

CIRCULAR TÉCNICA

227

Pelotas, RS
Novembro/2022

Tecnologia de Fixação Biológica de Nitrogênio na Cultura de Arroz Irrigado: Indicações de Manejo e Impacto Ambiental

Walkyria Bueno Scivittaro
Maria Laura Turino Mattos
Nathália Furtado Lucas
José Francisco da Silva Martins
Eduarda Ehlert Vasconcellos

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL



Tecnologia de Fixação Biológica de Nitrogênio na Cultura de Arroz Irrigado: Indicações de Manejo e Impacto Ambiental¹

O nitrogênio (N) é o nutriente mais limitante na maioria dos agroecossistemas, de forma que seu suprimento é fundamental para a obtenção de produtividades elevadas dos cultivos. Na agricultura convencional, comumente utilizam-se fontes minerais sintéticas para garantir o suprimento adequado de N aos solos. No entanto, os fertilizantes minerais apresentam um custo monetário e ambiental elevado (Thilakarathnal et al., 2016).

A ureia é o principal fertilizante mineral nitrogenado utilizado na agricultura. No Brasil, essa é também a mais importante fonte de N, respondendo por cerca de 60% do total de fertilizantes nitrogenados comercializados. A produção de ureia é priorizada pela indústria devido à facilidade e menor custo de produção, comparativamente às demais fontes do nutriente (Soares et al., 2015). A despeito desses aspectos favoráveis, a ureia apresenta, como característica indesejável, reação inicial alcalina no solo, que a torna suscetível a perdas de nitrogênio por volatilização de amônia (Cantarella, 2007). Visando minimizar essas perdas, muitas estratégias têm sido avaliadas (Sun et al., 2015), direcionadas à própria fonte de N, como o desenvolvimento de fertilizantes de eficiência aumentada (Isherwood, 2003), ou ao manejo da adubação de forma mais ampla, incluindo ajustes na dose, no modo, época e parcelamento da aplicação.

A fixação biológica do nitrogênio (FBN) é uma forma sustentável de aportar N às culturas, em substituição ou complementação da adubação nitrogenada mineral. Trata-se de um processo bastante eficiente no suprimento do N para leguminosas, dispensando, para algumas culturas como a soja, a aplicação de fertilizantes nitrogenados. Isto porque as bactérias que se associam simbioticamente às leguminosas têm a capacidade de fixar o N atmosférico, suprimindo a demanda das culturas (Hungria et al., 2001).

¹ Walkyria Bueno Scivittaro, engenheira-agrônoma, doutora em Ciências, pesquisadora da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS. Maria Laura Turino Mattos, engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS. Nathália Furtado Lucas, acadêmica de Engenharia Agrônoma, Universidade Federal de Pelotas, RS. José Francisco da Silva Martins, engenheiro-agrônomo, doutor em Entomologia, pesquisador da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS. Eduarda Ehlert Vasconcellos, acadêmica de Engenharia Agrônoma, Universidade Federal de Pelotas, RS.

Em gramíneas, como o arroz, a FBN é realizada por bactérias diazotróficas, que geneticamente não têm a habilidade de formar nódulos (Osório Filho et al., 2016), mas são capazes de colonizar caules e folhas, estabelecendo-se no ambiente endofítico (Osório Filho et al., 2014).

As bactérias diazotróficas possuem a capacidade de colonizar os tecidos vegetais de forma benéfica, ou seja, sem prejudicar a planta hospedeira; produzem, também, grande quantidade de auxinas (Biswas et al., 2000). Estimulam, ainda, o crescimento da parte aérea e, principalmente, do sistema radicular das plantas, resultando em aumento na absorção do N e dos demais nutrientes, razão pela qual são conhecidas como promotoras de crescimento.

Esses microrganismos benéficos podem acelerar a germinação das sementes de arroz, aumentar o rendimento de grãos (Yanni et al., 2001), aumentar a produção de matéria seca da parte aérea e conferir maior resistência das plantas a determinados patógenos (Mishra et al., 2006).

