DE LATICÍNIO

Resumo

Os sistemas alagados para o cultivo do arroz demandam grandes volumes de água, como alternativa, surge a substituição da fonte de água por efluentes da agroindústria e a irrigação por gotejamento. Nas duas novas condições, às plantas podem sofrer algum tipo de estresse, seja salino, hídrico e/ou nutricional, na qual o uso de imagens térmicas pode ser uma ferramenta auxiliar ao agricultor para avaliação do desenvolvimento da planta e tomada de decisão no manejo da irrigação. Neste contexto, este estudo teve como objetivo identificar condições de estresse em plantas de arroz arbóreo, por imagens termográficas, irrigadas por gotejamento subsuperficial, em diferentes doses de efluente tratado de laticínio (ETL) e umidade do solo. O experimento foi desenvolvido, em escala piloto, em condições de ambiente protegido, no campus da USP Fernando Costa, na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), Pirassununga-SP. O clima da região é considerado do tipo Cwa na classificação de Koppen e o solo foi classificado como Latossolo vermelho distrófico, textura média arenosa. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com esquema fatorial (2x4) + dois controles, com quatro repetições, sendo duas condições de umidade do solo (saturação-SAT e capacidade de campo-CC) e quatro doses de ETL: 25% ETL e 75% água, 50% ETL e 50% água, 75% ETL e 25% água e 100% ETL. Os tratamentos adotados como controles foram constituídos de irrigação com água na umidade do solo na CC e na condição de SAT. O índice *Normalized relative canopy temperature* (NRCT) foi utilizado como indicador de estresse, capturadas por meio de imagens térmica capturadas do dossel da planta, ao longo do desenvolvimento da cultura. Avaliou-se a influência do teor salino do efluente de laticínio, dado pela condutividade elétrica da solução do solo e na colheita foram avaliados a produtividade de grãos, biomassa fresca, teores de sódio e nitrogênio foliar. O NRCT foi validado como um indicador de estresse salino e nutricional em plantas de arroz irrigadas com efluente tratado de laticínio. A salinidade alterou o NRCT durante as fases de desenvolvimento do arroz, sendo a fase vegetativa a mais sensível a salinidade do efluente. Com a manutenção da umidade do solo na saturação, o NRCT apresentou correlação negativa com a biomassa fresca, produtividade de grãos e nitrogênio foliar, identificando nesta condição, estresse nutricional. Na capacidade de campo, o NRCT apresentou correlação positiva com a dose de ETL e a condutividade elétrica da solução do solo sugerindo estresse salino, embora a produtividade dos grãos e a biomassa fresca não foram alteradas pelos tratamentos.

Palavras-Chave: *Oryza sativa*; sensoriamento remoto; índices térmicos; estresse salino.

Abstract

The flooded systems for rice cultivation require large volumes of water, as an alternative, the replacement of the water source by effluents from the agroindustry and drip irrigation arises. In the two new conditions, plants may suffer some type of stress, whether saline, water and/or nutritional, in which the thermal images use can be an auxiliary tool for the farmer to evaluate plant development and decision-making in irrigation management. In this context, this study aimed to identify stress conditions in italian rice plants by thermographic images, irrigated by subsurface drip, in different doses of treated dairy effluent (TDE) and soil moisture. The experiment was carried out, on a pilot scale, under protected environment conditions, at the USP Fernando Costa campus, at the Faculty of Animal Science and Food Engineering (FZEA/USP), Pirassununga-SP. The climate of the region is considered Cwa type in Koppen classification and the soil was classified as dystrophic red latosol, sandy medium texture. The experimental design was in randomized blocks, with a factorial scheme (2x4) + two controls, with four replications, two soil moisture conditions (saturation-SAT and

field capacity -FC) and four doses of TDE: 25% TDE and 75% water, 50% TDE and 50% water, 75% TDE and 25% water and 100% TDE. The treatments adopted as controls were constituted of irrigation with water in soil moisture in FC and SAT condition. The Normalized relative canopy temperature index (NRCT) was used as a stress indicator, captured by thermal images from the plant canopy, throughout the development of the crop. The influence of the saline content of the dairy effluent was evaluated, given by the electrical conductivity of the soil solution and at harvest grain yield, fresh biomass, sodium and leaf nitrogen contents were evaluated. The NRCT was validated as an indicator of saline and nutritional stress in rice plants irrigated with TDE. Salinity altered the NRCT during the rice development phases and the vegetative phase was the most sensitive to salt salinity. With the maintenance of soil moisture in saturation, NRCT showed a negative correlation with fresh biomass, grain yield and leaf nitrogen, identifying nutritional stress in this condition. In the field capacity, the NRCT showed a positive correlation with TDE dose and the electrical conductivity of the soil solution suggesting saline stress, although grain yield and fresh biomass were not altered by the treatments.

Keywords: *Oryza sativa*; remote sensing; thermal indices; saline stress.

5.1. Introdução

As indústrias de processamento de produtos lácteos geram grande quantidade de águas residuárias (ANA, 2017), que em decorrência dos produtos fabricados e do porte do empreendimento possuem características variáveis (Elabras Veiga et al., 2022). Quando estes resíduos não são tratados e destinados da forma correta, se transformam em passivo ambiental, com potencial de poluição dos recursos hídricos (Silva et al., 2018). Uma alternativa sustentável para garantir a segurança hídrica, reduzir a descarga dos poluentes nos corpos receptores e suprir a demanda de água pelas culturas, principalmente nas estações mais secas e em regiões onde os recursos hídricos são limitados, é o reúso da água na irrigação de cultivos agrícolas.

Os efluentes provenientes dos laticínios podem conter elementos indesejáveis ao desenvolvimento da cultura, como o sódio (Donatti et al., 2017), que em excesso reduz o potencial osmótico e hídrico, quando dissolvidos na solução do solo, com redução da absorção de água e nutrientes pelas plantas (Poustie et al., 2020), além de alterar os mecanismos fisiológicos de transpiração e taxa fotossintética.

Nas condições de baixa disponibilidade hídrica, a planta tende a fechar os estômatos para evitar a perda de água, provocando o aumento da temperatura foliar, uma vez que não há dissipação de calor para o meio (Taiz & Zeiger, 2013). Nesse contexto, o uso do sensoriamento remoto, como as imagens térmicas, vem ganhando destaque no manejo agrícola para prever o estado hídrico da cultura (Khorsandi et al., 2018), uma vez que é possível o monitoramento no tempo, com grande repetibilidade e baixo custo, comparado aos métodos tradicionais (Elsayed et al., 2017).

O princípio da técnica consiste em medir a radiação infravermelha utilizada para o cálculo da distribuição espacial da temperatura do dossel da planta (Cortizo et al., 2008). Com a informação da temperatura do dossel, diversos índices vem sendo desenvolvidos e aprimorados, como é o caso

do *Crop Water Stress Index* (CWSI) (Idso et al., 1981). O índice *Normalized relative canopy temperature* (NRCT), desenvolvido por Elsayed et al. (2015), é semelhante ao CWSI, no entanto, sem a necessidade de medições adicionais, como as variáveis climáticas para determinar a temperatura de bulbo úmido e seco do ar (Idso et al., 1981).

O NRCT é calculado com base na radiação captada na faixa infravermelha real medida no dossel, assim evita-se que as frequentes mudanças das condições ambientais alterem as medidas, sendo possível avaliar o estresse, dentro da variação provocada. Em estudo com cultivares de trigo sob diferentes regimes de irrigação, o NRCT foi capaz de relacionar o status hídrico do dossel e a produtividade dos grãos (Elsayed et al., 2017), assim como em cultivares de cevada (Elsayed et al., 2015), batata (Elsayed et al., 2021) e soja (Elmetwalli et al., 2020).

Desta forma, o principal objetivo deste estudo foi avaliar o potencial da imagem térmica no monitoramento do estresse em plantas de arroz irrigadas com diferentes doses de efluente tratado de laticínio, em duas condições de umidade do solo. Os objetivos específicos foram (i) determinar o índice *Normalized relative canopy temperature* (NRCT) como indicador de estresse por meio de imagens térmicas; (ii) avaliar a influência do teor salino do efluente de laticínio, medido pela condutividade elétrica da solução do solo, no índice NRCT, na umidade do solo na capacidade de campo e saturação, durante o desenvolvimento da cultura; (iii) correlacionar o NRCT com a produtividade de grãos, biomassa fresca, teores de sódio e nitrogênio foliar e a condutividade elétrica da solução do solo.