O processo de FBN associado aos microrganismos diazotróficos sofre maior influência de fatores ambientais e, portanto, não é tão eficiente quanto aquele procedido nas relações simbióticas com leguminosas. Apesar disso, a associação com bactérias diazotróficas pode ser importante para algumas culturas, como o arroz irrigado, favorecendo a absorção de nutrientes, particularmente o N. A associação com diazotróficos é capaz de suprir aproximadamente 20% das necessidades de N de culturas como o arroz e o trigo (Okon; Labandera-Gonzales, 1994).

Apesar de os diazotróficos não suprirem integralmente a demanda de nitrogênio do arroz, esses podem reduzir a demanda de nitrogênio mineral da cultura, visto que promovem aumento da eficiência do uso do N. Consequentemente, os custos de produção podem ser reduzidos, pela diminuição da demanda de fertilizantes nitrogenados minerais. De outra forma, pressupõe-se diminuição do impacto ambiental negativo associado ao uso de fontes minerais de N, pois, no processo biológico de FBN, os efeitos negativos associados a processos como lixiviação, eutrofização e emissão de gases de efeito estufa (GEE) são considerados desprezíveis.

Esta publicação reúne o relato de um conjunto de estudos e ações desenvolvidas no âmbito do projeto “Fixação biológica de nitrogênio em arroz irrigado como base a uma agricultura de baixo carbono”, cadastrado no Sistema Embrapa de Gestão – SEG sob o código 22.16.04.026.00.00, com o objetivo de subsidiar o estabelecimento de recomendações de práticas de manejo fitotécnico e fitossanitário visando otimizar a eficiência agrônômica de inoculantes de bactérias diazotróficas e o desempenho produtivo da cultura de arroz irrigado. Adicionalmente, apresenta informações relativas ao impacto ambiental da tecnologia FBN em arroz irrigado, com foco no potencial de emissão de GEE e qualidade da água de lavours de arroz que adotam a tecnologia FBN.

Material e Métodos

Os estudos/ações de pesquisa e validação que subsidiam esta publicação foram desenvolvidos entre as safras 2019/2020 e 2021/2022 e incluem estudos realizados em áreas experimentais da Estação Experimental Terras Baixas, da Embrapa Clima Temperado, e de produção comercial localizadas no município de Capão do Leão, RS.

Estudo 1. Impacto ambiental e potencial de fornecimento de nitrogênio associado ao uso de inoculante de bactérias diazotróficas na cultura de arroz irrigado

Este estudo teve por objetivo avaliar o efeito da interação entre inoculante de bactérias diazotróficas e a adubação nitrogenada mineral sobre as emissões de gases de efeito estufa e o desempenho agrônômico e produtivo da cultura do arroz irrigado nas condições de cultivo do Sul do Brasil.

O trabalho foi realizado sob condições de campo na safra agrícola 2021/2022, no Centro Tecnológico, da empresa RiceTec Sementes LTDA, em Capão do Leão, RS. O solo da área experimental é classificado como Planossolo Háplico Eutrófico típico (Cunha; Costa, 2013).

Anteriormente à implantação do experimento, procedeu-se à amostragem do solo da área experimental, na profundidade de 0-20 cm, para avaliação da fertilidade. A interpretação dos resultados da análise do solo (Tabela 1) revelou teores baixo de matéria orgânica, muito alto de fósforo (P) disponível e médio de potássio extraível (K) (Reunião..., 2018). As indicações de adubação para o arroz foram estabelecidas a partir dos resultados da análise química do solo e considerando-se uma expectativa alta de resposta da cultura do arroz à adubação (Reunião..., 2018).

Tabela 1. Resultados da análise química do solo¹ (na camada de 0-20 cm) da área experimental do Estudo 1, localizada no Centro Tecnológico da RiceTec, em Capão do Leão, RS. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

pH água	Índice SMP	M.O.	P	K	CTC _{pH 7}
		g dm ⁻³	----- mg dm ⁻³ -----		cmol _c dm ⁻³
5,8	6,7	18	64,1	82	11,8

¹Tedesco et al. (1995).