5.2. Material e Métodos

5.2.1. Área de estudo e delineamento experimental

O experimento foi realizado em ambiente protegido, em estufa do tipo arco, com área de 210 m² no campus da USP Fernando Costa, na Faculdade Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), Pirassununga-SP (627 m a.s.l., 21°59'S e 47°25'W). O clima da região é considerado do tipo Cwa na classificação de Koppen (Koppen & Geiger, 1928).

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial (2x4) + dois controles, com quatro repetições, sendo duas condições de umidade do solo (saturação-SAT e capacidade de campo-CC) e quatro doses de efluente tratado de laticínio (ETL), sendo estas: 25% ETL e 75% água (25E); 50% ETL e 50% água (50E), 75% ETL e 25% água (75E) e 100% ETL (100E). Os tratamentos controles foram: irrigação com água na capacidade de campo (WCC) e irrigação com água na condição de saturado (WSAT).

Cada parcela experimental foi constituída por uma caixa de fibra de vidro, com área superficial de 1 m² e profundidade de 0,5 m, totalizando 40 unidades. As caixas foram compostas por sistema de drenagem, constituído por um cano de PVC perfurado, instalado no sentido longitudinal da caixa, ligado a um registro para o lado externo e coberto por manta geotêxtil, sob uma camada de brita.

A cultivar de arroz utilizada foi a IAC 301, tipo arbório, utilizada na culinária internacional, principalmente a italiana. O semeio foi realizado em linhas com espaçamento de 0,17 m entrelinhas, densidade de 50 sementes m⁻¹, sendo 4 linhas por parcela experimental. O semeio foi realizado no dia 28/04/2021 e a colheita no dia 13/10/2021, totalizando 168 dias de cultivo. A aplicação dos tratamentos foi iniciada no dia 24/05/2021.

5.2.2. Clima

O monitoramento dos valores de umidade e temperatura do ar média foi realizado por meio da leitura diária da estação meteorológica automática, marca DR1A, modelo 0111, localizada na área central da estufa. O déficit da pressão de saturação de vapor no ar (DPV, em kPa, Tabela 1) foi calculado pelo boletim da FAO Nº 56 (Allen et al., 1998).

Tabela 1. Equações para o cálculo do déficit da pressão de saturação de vapor no ar

| | | |
|---|---|-----|
| $DPV = es - ea$ | - DPV= déficit da pressão de vapor no ar (kPa) - es = pressão de saturação de vapor (kPa) - ea = pressão parcial de vapor (kPa) | (1) |
| $es = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3} \right)$ | - es = pressão de saturação de vapor (kPa) - T = temperatura (°C) | (2) |
| $ea = es \left(\frac{UR}{100} \right)$ | - ea = pressão parcial de vapor (kPa) - es = pressão de saturação de vapor (kPa) - UR= umidade relativa do ar (%) | (3) |

5.2.3. Efluente e fertirrigação

O efluente utilizado para aplicação dos tratamentos foi proveniente de um laticínio comercial localizado no município de Santa Cruz da Conceição, o qual foi tratado na Estação Experimental de Tratamento de Efluentes do Campus USP “Fernando Costa”, próximo à área de cultivo. O sistema de tratamento adotado foi do tipo biológico anaeróbio, com biomassa suspensa, com regime de operação em bateladas sequenciais, com tempo de ciclo de 48 horas.

A caracterização físico-química do efluente de laticínio foi realizada com frequência quinzenal, durante a condução do experimento, no Laboratório de Biotecnologia

Ambiental/FZEA/USP e na Central Multiusuários de Análises Ambientais/ESALQ/USP, analisados de acordo APHA (2012). Os valores de condutividade elétrica, pH, série nitrogenada (N-NTK, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, N-NO₂⁻) P-PO₄⁻, K⁺, e Na⁺ são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização química (média e desvio padrão) do efluente tratado de laticínio.

| CE (dS m ⁻¹) | pH | N-NTK (mg L ⁻¹) | N-NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹) | N-NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹) | N-NO ₂ ⁻ (mg L ⁻¹) | Na ⁺ (mg L ⁻¹) | K ⁺ (mg L ⁻¹) | P-PO ₄ ⁻ (mg L ⁻¹) |
|-----------------------------|-----------|--------------------------------|---|---|---|--|---|---|
| 1,63±0,82 | 8,39±0,30 | 101,48±23,87 | 69,39±16,55 | 0,47±0,22 | 0,07±0,10 | 270,74±85,88 | 41,48±17,14 | 8,97±2,68 |

CE: condutividade elétrica; NTK: nitrogênio total Kjeldahl

O solo utilizado para preenchimento das parcelas experimentais foi classificado como Latossolo vermelho distrófico, textura franco argilosa (EMBRAPA, 2013), obtido de barranco em área sem uso, nas proximidades da área de cultivo.

Antes da aplicação dos tratamentos foi realizada a calagem, a qual foi estimada para elevar a saturação por bases para 50% da CTC. O calcário dolomítico (PRNT=88%) foi misturado ao solo com auxílio de betoneira, no momento de preenchimento das caixas com solo. Todas as parcelas receberam adubação de plantio, via fertirrigação com bomba injetora de vazão de 5 L h⁻¹, sendo aplicados 70 kg ha⁻¹ de K₂O, 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), conforme recomendação para arroz irrigado (Rajj et al., 1997). O nitrogênio e o potássio foram parcelados em três vezes, com frequência diária, enquanto o fósforo foi aplicado em uma única dose.

A fertirrigação de cobertura foi realizada, para o fornecimento de N e K, somente nos tratamentos irrigados com água (WCC e WSAT), a partir da emergência das plantas, entre os estádios vegetativo e início do reprodutivo (Crusciol et al., 2016). Foram aplicadas as doses de 120 kg ha⁻¹ de N e 90 kg ha⁻¹ de K₂O, parcelado em quatro vezes, com frequência semanal. As fontes de fertilizantes sintéticos utilizadas foram: nitrato de cálcio (15,5% de N e 19% de Ca), nitrato de potássio (Kista - 12% de N, 43% de K₂O, 1% de S e 1% de Mg), com solubilidade de 310 g L⁻¹ e 300 g L⁻¹, respectivamente, em água a 20°C, e, ácido fosfórico (H₃PO₄).

5.2.4. Irrigação e solução do solo

O sistema de irrigação adotado foi o gotejamento subsuperficial. Cada parcela recebeu quatro linhas de tubo gotejadores, enterrados a 0,15 m de profundidade (Sidhu et al., 2019), com 1 m de comprimento cada e gotejadores espaçados entre si de 0,15 m e entre linhas de irrigação com 0,20 m. O gotejador escolhido foi do tipo integrado, não compensante de pressão, anti sifão, modelo Aires, marca Netafim, vazão 1,6 L h⁻¹ e pressão de serviço de 15 m.c.a.

Os tratamentos foram individualizados por válvulas solenóides, uma para cada tratamento, operadas por painel controlador modelo Pro-C, marca Hunter® e duas moto-bombas, uma para cada fonte de água (água e efluente). A saída de cada moto-bomba foi constituída por um filtro de disco, para retenção de sólidos, e manômetros, para controle da pressão. Cada tratamento recebeu um hidrômetro para controle do volume de água, além de regulador de pressão de 25 PSI.

O manejo da irrigação foi realizado, com base na determinação da umidade do solo, por tensiômetros instalados na parte central da parcela experimental, na profundidade de 0,20 m, em três repetições por tratamento (blocos 1, 3 e 4), com turno de rega de dois dias. Os valores de tensão obtidos pelas leituras dos tensiômetros foram transformados para umidade, pela Curva Característica de Retenção da Água no Solo (CCRAS), na profundidade de 0,20 m, confeccionada no Laboratório do Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental/Centro de Ciências Agrárias/UFSCAR. Os dados obtidos em laboratório foram ajustados pelo modelo de van Genuchten (1980), por meio do software RETC (van Genuchten et al., 1991) versão 6.00, os quais forneceram os valores de umidade adotados para a capacidade de campo ($0,45 \text{ cm cm}^{-1}$) e saturação, para definição das lâminas, em função dos tratamentos adotados.

A solução do solo foi obtida por extratores de solução instalados a 0,10 m dos tensiômetros, na profundidade de 0,20 m, com frequência semanal. Para a coleta foi realizado vácuo, por meio de uma seringa plástica de 60 mL, 24 horas antes da extração, que foi realizada também por seringa. Após as coletas, as amostras de solução foram encaminhadas para o Laboratório de Biosistemas/FZEA-USP para determinar a condutividade elétrica (CE), por condutivímetro de bancada.