A cultivar de arroz irrigado BRS Pampa CL foi semeada em sistema convencional de preparo do solo, utilizando-se espaçamento entrelinhas de 17,5 cm e densidade de 100 kg ha⁻¹ de sementes. A adubação básica de semeadura consistiu na aplicação de 239 kg ha⁻¹ de fosfato monoamônico (MAP), de forma localizada no sulco de semeadura. No estágio de três a quatro folhas (V3-V4), completou-se a adubação do arroz com a aplicação à lanço em superfície de 120 kg ha⁻¹ de K₂O, como cloreto de potássio.

Os tratamentos, em número de seis, compreenderam: T1 - testemunha com omissão da adubação nitrogenada em cobertura e sem o uso de inoculante de bactérias diazotróficas; T2 - tratamento controle representado por 100% dose recomendada de nitrogênio para o arroz (DRN), como ureia, estabelecida de acordo com os resultados da análise química de solo e considerando-se uma expectativa alta de resposta da cultura à adubação (120 kg ha⁻¹ de N) (Reunião..., 2018); T3 - 75% DRN (90 kg ha⁻¹ de N); T4 - inoculante de bactérias diazotróficas (IBD); T5 - 100% DRN / IBD; e T6 - 75% DRN / IBD. Em função do uso de formulação fertilizante na adubação de base (10-48-

00), a quantidade de N aplicada na semeadura foi descontada da dose total aplicada nos tratamentos que previam adubação nitrogenada em cobertura. Portanto, a dose de N em cobertura correspondeu a 66,1 kg ha⁻¹ (T3 e T6) ou 96,1 kg ha⁻¹ (T2 e T5). Para as coberturas nitrogenadas, utilizou-se ureia como fonte de nitrogênio (45% de N).

Os tratamentos foram dispostos em delineamento de blocos ao acaso com seis repetições. As dimensões das parcelas experimentais foram de 3,6 m de largura, abrigando 18 linhas de plantas, por 5 m de comprimento. Essas foram isoladas por taipas, para evitar a contaminação entre os tratamentos.

A inoculação das sementes de arroz foi realizada no mesmo dia da semeadura (2 de novembro de 2021). Utilizou-se o consórcio de bactérias diazotróficas endofíticas denominado Consórcio 2. Esse inclui os acessos CMM 176 + CMM 197 + CMM 205, previamente isolados de cultivares de arroz irrigado na Estação Experimental Terra Baixas da Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS, estando preservados na Coleção de Microrganismos Multifuncionais de Clima Temperado (CMMCT) (Cadastro SisGen: A9D4105). O preparo do inoculante usado no experimento foi realizado no Laboratório de Microbiologia do Solo da Embrapa Clima Temperado, sendo o inóculo ajustado para uma concentração celular de $3,7 \times 10^8$ UFC g⁻¹ de turfa. O inoculante turfoso foi misturado com um aditivo e aplicado às sementes da cultivar BRS Pampa CL. Na sequência, procedeu-se a homogeneização até que as sementes apresentassem cobertura uniforme do inoculante turfoso, quando foram colocadas para secar em temperatura ambiente de laboratório (22°C), por 30 minutos (Mattos et al., 2020). A avaliação das sementes inoculadas revelou concentração celular de $3,8 \times 10^4$ UFC por semente.

A adubação nitrogenada em cobertura foi aplicada de forma parcelada, nos estádios de três a quatro folhas (V3-V4) e iniciação da panícula (R0). Na primeira cobertura com N, aplicaram-se 50% da dose de N prevista nos tratamentos em cobertura e na segunda, os 50% restantes. A primeira cobertura com N foi realizada em solo seco, imediatamente antes do início da irrigação do arroz por inundação do solo, e a segunda sobre uma lâmina de água não circulante. As datas das adubações nitrogenadas em cobertura foram estimadas utilizando-se o método de graus-dia (Steinmetz et al., 2007). O controle de plantas daninhas e demais tratos culturais seguiram as indicações técnicas da pesquisa para a cultura de arroz irrigado (Reunião..., 2018).

Para a avaliação das emissões de gases de efeito estufa associadas aos tratamentos de manejo do N para o arroz irrigado, nas parcelas experimentais relativas aos tratamentos T2, T5 e T6, foram distribuídos, ao acaso, três sistemas coletores de GEE do tipo câmara estática fechada (Mosier, 1989).