5.2.5. Processamento das imagens térmicas

As imagens térmicas para determinação da temperatura do dossel foram realizadas por câmera termográfica portátil, modelo E60, marca FLIR, resolução de 320 x 240 pixels, sensibilidade térmica $< 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ e campo de visão de $25^\circ \times 19^\circ$. A emissividade da câmera foi ajustada para 0,95 (Glenn, 2012). A câmera foi posicionada perpendicularmente a parte central da parcela, com auxílio de um suporte, com 2,0 m de altura em relação ao piso da estufa, para garantir melhor enquadramento e padronização das imagens. Esse posicionamento da câmera permitiu avaliar uma área de $0,25 \text{ m}^2$ na parte central de cada parcela (Figura 1).

As coletas foram realizadas a partir dos 42 dias após o semeio (DAS), sempre no período da manhã, entre 8h00 e 10h00, com a finalidade de evitar atingir as temperaturas mais elevadas do dia.

As datas de avaliação foram: 42 DAS (fase vegetativa), 70 DAS (fase vegetativa), 112 DAS (fase reprodutiva), 138 DAS (fase de enchimento dos grãos) e 168 DAS (maturação/colheita).

O processamento das imagens térmicas foi realizado no *software FLIR Tools*, com o fornecimento dos parâmetros: emissividade, temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%), determinados no momento da captura da imagem.

Na sequência, foi utilizado o algoritmo em linguagem *Python* (Apêndice 1), para segmentação da imagem, a fim de remover o fundo que não correspondia ao material vegetativo. Para isso foi utilizado um filtro de borramento, que acentuou os contornos na imagem, para que posteriormente o fundo fosse removido, juntamente com os níveis inferiores e superiores da temperatura máxima e mínima, sendo esses a 2,5% dos extremos, deixando apenas os valores de temperatura entre 2,5% e 97,5% de cada imagem (Struthers et al., 2015). Esse método foi utilizado para remover as temperaturas mais frias e mais quentes anormais do dossel, devido ao efeito do ângulo da folha (Jones et al., 2009).

Ao final da segmentação da imagem foi determinado o valor da temperatura máxima (Tmax), mínima (Tmin) e média (Tmed) de cada imagem, em que a temperatura média foi calculada por meio da média aritmética presente na matriz de temperatura obtida com a remoção do fundo e dos extremos térmicos.

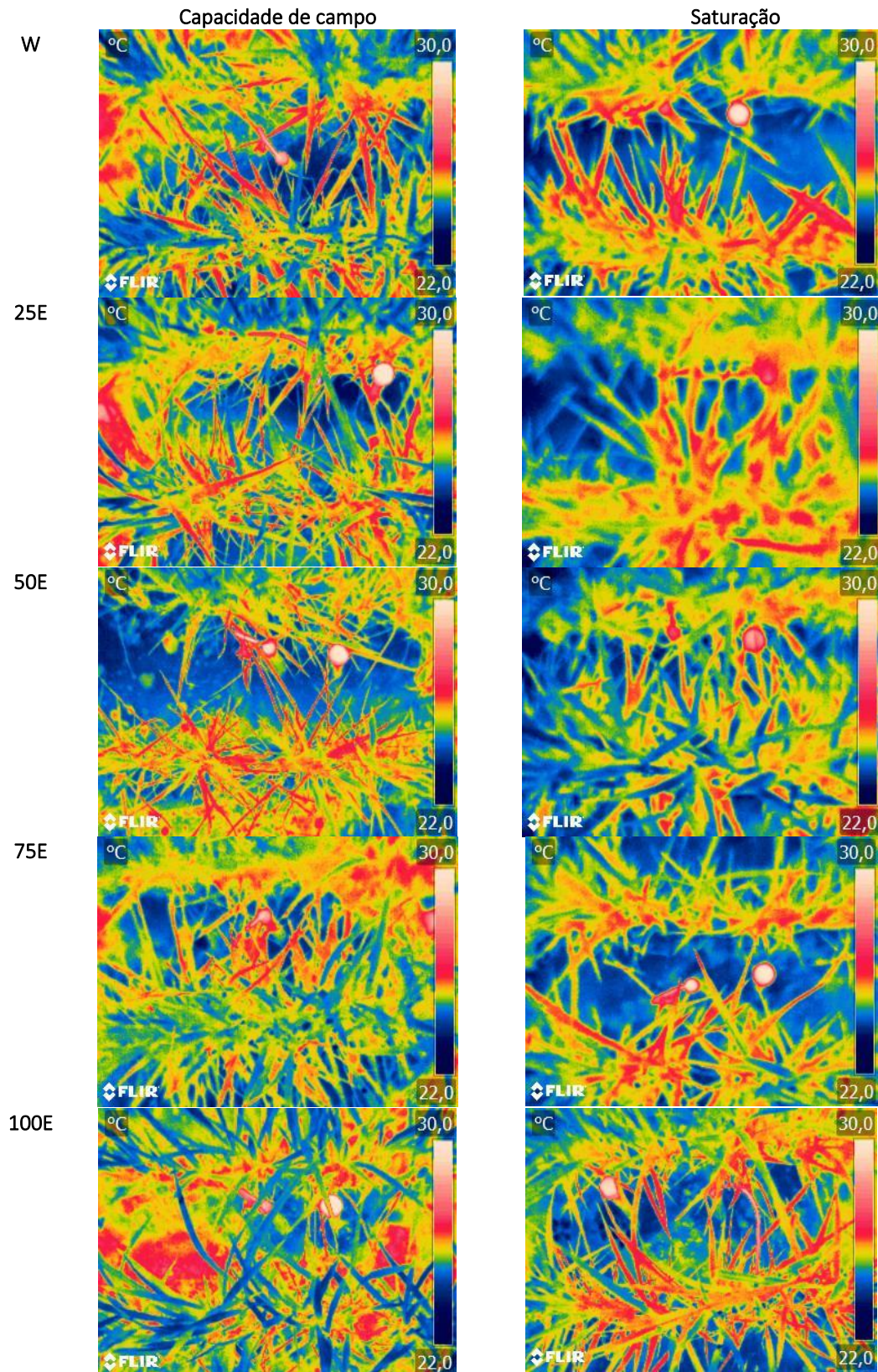


Figura 1. Imagens térmicas do arroz especial fertirrigado com efluente tratado de laticínio (ETL), aos 138 dias após sementeio.

W: irrigação com 100% água; 25E: 25% ETL e 75% água; 50E: 50% ETL e 50% água; 75E: 75% ETL e 25% água; 100E: 100% ETL.

5.2.6. *Normalized relative canopy temperature* e avaliação da cultura

Com os dados da temperatura do dossel das plantas de arroz, obtidos pelo processamento das imagens térmicas, em cada estágio de desenvolvimento da cultura, foi determinado o índice *Normalized relative canopy temperature* (NRCT), adaptado de Elsayed et al. (2015), para câmeras térmicas (Tabela 3, Equação 4). Os valores de NRCT variam entre 0 e 1, sendo o estresse mais severo quando os valores estão próximos de 1.

A avaliação da cultura foi realizada na colheita e os parâmetros analisados foram a produtividade de grãos (PG), biomassa fresca (BF), os teores de nitrogênio foliar (NF) e sódio foliar (NaF). Para a determinação da PG (Equação 5), a área considerada útil para a avaliação foram as duas linhas centrais, que totalizaram uma área de 0,5 m², sendo as duas fileiras externas consideradas bordaduras. Inicialmente, foram separadas as panículas e a folha bandeira, posteriormente a parte aérea da planta foi cortada rente ao solo, com o auxílio de uma tesoura. A biomassa fresca foi determinada em balança de precisão após a coleta de campo. A análise química foliar (folha bandeira) para o N e Na foram realizadas conforme metodologia proposta por Malavolta et al. (1997), pelo Laboratório de Ciências Agrárias/Solos da FZEA/USP.

A PG foi obtida mediante a relação dos componentes de produção (Equação 5). Para determinar os componentes de produção vinte panículas foram coletadas aleatoriamente por parcela. O número de espiguetas por panícula (NE) foi obtido por contagem, somando o número de espiguetas cheias e cochas. A fertilidade de espiguetas (FE) foi determinada através do quociente entre o número de espiguetas cheias e o NE. O número de panículas (NP) foi determinado contando as panículas na área útil da parcela, multiplicando o valor por dois e o peso de mil grãos (MG) foi determinado por meio da pesagem de 1000 grãos cheios, com teor de umidade ajustado para 13%.

Tabela 3: Equações para o cálculo do *Normalized relative canopy temperature* e produtividade de grãos.

| | | |
|--|---|-----|
| $NRCT = \frac{T_{med} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$ | <ul style="list-style-type: none"> - NRCT: <i>Normalized relative canopy temperature</i> - Tmed: temperatura média no dossel (°C) - Tmin: temperatura mínima medida em todo o experimento de campo (°C) - Tmax: temperatura máxima medida em todo o experimento de campo (°C) | (4) |
| $PG = NP * NE * FE * MG * 0,01$ | <ul style="list-style-type: none"> - PG: produtividade de grãos (kg ha⁻¹) - NP: número de panículas por m² - NE: número de espiguetas por panícula - FE: porcentagem de fertilidade de espiguetas - MG: peso de 1000 grãos (g) | (5) |

5.2.7. Análise dos dados

Na colheita os dados foram submetidos à análise da variância, nos casos em que foram constatadas diferenças significativas aos níveis de 1% ou 5% de probabilidade, procedeu-se com comparações das médias entre as doses de efluente pelo teste de Tukey, para cada condição de umidade (CC e SAT). Foi determinada a correlação de *Pearson* entre o NRCT e a dose do ETL, PG, BF, NF, NaF e CE da solução do solo, no momento da colheita. Utilizou-se a interpretação de correlação entre variáveis proposta por Callegari-Jacques (2003) (Tabela 4).

Tabela 4. Intervalo do coeficiente de correlação e interpretação

| Intervalo | Interpretação |
|-------------|------------------------|
| 0,00 – 0,30 | Fraca correlação |
| 0,31 – 0,60 | Moderada correlação |
| 0,61 – 0,90 | Forte correlação |
| 0,91 – 1,00 | Correlação muito forte |

No tempo foi realizada análise de regressão, com ajuste para o modelo linear ou quadrático, para o índice NRCT e a CE da solução do solo, para as doses de efluentes em cada condição de umidade. Quando o modelo de ajuste foi o quadrático determinou-se o valor do vértice da função, que corresponde ao ponto máximo ou mínimo, dependendo da concavidade. Para calcular o valor máximo de NRCT ao longo do ciclo, substituiu o valor do ponto máximo na função. As análises foram realizadas utilizando o software R, versão 4.1.2 (R Core Team, 2021).

5.3. Resultados e Discussão

5.3.1. Parâmetros climáticos e demanda hídrica

A variação da temperatura do ar dentro da estufa apresentou decréscimo até o mês de julho (94 DAS), com temperatura média durante o período de 20 °C (Figura 2). Após esse período, observa-se aumento da temperatura até a conclusão do experimento, com média de 26 °C. Durante a fase vegetativa, a temperatura ficou abaixo do considerado ótimo para a cultura (28,4 °C), mas acima do limite mínimo (16,4 °C), e na fase reprodutiva, a mesma ficou próxima do ótimo (24,2 °C) (Sánchez et al., 2014). O DPV apresentou a mesma tendência que a temperatura do ar, com valores abaixo de 1 kPa até o 89 DAS e máximo (2,30 kPa) no mês de setembro (\approx 145 DAS).

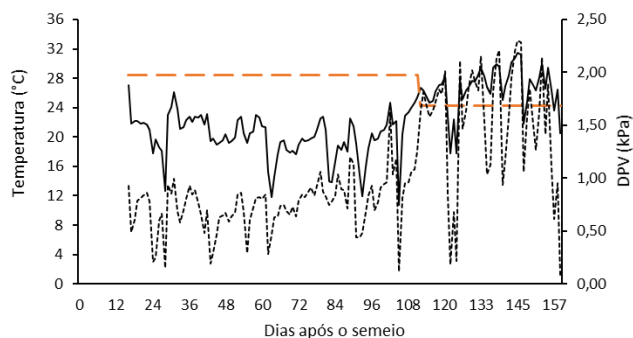


Figura 2. Média diária da temperatura do ar (linha sólida) e déficit de pressão de vapor - DPV (linha pontilhada) ao longo do ciclo de cultivo do arroz especial fertirrigado com efluente tratado de laticínio. Temperatura ótima (linha tracejada) estabelecida para a cultura arroz para a fase vegetativa e reprodutiva (Sánchez et al., 2014).

Em sistemas irrigados com efluentes salinos, a demanda de água pela cultura é variável em relação a dose de efluente (Figura 3), uma vez que os sais presentes nessas fontes de irrigação (Tabela 2) reduzem o potencial osmótico e hídrico, quando dissolvidos na solução do solo, e consequentemente, diminui a disponibilidade de água às plantas (Poustie et al., 2020).

A lâmina média de água aplicada no solo na CC foi de 565,00 mm e na saturação foi de 1.226,00 mm. Quando comparado ao controle, os tratamentos com doses de efluente apresentaram uma redução na demanda de água de 4,3% a 9,8% e 9,2% a 16%, para CC e SAT, respectivamente.

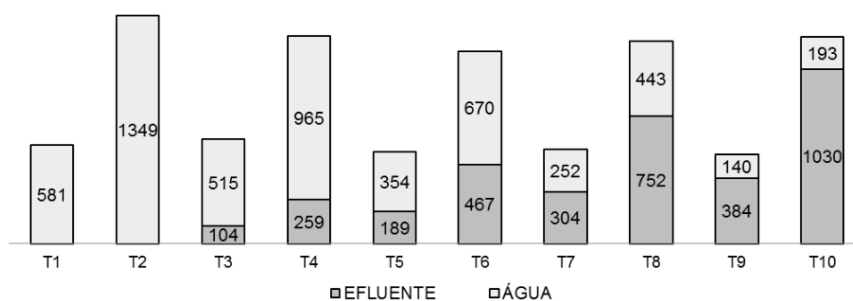


Figura 3. Lâmina de irrigação (mm) para cada tratamento.

T1 e T2 irrigados com 100% água, na capacidade de campo (CC) e saturação (SAT), respectivamente; T3 e T4 irrigados com 75% água e 25% efluente tratado de laticínio (ETL), na CC e SAT, respectivamente; T5 e T6 irrigados com 50% água e 50% ETL, na CC e SAT, respectivamente; T7 e T8 irrigados com 25% água e 75% ETL, na CC e SAT, respectivamente; T9 e T10 irrigados com 100% ETL, na CC e SAT, respectivamente.

5.3.2. Efeito das doses do efluente no NRCT e a CE da solução do solo durante o desenvolvimento da cultura, em duas condições de umidade do solo

Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros do modelo linear e quadrático do NRCT e da CE da solução do solo ao longo do tempo, bem como o valor do vértice (ponto máximo ou mínimo) do modelo quadrático. Os pontos máximos do NRCT foram observados para os controles (WCC e

WSAT) e todas as doses do ETL, indiferente da umidade do solo, exceto para as doses 50E e 75E na CC (Tabela 5).

O decréscimo da temperatura do ar durante a fase vegetativa do arroz (Figura 2), alterou o perfilamento da planta, com atraso no ciclo de cultivo. Esta fase se estendeu até os 112 dias após o semeio, período em que a cultura apresentou os maiores valores de NRCT (Figura 4).

Os menores valores de NRCT na fase de enchimento dos grãos (138 dias após semeio) e na colheita (169 dias após semeio, Figura 4) mostram que o teor de umidade do solo em ambas as condições adotadas (CC e SAT), supriu a necessidade hídrica da cultura na condição de maior DPV (Figura 2), exceto para os tratamentos controle (Figura 4A) e a dose 25E (Figura 4B) na CC, e, 100E na saturação (Figura 4E). Em condições de maior DPV, a planta aumenta a taxa de transpiração desde que haja disponibilidade de água no solo, mantendo o processo de troca de calor com o ambiente, e consequentemente, menor temperatura do dossel (Idso et al., 1981).

Tabela 5. Parâmetros das equações para o modelo linear e quadrático, da relação entre *Normalized relative canopy temperature* (NRCT) e a condutividade elétrica (CE) da solução do solo, no tempo, em arroz especial irrigado com diferentes doses de efluente, em duas condições de umidade do solo.