A coleta de amostras de ar para determinação das emissões de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) do solo foi realizada em intervalos regulares de aproximadamente sete dias, a partir do perfilhamento das plantas (V3-V4), até uma semana após a colheita do arroz. Excepcionalmente, na semana subsequente à realização das duas adubações nitrogenadas em cobertura para o arroz, a frequência de amostragem foi aumentada, reduzindo-se os intervalos entre as coletas para dois dias.

As amostragens de ar foram realizadas sempre no período da manhã, entre 9 e 12 horas, horário em que os fluxos de emissão de gases de efeito estufa são representativos das emissões médias diárias na região Sul do Brasil (Costa et al., 2008). As amostras de ar do interior das câmaras foram tomadas manualmente com auxílio de seringas de polipropileno (20 mL), nos tempos 0, 5, 10 e 20 minutos após seu fechamento. O ar no interior das câmaras foi homogeneizado durante 30 segundos anteriormente a cada amostragem, por meio de ventiladores presentes na parte superior das câmaras, e a temperatura interna foi monitorada.

As concentrações de CH_4 e N_2O nas amostras de ar foram determinadas por cromatografia gasosa, no laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Por sua vez, os fluxos de CH_4 e de N_2O do solo foram calculados pela relação linear entre a variação na concentração desses gases e o tempo de coleta. A taxa de variação de gás no interior das câmaras foi obtida pelo coeficiente angular da equação ajustada entre a concentração dos gases e o tempo. As emissões totais de CH_4 e N_2O do período foram calculadas pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores diários de emissão de CH_4 e de N_2O do solo (Gomes et al., 2009). Com base na emissão acumulada de CH_4 e de N_2O , calculou-se o potencial de aquecimento global parcial (PAG_p), que considera o potencial de aquecimento de cada gás em relação ao CO_2 (34 vezes para o CH_4 e 298 para o N_2O).

Quando as plantas encontravam-se no estágio de uma a duas folhas (V1/V2), procedeu-se a avaliação de estande de plantas, mediante a contagem do número de plantas presentes em uma área de 0,25 m² (0,50 x 0,5 m) por parcela experimental.

O nível de nitrogênio nas plantas de arroz foi avaliado por ocasião do florescimento pleno (mais de 50% das plantas no estágio R4), compreendendo a determinação das variáveis: índice relativo de clorofila (IRC) e teor de N na folha bandeira do arroz. O IRC foi obtido através de um clorofilômetro portátil, modelo SPAD-502, marca Minolta®. O aparelho mede a intensidade da coloração verde das folhas, que pode ser correlacionado com o teor de clorofila e o de N nas folhas de arroz (Peng et al., 1993). Antes de realizar as leituras, o aparelho foi calibrado de acordo com instruções do fabricante. A leitura foi realizada na folha bandeira de 10 plantas por parcela experimental e o aparelho sombreado com o corpo, para evitar a interferência da luz solar. O teor de N na folha do arroz foi determinado em amostras constituídas pela folha bandeira de 48 plantas coletadas em cada parcela experimental, utilizando-se método descrito em Freire (2001).

Na maturação de colheita da cultura de arroz, determinaram-se a estatura de planta, o número de perfilhos e de panículas, a relação panícula/perfilho, a produtividade de grãos e componentes de produtividade (número de grãos por panícula, esterilidade de espiguetas e o peso de mil grãos). Na avaliação de estatura de plantas, consideraram-se 10 plantas escolhidas ao acaso em cada parcela experimental. As variáveis número de perfilhos e de panículas foram contabilizadas em amostras constituída por duas linhas de plantas com 0,5 m de comprimento. Os dados de produtividade foram medidos em uma parcela útil constituída por cinco linhas de plantas com 4 m de comprimento. Os dados medidos foram corrigidos para 130 g kg⁻¹.

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e, quando significativa, procedeu-se a comparação de médias dos tratamentos pelo Teste de Tukey (p<0,05), utilizando-se o ambiente estatístico "R" (R Core Team, 2016).

Estudo 2. Avaliação da qualidade da água como indicador ambiental da tecnologia de fixação biológica de nitrogênio em arroz irrigado

Este estudo teve por objetivo avaliar a qualidade da água de irrigação, como indicador ambiental, em lavoura de arroz irrigado onde se utilizou a tecnologia de fixação biológica de nitrogênio (FBN).

O estudo foi realizado em um Planossolo Háplico, na Estação Experimental Terras Baixas, da Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão, RS, na safra agrícola 2020/21. A avaliação da fertilidade do solo foi realizada anteriormente à implantação do experimento, coletando-se amostra composta de solo da área experimental, na profundidade de 0-20 cm.

As amostras de água foram coletadas de parcelas experimentais cultivadas com arroz irrigado em sistema convencional de preparo. As parcelas apresentavam dimensões: 1,58 m x 5 m (8 m²), sendo individualizadas por taipas, para evitar possíveis contaminações entre os tratamentos. Os resultados da análise química do solo encontram-se na Tabela 2.

A cultivar BRS Pampa CL foi semeada na densidade de 100 kg ha⁻¹ de sementes. A irrigação do arroz, por inundação do solo, iniciou quando as plantas atingiram o estágio de três a quatro folhas (V3/V4).

Os tratamentos associaram o uso exclusivo ou combinado de fertilizante nitrogenado mineral e inoculantes de bactérias diazotróficas, sendo: T1 - testemunha com omissão da adubação nitrogenada em cobertura e sem o uso de inoculante de bactérias diazotróficas; T2 - tratamento controle representado por 100% dose recomendada de N para o arroz (DRN), como ureia, estabelecida de acordo com os resultados da análise química de solo e considerando-se uma expectativa alta de resposta da cultura à adubação (120 kg ha⁻¹ de N) (Reunião..., 2018); T3 - 110 kg ha⁻¹ de N; T4 - 110 kg ha⁻¹ de N; T5 - inoculante comercial [*Azospirillum brasilense* (estirpes Ab-V5 e Ab-V6)]; T6 - inoculante 1 (acessos CMM 174 + CMM 175 + CMM 179); T7 - inoculante 2 (acessos CMM 176 + CMM 197 + CMM 205); T8 - 90 kg ha⁻¹ de N / inoculante 1; e T9 - 90 kg ha⁻¹ de N / inoculante 2. Esses foram dispostos em delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições.

A adubação nitrogenada na base, limitada à aplicação de 20 kg ha⁻¹ de N, consistiu na aplicação das formulações 00-25-25, para o tratamento testemunha, e 05-25-25, para os tratamentos que previam adubação nitrogenada, associada ou não ao uso de inoculante de bactérias diazotróficas. Esta foi localizada no sulco de semeadura. Nas adubações em cobertura, utilizou-se ureia como fonte de N. Essas foram parceladas nos estádios de três a quatro folhas (V3/V4) e iniciação da panícula (R0). Na primeira cobertura, aplicaram-se 60% da dose de N e na segunda, os 40% restantes. A primeira cobertura foi realizada em solo seco, antes do início da irrigação por inundação do solo, e a segunda sobre uma lâmina de água não circulante. As datas das adubações nitrogenadas em cobertura foram estimadas utilizando-se o método de graus-dia (Steinmetz et al., 2007).

O inoculante comercial utilizado, marca AzoTotal® (formulação líquida) contém as estirpes Ab-V5 e Ab-V6 de *Azospirillum brasilense* na concentração de $2,0 \times 10^8$ UFC mL⁻¹, sendo que a dose aplicada foi de 150 mL por 50 kg de sementes. Os inoculantes 1 e 2, compostos com bactérias diazotróficas preservadas na Coleção de Microrganismos Multifuncionais de Clima Temperado (cadastro SisGen A9D4105, 09/08/2018), foram preparados conforme descrito em Mattos et al. (2020).

Amostras de água da lavoura de arroz irrigado foram coletadas quando as plantas se encontravam no final do ciclo biológico, especificamente no estágio R8. Estas foram coletadas em triplicata de cada parcela experimental, acondicionadas em frascos de vidro âmbar com capacidade de 1,0 L e preservadas conforme os protocolos estabelecidos no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association, 1998). Os parâmetros de qualidade da água medidos foram: condutividade elétrica, pH e turbidez. As análises foram procedidas no Laboratório de Microbiologia do Solo da Embrapa Clima Temperado.