| | Dose ETL | Intercepto | Coeficiente angular | | Coeficiente de determinação | Vértice da função |
|----------------------------|----------|------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|
| | | | Tempo | Tempo ² | R ² | Máximo/mínimo (dias) |
| Capacidade de campo - NRCT | WCC | -0,1591 | 0,0144 | -0,00007 | 0,42* | 103 |
| | 25E | -0,0442 | 0,0103 | -0,00005 | 0,70** | 103 |
| | 50E | 0,6400 | -0,0020 | - | 0,45** | - |
| | 75E | 0,6347 | -0,0018 | - | 0,74** | - |
| | 100E | 0,3797 | 0,0056 | -0,00003 | 0,82** | 93 |
| Saturação- NRCT | WSAT | 0,5518 | 0,0026 | -0,00002 | 0,80** | 65 |
| | 25E | 0,3689 | 0,0036 | -0,00002 | 0,53* | 68 |
| | 50E | -0,1400 | 0,0142 | -0,00007 | 0,52* | 101 |
| | 75E | 0,2486 | 0,0064 | -0,00003 | 0,42* | 107 |
| | 100E | 0,3111 | 0,0061 | -0,00004 | 0,51* | 76 |
| Capacidade de campo - CE | WCC | 0,2339 | -0,0009 | - | 0,76** | - |
| | 25E | 0,2289 | -0,0019 | 0,000008 | 0,42** | 119 |
| | 50E | 0,2323 | -0,0031 | 0,000031 | 0,69** | 50 |
| | 75E | 0,3203 | -0,0038 | 0,000028 | 0,32** | 68 |
| | 100E | 0,2938 | -0,0064 | 0,000081 | 0,87* | 39 |
| Saturação- CE | WSAT | 0,2196 | -0,0006 | - | 0,48** | - |
| | 25E | 0,1136 | 0,0033 | -0,00002 | 0,40** | 83 |
| | 50E | 0,1491 | 0,0034 | - | 0,79** | - |
| | 75E | 0,1509 | 0,0050 | - | 0,72* | - |
| | 100E | 0,1356 | 0,0079 | - | 0,80** | - |

ETL: efluente tratado de laticínio. WCC E WSAT: irrigação com 100% água, na capacidade de campo (CC) e saturação (SAT), respectivamente; 25E: 25% ETL e 75% água; 50E: 50% ETL e 50% água; 75E: 75% ETL e 25% água; 100E: 100% ETL. Valor-F da análise de variância, * $<0,05$; ** $<0,01$.

O decréscimo nos valores de NRCT para as doses 50E e 75E na CC, Figura 4 C e D, respectivamente, permite inferir que a concentração de nutrientes presente no ETL, principalmente

com relação ao N (Tabela 2), reduziu o efeito da salinidade nessas condições, uma vez que o acréscimo da CE da solução do solo, ocorreu a partir dos 50 e 68 dias após o semeio (Tabela 5) e os valores máximos observados no final do ciclo foram $0,56 \text{ dS m}^{-1}$ e $0,56 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente. Entretanto, na condição de saturação ocorreu comportamento inverso, uma vez que as plantas apresentaram condição de estresse por mais tempo, com redução do NRCT após os 101 e 107 dias para 50E e 75E, respectivamente (Tabela 5) e comportamento linear da CE no tempo (Figuras 4 C e D).

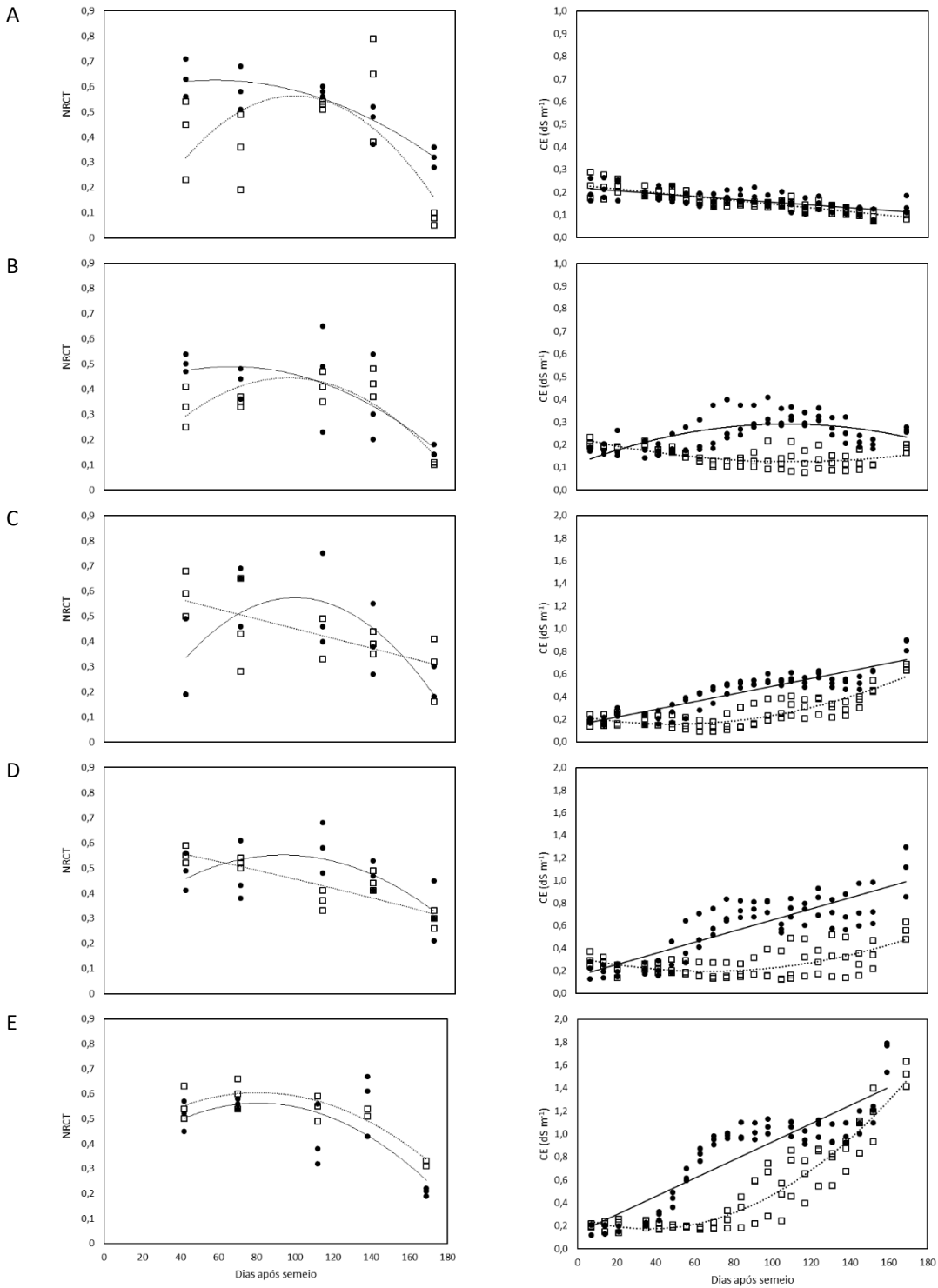


Figura 4. *Normalized relative canopy temperature* (NRCT, esquerda) e condutividade elétrica da solução do solo (CE, direita) ao longo do desenvolvimento da cultura, para cada condição de umidade (círculo e linha contínua, saturação e quadrado e linha pontilhada, capacidade de campo), para o controle (A), irrigação com 100% água, e, as doses de efluente tratado de laticínio (ETL), 25% ETL e 75% água (B); 50% ETL e 50% água (C), 75% ETL e 25% água (D) e 100% ETL (E).

O comportamento distinto do NRCT dentro de cada condição de umidade do solo, evidência a adaptação da planta em relação a disponibilidade de água e a dinâmica de sais e nutrientes na solução. Na condição de saturação, a maior lâmina de irrigação (Figura 3) proporcionou maior acúmulo de sais no solo, durante o desenvolvimento da cultura para todos os tratamentos irrigados com ETL, comparado à CC, como observado pelos valores superiores de CE da solução do solo (Figura 4).

Nas duas condições de umidade estudadas, a dose 25E apresentou comportamento semelhante ao controle para o NRCT (Tabela 5). Na CC, o aporte de N na dose 100E reduziu em 10 dias o estresse nas plantas, comparado ao controle e ao tratamento com 25E, enquanto que na saturação ocorreu o oposto, uma vez que na dose 100E o máximo valor de NRCT foi atingido aos 76 dias, período de maior CE na solução do solo, uma vez que o decréscimo da salinidade, nesta condição, ocorreu após o 83 dias de cultivo.

As plantas de arroz são capazes de tolerar a salinidade em cada fase de desenvolvimento, devido aos diferentes mecanismos genéticos, moleculares e fisiológicos (Chen et al., 2021), que leva o índice de estresse, obtido nesta pesquisa, diminuir à medida que se aproxima das fases de enchimento dos grãos e da colheita. Dentre estes mecanismos de regulação, podemos destacar a manutenção da absorção de água, com maior síntese de proteína aquaporina (Liu et al., 2013), a regulação da perda de água, com a biossíntese do ácido abscísico (Kumar et al., 2013) e o ajuste osmótico nos tecidos vegetais.

A aplicação de compostos orgânicos no solo também tende a reduzir os efeitos da salinidade e melhorar a produção (Medina Litardo et al., 2022), devido à maior síntese de compostos nitrogenados, que mantém o ajuste osmótico nas células (Reddy et al., 2017). Assim, mesmo que o ETL apresenta sais em sua composição, a presença de outros nutrientes nessas fontes de água, principalmente o N, permite a prática do reúso nos campos de arroz, desde que, o irrigante leve em consideração a capacidade de tolerância da cultura à salinidade e a concentração na fonte de água utilizada.

5.3.3. Efeito das doses do efluente no NRCT, parâmetros produtivos, foliares e na CE da solução do solo na colheita do arroz, em duas condições de umidade do solo

A Tabela 6 apresenta o índice NRCT calculado a partir das imagens térmicas, assim como, o desempenho agrônômico do arroz tipo especial (arbório), nitrogênio e sódio foliar e CE da solução do solo, para os tratamentos aplicados, por ocasião da colheita.

Quando mantida a umidade do solo na CC (Tabela 6), as doses de ETL não alteraram a produção da cultura, verificado pelos valores de PG e BF. Com relação ao NRCT, não foi observado diferença entre o controle e a dose 25E, com valores superiores nas maiores doses de efluente, entretanto, sem efeito no desenvolvimento da cultura. Os valores da CE da solução do solo e sódio foliar comprovam o efeito salino do ETL, principalmente quando aplicado sem nenhuma substituição com água (100E). Quanto aos teores de N foliar, os valores encontrados demonstram que o aporte deste elemento pelo ETL foi capaz de suprir toda a necessidade da planta, cujos valores devem ser mantidos entre 27-35 (g kg⁻¹), segundo Fageria & Knupp (2013), com uma economia de 100% do fertilizante nitrogenado sintético. Entretanto nos casos dos controles (WCC EWSAT), a adubação nitrogenada aplicada não foi suficiente para atender a demanda por este elemento.

Tabela 6. *Normalized Relative Canopy Temperature* (NRCT), parâmetros produtivos, foliares e a condutividade elétrica (CE) da solução do solo na colheita do arroz do tipo especial irrigado com efluente tratado de laticínio, em duas condições de umidade do solo.

| | Dose ETL | NRCT | PG (kg ha ⁻¹) | BF (kg ha ⁻¹) | CE (dS m ⁻¹) | NF (g kg ⁻¹) | NaF (g kg ⁻¹) |
|---------------------|----------|---------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Capacidade de Campo | W | 0,12 b | 2.117,60 | 10.406,15 | 0,10 c | 17,67 b | 0,18 ab |
| | 25E | 0,10 b | 3.349,79 | 12.814,55 | 0,18 c | 28,67 a | 0,07 b |
| | 50E | 0,36 a | 3.438,76 | 10.792,50 | 0,56 b | 29,67 a | 0,13 ab |
| | 75E | 0,30 a | 3.055,96 | 13.986,15 | 0,66 b | 29,00 a | 0,14 ab |
| | 100E | 0,32 a | 3.349,74 | 13.448,65 | 1,52 a | 27,33 a | 0,21 a |
| | C.V. (%) | 10,46** | 23,69 | 15,95 | 27,49** | 11,16** | 32,35* |
| Saturação | W | 0,32 a | 2.120,21 d | 11.053,45 b | 0,14 c | 14,00 b | 0,09 b |
| | 25E | 0,15 b | 3.830,78 ab | 16.202,35 ab | 0,27 c | 27,67 a | 0,10 b |
| | 50E | 0,22 ab | 4.449,25 a | 19.887,05 a | 0,87 b | 29,00 a | 0,10 b |
| | 75E | 0,25 ab | 3.642,56 bc | 17.1796,70 a | 1,09 b | 30,00 a | 0,18 ab |
| | 100E | 0,21 ab | 2.865,10 cd | 15.680,00 ab | 1,70 a | 31,00 a | 0,22 a |
| | C.V. (%) | 20,63* | 10,52** | 14,90** | 15,21** | 9,51** | 26,35** |

ETL: efluente tratado de laticínio; PG: produtividade de grãos; BF: biomassa fresca; CE: condutividade elétrica da solução do solo; NF: nitrogênio foliar; NaF: sódio foliar; C.V.: coeficiente de variação. W: irrigação com 100% água; 25E: 25% ETL e 75% água; 50E: 50% ETL e 50% água; 75E: 75% ETL e 25% água; 100E: 100% ETL. Valor-F da análise de variância significativo *<0,05; **<0,01.

O aumento do índice de estresse com o aumento da dose de ETL (Tabela 6) está associado a combinação entre a presença de sais no efluente e o menor teor de umidade do solo (CC), podendo causar alterações fisiológicas e bioquímicas na planta de arroz (Frukh et al., 2020), como a menor condutância estomática, resultando na elevação da temperatura foliar (Siddiqui et al., 2014).

É importante destacar que o aumento dos valores de NRCT pelo aumento da salinidade na solução do solo, nas condições deste estudo (CC) (Tabela 6), embora represente estresse às plantas de arroz, não foi suficiente para afetar a produção.

Diferente do que foi observado na capacidade de campo, na saturação, o valor de NRCT foi maior no controle, sem diferenciar das doses de ETL a partir de 50E (Tabela 6). Nessa condição de umidade, o fator estressante foi uma combinação do estado nutricional das plantas de arroz e da

salinidade do efluente, resultando em alterações na produção (PG e BF). No caso do WSAT, a adubação nitrogenada recomendada e utilizada nesta pesquisa, não foi suficiente para suprir a demanda do arroz arbório, verificado pelo valor de N foliar, resultando no maior índice de estresse observado. Quanto as doses de efluente, o aumento dos valores de NRCT está, assim como na CC, associado a salinidade e, a combinação do aporte de N e Na pelo ETL, fazendo com que a diluição favorecesse a produtividade dos grãos, pelo aproveitamento do nutriente disponível no efluente e pela redução na salinidade. Assim, na condição de umidade do solo na saturação, o aporte de N pelo ETL, reduziu o estresse nas plantas, manteve o estado nutricional da cultura e incrementou os parâmetros produtivos (PG e BF).

Os valores de CE, em ambas as condições de umidade estudadas, estão abaixo do máximo valor tolerado pela cultura do arroz ($3,3 \text{ dS m}^{-1}$) no extrato de saturação do solo, sem risco de comprometimento da produção (Ayers & Westcot, 1999). Aliado a isso, está a alta eficiência do sistema de gotejamento subsuperficial, que ao aplicar a lâmina de água próxima a raiz da cultura, melhora a absorção de nutrientes e água, e conseqüentemente a produtividade (Sidhu et al., 2019). A aplicação de forma diluída e fracionada do ETL também reduz as perdas de volatilização e lixiviação do nitrogênio, fazendo com que a eficiência de absorção deste elemento aumente (Li et al., 2022), o que aliado ao maior aporte de N pelo efluente, pode justificar os maiores valores de N foliar nas doses com ETL, comparado ao controle (WCC e WSAT).

A Figura 5 apresenta a correlação *Pearson* entre o NRCT e os parâmetros relacionados as doses de ETL, salinidade, produção da cultura e teores foliares, nas duas condições de umidade do solo. Os valores assinalados na cor azul e na cor vermelha, indicam correlação positiva e negativa, respectivamente.

Na umidade do solo na CC, o índice de estresse (NRCT) apresentou correlação positiva forte com a dose de ETL e a CE da solução do solo, enquanto, o nitrogênio foliar apresentou correlação positiva moderada. Na saturação, observou-se correlação negativa moderada entre o NRCT e a produção (PG e BF) e o nitrogênio foliar. Com esses resultados foi possível observar que o grau de estresse nas plantas de arroz teve grande influência da umidade do solo, associada a lâmina de irrigação pelo aporte de sais e nutrientes.

Na condição da CC o estresse foi mais acentuado pela salinidade da solução do solo, mas sem interferir na produtividade da cultura, enquanto na saturação, o aumento dos nutrientes, no caso o N aportado pelo ETL, nas doses diluídas, compensou a salinidade e o índice NRCT acabou sendo um indicador de deficiência nutricional, com influência na PG, demonstrado pelos resultados obtidos com o controle (WSAT).

O uso de imagens térmicas para identificação de estresse por meio do índice NRCT em plantas de arroz, sob irrigação com efluentes salinos, como o de laticínio, pode ser utilizado como

uma avaliação do status da planta quanto a salinidade e/ou estado nutricional, dependendo da umidade em que o sistema será manejado. Neste contexto, seria importante calibrar o índice para cada condição de umidade do solo, uma vez que a temperatura do dossel reflete a dinâmica da água, sais e nutrientes do solo, podendo afetar a produtividade da cultura.