Tabela 2. Resultados da análise química do solo¹ (na camada de 0-20 cm) da área experimental do Estudo 2, localizada na Estação Experimental Terras Baixas, em Capão do Leão, RS. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

pH água	H+Al	M.O.	Argila	P	K	Na	Al	Ca	Mg	CTC _{pH 7}	V
		--- g dm ⁻³ ---		----- mg dm ⁻³ -----				----- cmol _c dm ⁻³ -----			%
6,0	2,0	12	210	8,8	48	0,1	0,1	3,7	4,1	10,1	80

¹Tedesco et al. (1995).

Resultados e Discussão

Estudo 1. Impacto ambiental e potencial de fornecimento de nitrogênio associado ao uso de inoculante de bactérias diazotróficas na cultura de arroz irrigado

Nível de nitrogênio na planta de arroz

O manejo da adubação nitrogenada influenciou significativamente ambas as variáveis representativas do nível de nitrogênio na planta de arroz (IRC e teor de N na folha bandeira). O tratamento T2 com uso exclusivo de fertilizante mineral na dose recomendada para a cultura do arroz (120 kg ha⁻¹ de N) proporcionou maior índice relativo de clorofila (IRC) na folha; os tratamentos T3, T5 e T6, que também receberam fertilização nitrogenada mineral, seja de forma exclusiva ou combinada a inoculante de bactérias diazotróficas endofíticas, apresentaram IRC intermediários e semelhantes entre si, sendo seguidos pelos tratamentos com omissão da adubação nitrogenada e do uso de IBD (T1) ou com o uso exclusivo de IBC (T4), que apresentaram menor IRC foliar para o arroz (Tabela 3). Com relação à variável teor de N na folha bandeira do arroz, as diferenças entre os tratamentos restringiram-se àqueles com o uso exclusivo de N mineral para o arroz (T2: 100% DRN e T3: 75% DRN), que propiciaram maior teor foliar de N que T6 (75% DRN associado a IBD); os demais tratamentos apresentaram desempenho intermediário, equiparando-se

a ambos os grupos anteriores (Tabela 3). Atribuem-se as variações observadas no nível de nitrogênio no arroz ao aporte diferencial de N proporcionado pelos manejos da adubação nitrogenada praticados, envolvendo variações em fontes (mineral e inoculante de bactéria diazotróficas) e doses, bem como pelo efeito de diluição/concentração decorrentes da variação no crescimento da planta em resposta ao maior/menor suprimento de nitrogênio via adubação (Fontes, 2001).

Os resultados indicam, ainda, que, no ambiente de cultivo utilizado no presente estudo, solo com baixo teor de matéria orgânica e, portanto, com baixa capacidade de fornecimento de N para as plantas de arroz, a inoculação das sementes com bactérias diazotróficas endofíticas não foi capaz de suprir a demanda integral de nitrogênio das plantas de arroz, requerendo a associação com fonte nitrogenada mineral de forma a otimizar o nível de N na planta de arroz, contribuindo para a maximização do desempenho produtivo da cultura.

Tabela 3. Índice relativo de clorofila (IRC) e teor de nitrogênio na folha bandeira (N) do arroz 'BRS Pampa CL' no florescimento pleno, em função do uso exclusivo ou combinado de adubação nitrogenada mineral e inoculante de bactéria diazotrófica, em experimento realizado no município de Capão do Leão, RS, na safra agrícola 2021/2022. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

Tratamento	IRC	N g kg ⁻¹
T1	34,9 cd	20,7 ab
T2	40,1 a	21,7 a
T3	37,8 b	22,2 a
T4	34,3 d	19,9 ab
T5	37,4 b	18,9 ab
T6	36,1 bc	18,2 b
CV (%)	2,7	9,6

T1: testemunha com omissão da adubação nitrogenada e sem o uso de inoculante de bactéria diazotrófica (IBD); T2: 100% da dose recomendada de nitrogênio (DRN) para o arroz como ureia; T3: 75% DRN como ureia; T4: uso de IBD; T5: uso combinado de 100% DRN com IBD; e T6: uso combinado de 75% DRN com IBD.

Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

A comparação dos teores foliares de N na folha bandeira do arroz, medidos no florescimento pleno (estádio R4) (Tabela 3) com o valor mínimo (23,0 g kg⁻¹) da faixa de suficiência preconizada para o arroz irrigado (Reunião..., 2018) revela insuficiência do nutriente para a cultura. Quanto a este aspecto, é importante considerar que o referencial disponível e utilizado nesta comparação foi estabelecido para cultivares de arroz irrigado mais antigas e com características agronômicas, potencial de produtivo e, possivelmente, eficiência de uso de N distintos da cultivar BRS Pampa CL, utilizada no presente estudo, requerendo pois cautela quanto à interpretação desse resultado. Por outro lado, fica evidente a elevada demanda de nitrogênio das cultivares modernas de arroz irrigado em uso nos sistemas de produção gaúchos na atualidade, compatíveis com o elevado potencial de produtividade, requerendo, portanto, atenção especial quanto ao manejo do nutriente para a cultura.

Desempenho agrônomo e produtivo da cultura de arroz irrigado

Com relação às variáveis associadas ao desempenho agrônomo e produtivo do arroz, efeito dos tratamentos de manejo da adubação nitrogenada foi determinado, apenas, para as variáveis estande de plantas, estatura de planta e produtividade de grãos, não se determinando efeito dos tratamentos sobre as variáveis relação panícula/perfilho, número de grãos por panícula e esterilidade de espiguetas (Tabelas 4 e 5).

O aporte de nitrogênio mineral favoreceu o crescimento das plantas de arroz, de forma que os tratamentos testemunha (T1) e com uso exclusivo de inoculantes de bactérias diazotróficas (T4) apresentaram menor estatura que aqueles com o uso de N mineral, como ureia (Tabela 4).

Tabela 4. Estatura de planta (Estatura) e relação panícula/perfilho (Pan./Perf.) do arroz 'BRS Pampa CL', em função do uso exclusivo ou combinado de adubação nitrogenada mineral e inoculante de bactéria diazotrófica, em experimento realizado no município do Capão do Leão, RS, na safra agrícola 2021/2022. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

Tratamento	Estatura	Pan./Perf.
	cm	----
T1	83,1 b	1,00 ^{ns}
T2	99,2 a	0,96
T3	96,3 a	0,99
T4	85,9 b	0,99
T5	98,7 a	0,98
T6	98,0 a	0,99
CV (%)	4,5	1,9

T1: testemunha com omissão da adubação nitrogenada e sem o uso de inoculante de bactéria diazotrófica (IBD); T2: 100% da dose recomendada de nitrogênio (DRN) para o arroz como ureia; T3: 75% DRN como ureia; T4: uso de IBD; T5: uso combinado de 100% DRN com IBD; e T6: uso combinado de 75% DRN com IBD. Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Para a variável produtividade de grãos, melhor desempenho foi determinado para ambos os tratamentos com a aplicação integral da dose recomendada de N para o arroz, seja de forma isolada ou associada ao uso de inoculante de bactéria diazotrófica (T2 e T5). Este último não diferiu, também, do tratamento com uso exclusivo de 75% da DRN (T3), que apresentou desempenho intermediário, equiparando-se, também, ao tratamento T6 (75% DRN associado ao uso de IBD). Na sequência, veio o tratamento com uso exclusivo de inoculantes de bactéria diazotrófica (T4), cujo desempenho superou, apenas, a testemunha com omissão da adubação nitrogenada e sem o uso de inoculantes de bactéria diazotrófica (Tabela 5).