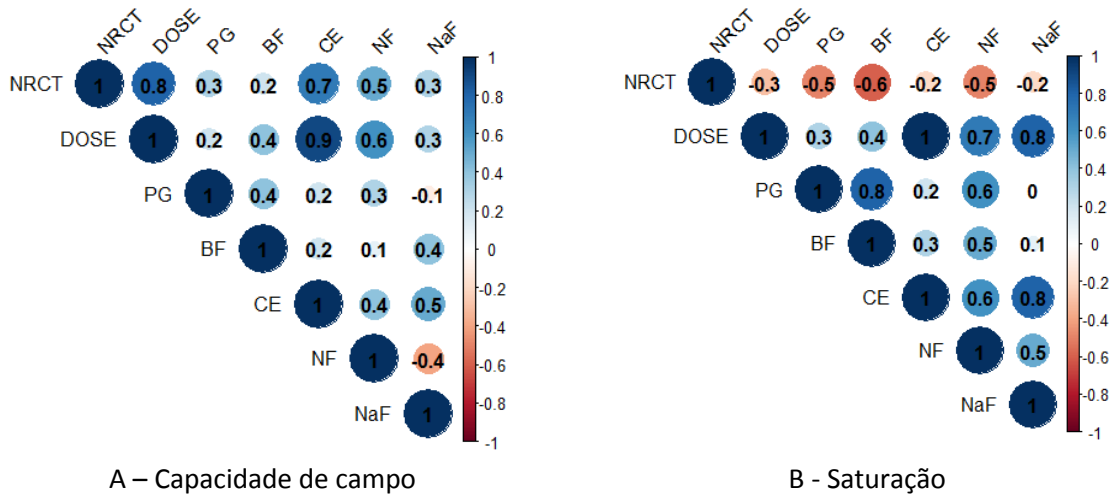


Figura 5. Correlação de *Pearson* entre o *Normalized Relative Canopy Temperature* (NRCT) e os parâmetros produtivos (biomassa fresca – BF; produtividade de grãos – PG), teores foliares (nitrogênio foliar – NF e sódio foliar – NaF), condutividade elétrica (CE) da solução do solo e a dose de efluente de laticínio, na colheita do arroz tipo especial irrigado, em duas condições de umidade do solo.

5.4. Conclusões

O índice *Normalized relative canopy temperature* (NRCT) determinado por imagens térmicas, nas condições que foi desenvolvida a pesquisa, mostrou-se como um indicador de estresse salino e nutricional do dossel de plantas de arroz.

Na umidade do solo na capacidade de campo, o índice NRCT apresentou correlação positiva com a dose de efluente de laticínio e com a condutividade elétrica da solução do solo, sugerindo estresse salino, embora não afetou a produtividade dos grãos e a biomassa. Na condição de saturação, o índice NRCT apresentou correlação negativa com a biomassa fresca, produtividade de grãos e nitrogênio foliar, ou seja, a deficiência do nitrogênio, constatada pelo teor foliar, afetou a produção, sendo o NRCT nesta condição, um indicador de estresse nutricional.

O teor salino do efluente de laticínio alterou a condutividade elétrica da solução do solo, com incremento ao longo do tempo para as maiores doses de efluente, enquanto que no controle observou-se uma redução. Nas duas condições de umidade do solo, a fase vegetativa da cultura foi a mais sensível a salinidade presente na solução do solo, adquirindo no tempo um reequilíbrio, confirmado nas fases de enchimento de grãos e colheita.

Referências

- ANA - Agência Nacional de Águas (2017). *Água na indústria: uso e coeficientes técnicos* / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 37p.
- APHA, AWWA, WEF, 2012. *Standard methods for the examination for water and wastewater*. Twenty-second ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, DC, USA.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO, Rome (Irrigation and Drainage Paper, 56)
- Ayers R.S. & Westcot D.W. (1999). *A qualidade da água na agricultura*. Tradução de Gheyi H.R., Medeiros J.F., Damasceno F.A.V. Campina Grande: UFPB. 218p.
- Callegari-Jacques SM (2003). *Bioestatística: princípios e aplicações*. Porto Alegre, Artemed. 255p.
- Chen, M., Zhang, S., Liu, L., Wu, L., & Ding, X. (2021). Combined organic amendments and mineral fertilizer application increase rice yield by improving soil structure, P availability and root growth in saline-alkaline soil. *Soil and Tillage Research*, 212, 105060. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2021.105060>
- Cortizo, E. C., Barbosa, M. P., & Souza, L. A. C. (2008). Estado da arte da termografia. *Forum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável*, 2, 158–193.
- Crusciol, C. A. C., Fernandes, A. M., Carmeis Filho, A. C. de A., & Alvarez, R. de C. F. (2016). Macronutrient uptake and removal by upland rice cultivars with different plant architecture. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 40, 1–20. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150115>
- Donatti, R. N., Gomes, T. M., Menegassi, L. C., Tommaso, G., & Rossi, F. (2017). Sodium phytoremediation by green manure growing in soil irrigated with wastewater of dairy industry. *Engenharia Agrícola*, 37(4), 665–675. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n4p665-675/2017>
- Elabras Veiga, L. B., de Souza, S. L. Q., & Vendramel, S. M. R. (2022). Environmental aspects in dairy processing. *Dairy Foods*, 311–337. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820478-8.00008-0>
- Elmetwalli, A.H.; El-Hendawy, S.; Al-Suhaibani, N.; Alotaibi, M.; Tahir, M.U.; Mubushar, M.; Hassan, W.M.; Elsayed, S. (2020). Potential of Hyperspectral and Thermal Proximal Sensing for Estimating Growth Performance and Yield of Soybean Exposed to Different Drip Irrigation Regimes Under Arid Conditions. *Sensors*, 20, 6569. <https://doi.org/10.3390/s20226569>
- Elsayed, S., Rischbeck, P., & Schmidhalter, U. (2015). Comparing the performance of active and passive reflectance sensors to assess the normalized relative canopy temperature and grain yield of drought-stressed barley cultivars. *Field Crops Research*, 177, 148–160. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2015.03.010>
- Elsayed, S., Elhoweity, M., Ibrahim, H. H., Dewir, Y. H., Migdadi, H. M., & Schmidhalter, U. (2017). Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water status and grain yield of wheat under different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 189, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.05.001>

- Elsayed S et al. (2021). Combining thermal and RGB imaging indices with multivariate and data-driven modeling to estimate the growth, water status, and yield of potato under different drip irrigation regimes. *Remote Sensing*, v. 13(9), 1679.
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA., 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Brasília. 353.
- Fageria, N. K. & Knupp, A. M. (2013). Upland Rice Phenology and Nutrient Uptake in Tropical Climate. *Journal of Plant Nutrition*, 36(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.724136>
- Frukh A, Siddiqi TO, Khan MIR, Ahmad A (2020). Modulation in growth, biochemical attributes and proteome profile of rice cultivars under salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 146: 55-70. DOI:10.1016/j.plaphy.2019.11.011
- Glenn, D. M. (2012). Infrared and Chlorophyll Fluorescence Imaging Methods for stress evaluation. *Hort. Science*, v. 47.
- Idso, S.B, Jackson, R.D., Pinter Jr., P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L. (1981). Normalizando o parâmetro estresse-grau-dia para a variabilidade ambiental. *Agrícola. Meteorol.* 24, 45-55
- Jones, H.G., Serraj, R., Loveys, B.R., Xiong, L., Wheaton A., Price A.H. (2009). Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Funct. Plant Biol.* 36, 978-989. doi.org/10.1071/FP09123
- Khorsandi, A., Hemmat, A., Mireei, S. A., Amirfattahi, R., & Ehsanzadeh, P. (2018). Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. *Agricultural Water Management*, 204, 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.012>
- Kobayashi, N. I., Yamaji, N., Yamamoto, H., Okubo, K., Ueno, H., Costa, A., Tanoi, K., Matsumura, H., Fujii-Kashino, M., Horiuchi, T., Nayef, M. al, Shabala, S., An, G., Ma, J. F., & Horie, T. (2017). OsHKT1;5 mediates Na⁺ exclusion in the vasculature to protect leaf blades and reproductive tissues from salt toxicity in rice. *The Plant Journal*, 91(4), 657–670. <https://doi.org/10.1111/TPJ.13595>
- Köppen, W.; Geiger, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.
- Kumar, K., Kumar, M., Kim, S. R., Ryu, H., & Cho, Y. G. (2013). Insights into genomics of salt stress response in rice. *Rice*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/1939-8433-6-27/FIGURES/2>
- Liu, C., Fukumoto, T., Matsumoto, T., Gena, P., Frascaria, D., Kaneko, T., Katsuhara, M., Zhong, S., Sun, X., Zhu, Y., Iwasaki, I., Ding, X., Calamita, G., & Kitagawa, Y. (2013). Aquaporin OsPIP1;1 promotes rice salt resistance and seed germination. *Plant Physiology and Biochemistry*, 63, 151–158. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2012.11.018>
- Li, Y., Xu, J., Liu, X., Liu, B., Liu, W., Jiao, X., & Zhou, J. (2022). Win-win for monosodium glutamate industry and paddy agriculture: Replacing chemical nitrogen with liquid organic fertilizer from wastewater mitigates reactive nitrogen losses while sustaining yields. *Journal of Cleaner Production*, 347, 131287. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131287>
- Malavolta, E., Vitti, G.C., Oliveira, S.A., 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 319.

- Medina Litardo, R. C., García Bendejú, S. J., Carrillo Zenteno, M. D., Pérez-Almeida, I. B., Parismoreno, L. L., & Lombeida García, E. D. (2022). Effect of mineral and organic amendments on rice growth and yield in saline soils. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21(1), 29–37. <https://doi.org/10.1016/J.JSSAS.2021.06.015>
- Poustie, A., Yang, Y., Verburg, P., Pagilla, K., & Hanigan, D. (2020). Reclaimed wastewater as a viable water source for agricultural irrigation: A review of food crop growth inhibition and promotion in the context of environmental change. *Science of The Total Environment*, 739, 139756. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139756>
- Raij, B. van. et al. (1997). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 285p. (Boletim técnico 100).
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org>
- Reddy, I. N. B. L., Kim, B. K., Yoon, I. S., Kim, K. H., & Kwon, T. R. (2017). Salt Tolerance in Rice: Focus on Mechanisms and Approaches. In *Rice Science* (Vol. 24, Issue 3, pp. 123–144). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2016.09.004>
- Sánchez, B., Rasmussen, A., & Porter, J. R. (2014). Temperatures and the growth and development of maize and rice: A review. *Global Change Biology*, 20(2), 408–417. <https://doi.org/10.1111/GCB.12389>
- Siddiqui, Z. S., Cho, J. il, Park, S. H., Kwon, T. R., Ahn, B. O., Lee, G. S., Jeong, M. J., Kim, K. W., Lee, S. K., & Park, S. C. (2014). Phenotyping of rice in salt stress environment using high-throughput infrared imaging. *Acta Botanica Croatica*, 73(1), 149–158. <https://doi.org/10.2478/botcro-2013-0027>
- Sidhu, H. S., Jat, M. L., Singh, Y., Sidhu, R. K., Gupta, N., Singh, P., Singh, P., Jat, H. S., & Gerard, B. (2019). Sub-surface drip fertigation with conservation agriculture in a rice-wheat system: A breakthrough for addressing water and nitrogen use efficiency. *Agricultural Water Management*, 216, 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.019>
- Silva, R. R., Siqueira, E. Q., Nogueira, I. S. (2018). Impactos ambientais de efluentes de laticínios em curso d'água na Bacia do Rio Pomba. *Eng. Sanit. Ambiental*, 23(2), 217-228. DOI: 10.1590/S1413-41522018138062
- Singh, D. P., & Sarkar, R. K. (2014). Distinction and characterization of salinity tolerant and sensitive rice cultivars as probed by the chlorophyll fluorescence characteristics and growth parameters. *Functional Plant Biology*, 41(7), 727–736. <https://doi.org/10.1071/FP13229>
- Struthers R., Ivanova, A., Tits, L., Swennen, R., Coppin, P. (2015). Thermal infrared imaging of the temporal variability in stomatal conductance for fruit trees. *Int. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. V. 39, p. 9-17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.006>
- van GENUCHTEN, M.Tn. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p.892-898, 1980.
- van GENUCHTEN, M. Th., F. J. LEIJ, AND S. R. YATES. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, EPA Report 600/2- 91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA-ARS, Riverside, California, 1991.

Taiz, L. & Zeiger, E. (2013). Fisiologia vegetal. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente demanda na produção de alimentos requer o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas. Neste contexto, sistemas de agricultura conservacionista, com o desenvolvimento de tecnologias e práticas de manejo, para o complexo água-solo-planta-ambiente, são urgentes para garantir a oferta de alimentos, sem o uso indiscriminado dos ecossistemas naturais.

A gestão dos recursos hídricos é um elemento chave na produção agrícola, frente a importância da água no desenvolvimento das culturas. O correto manejo desse bem, de domínio público, deve ser conduzido para evitar a escassez de água, assim como a sua deterioração, pelo excesso de substâncias contaminantes oriunda dos processos de urbanização e industrialização.

Assim, o reúso da água na irrigação dos cultivos agrícolas é uma estratégia para racionalizar e preservar os recursos hídricos, na produção de culturas agrícolas de importância mundial, como o arroz, principalmente nos países em desenvolvimento, como o Brasil, que apresentam condições insatisfatórias no tratamento dos efluentes domésticos e agroindustriais.

Neste contexto, o tratamento do efluente de laticínio por sistema anaeróbio apresenta-se como um sistema robusto e simplificado, com alta remoção de matéria orgânica. O reúso dessa fonte de água nos cultivos agrícolas, após o tratamento, faz com que os nutrientes presentes nesses resíduos, principalmente nitrogênio e fósforo, sejam utilizados pelas culturas com economia na aplicação de fertilizantes sintéticos.

Assim, esse estudo viabiliza a prática do reúso na cultura do arroz do tipo especial irrigado por gotejamento subsuperficial, com efluente tratado de laticínio na dose de 50%, como uma prática sustentável na construção de sistemas mais eficazes que as práticas convencionais. Ademais, esse estudo também propõe o monitoramento das concentrações de sódio e nitrato na solução do solo como indicadores de substituição da dose de efluente de laticínio, para evitar a lixiviação e contaminação das fontes de água subterrâneas e o uso de imagens termográficas como indicador de estresse salino e nutricional na cultura, através da determinação do índice *Normalized relative Canopy Temperature* (NRCT).

Trabalhos futuros com outras cultivares de arroz e o cultivo em campo complementarão os achados dessa pesquisa sobre a dinâmica do nitrogênio e sódio no sistema água-solo-planta, bem como o monitoramento do óxido nítrico, devido a conversão das formas de nitrogênio. O cultivo do arroz em sistema de rotação de culturas, por irrigação localizada, também permitirá obter informações e desenvolver tecnologias mais eficientes em relação ao uso e conservação do solo e da água.

Os resultados apresentados nesse trabalho são instrumento de fomento para a prática do reúso da água que ainda apresenta arcabouço legal insuficiente, frente a diversidade e complexidade nos sistemas agrícolas. Ademais, essa prática precisa ser de conhecimento público, uma vez que todos são agentes importantes neste processo.

Os profissionais envolvidos nesta área precisam de conhecimento técnico para entender a complexidade nas relações água-solo-planta-ambiente, com visão sistêmica para o sistema produtivo, considerando todos os aspectos físicos, químicos e biológicos, para assegurar que o reúso da água não seja utilizado de forma indiscriminada e que os benefícios da técnica, como a preservação dos recursos hídricos, uso múltiplo da água, ciclagem de nutrientes, redução na demanda de fertilizante sintético e oferta hídrica e regular de alimentos sejam maximizados.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Código utilizado para segmentação das imagens térmicas e o cálculo da temperatura média da área foliar através da linguagem Python.

```
import pandas as pd

import numpy as np #matrizes vetores

import cv2 #analise de imagens

import glob

local = glob.glob("")

matriz=[]

matrizmin=[]

matrizmax=[]

lista_imagens = []

indices=[]

vet_med=[]

for img in local:

    n = cv2.imread(img)

    n = cv2.cvtColor(n, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

    img_folha = n

    img_folha = cv2.GaussianBlur(img_folha,(3,3),cv2.BORDER_WRAP)

    lista_imagens.append(img_folha)

vetor_temp = pd.read_excel("")

temp_max = vetor_temp["TEMP. MAX"]

temp_min = vetor_temp["TEMP. MIN"]

for i in range(len(lista_imagens)):

    img_folha = lista_imagens[i]

    temp_max[i]

    temp_min[i]

    minimo = min(img_folha[i])

    maximo = max(img_folha[i])

    linhas, colunas = lista_imagens[i].shape

    matrizmin.append(minimo)

    matrizmax.append(maximo)

    for k in range(linhas):

        for n in range(colunas):
```

```
Temperatura = (((img_folha[[k],[n]])-(minimo))*((temp_max[i])-(temp_min[i]))/(maximo -  
minimo))+temp_min[i]  
if Temperatura > (temp_max[i])*(0.975):  
    img_folha[[k],[n]]=0  
if Temperatura < (temp_min[i])*(0.975):  
    img_folha[[k],[n]]=0  
else:  
    Temperatura = Temperatura  
    matriz.append(Temperatura)  
temp_media = np.mean(matriz)  
vet_med.append(temp_media)
```