Tabela 5. Produtividade de grãos (Prod.), esterilidade de espiguetas (Est.), número de grãos por panícula (Grãos/Pan.) e peso de mil grãos de arroz (P1000) 'BRS Pampa CL', em função do uso exclusivo ou combinado de adubação nitrogenada mineral e inoculante de bactéria diazotrófica, em experimento realizado no município de Capão do Leão, RS, na safra agrícola 2021/2022. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

Tratamento	Prod. kg ha ⁻¹	Est. %	Grãos/Pan. ----	P1000 g
T1	10.039 e	8,9 ^{ns}	113 ^{ns}	24,73 ^{ns}
T2	13.624 a	11,0	114	24,92
T3	12.252 bc	10,5	142	24,55
T4	11.279 d	8,5	101	24,44
T5	13.061 ab	9,9	131	24,87
T6	11.962 cd	7,9	125	24,58
CV (%)	8,9	20,4	15,2	2,2

T1: testemunha com omissão da adubação nitrogenada e sem o uso de inoculante de bactéria diazotrófica (IBD); T2: 100% da dose recomendada de nitrogênio (DRN) para o arroz como ureia; T3: 75% DRN como ureia; T4: uso de IBD; T5: uso combinado de 100% DRN com IBD; e T6: uso combinado de 75% DRN com IBD.

Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Esses resultados demonstram a importância do fornecimento de nitrogênio para a otimização do desempenho produtivo do arroz irrigado em solos de baixa fertilidade, o que se explica pela elevada demanda do nutriente pela cultura, que exerce efeito preponderante na produtividade (Scivittaro; Machado, 2004). Da mesma forma, indica que o uso de inoculante de bactérias diazotróficas endofíticas contribui parcialmente para o suprimento de N para a cultura, requerendo a associação a uma fonte mineral do nutriente para o alcance do potencial produtivo da cultura.

Acrescenta-se que as produtividades de grãos atingidas no experimento foram bastante elevadas e compatíveis com o potencial elevado de produtividade da cultivar utilizada sob condições adequadas de manejo e de clima, como as observadas na safra agrícola 2021/2022.

Fluxos de N_2O e CH_4

O comportamento dos fluxos de N_2O do solo ao longo do período de cultivo do arroz foi aproximadamente semelhante para todos os tratamentos de manejo do nitrogênio avaliados, com eventual variação em magnitude, especialmente no período inicial de avaliação (Figura 1). Todos os tratamentos avaliados apresentaram pico máximo de emissão de N_2O no 6º dia após o início das avaliações (DAA), com valores correspondentes a 31.548,89; 17.319,74 e 3.125,76 mg N_2O ha⁻¹ h⁻¹, sendo o valor mais alto correspondente ao tratamento com aplicação de 75% da DRN associada ao uso de inoculante de bactérias diazotróficas endofíticas. Por outro lado, o tratamento 100% DRN/Consórcio 2 proporcionou o pico de emissão máxima de N_2O de menor magnitude, enquanto o tratamento onde se utilizou apenas fertilizante mineral (100% DRN) apresentou desempenho intermediário entre os demais (Figura 1). O pico máximo de emissão de N_2O ocorreu alguns dias após a primeira adubação nitrogenada em cobertura e a entrada da água na lavoura de arroz, sendo atribuído à recente incorporação de fertilizante nitrogenado mineral para a cultura, associada à variação no conteúdo de umidade do solo e, conseqüentemente, nas condições de oxirredução do solo, que regulam a intensidade dos processos de nitrificação e desnitrificação (Adviento-Borbe et al., 2013) e, portanto, mediam a produção de óxido nitroso no solo. Portanto, atribui-se a diferença na magnitude das emissões de N_2O entre os tratamentos à intensidade da variação da condição de umidade do solo, promovendo picos de emissão de N_2O em momentos distintos. Assim, é importante intensificar as avaliações de emissões no período subsequente às adubações nitrogenadas da cultura, a fim de caracterizar melhor as variações nos fluxos proporcionadas pelos manejos das adubações.

No restante do período de avaliação, os fluxos de N_2O de todos os tratamentos foram baixos, com valores próximos a zero, ou mesmo, negativos, fato que pode ser explicado pela estabilidade da lâmina de água da irrigação, que favorece a prevalência das condições de anaerobiose do solo, limitando os processos de nitrificação/desnitrificação, que têm o N_2O como produto intermediário (Johnson-Beebout et al., 2009).

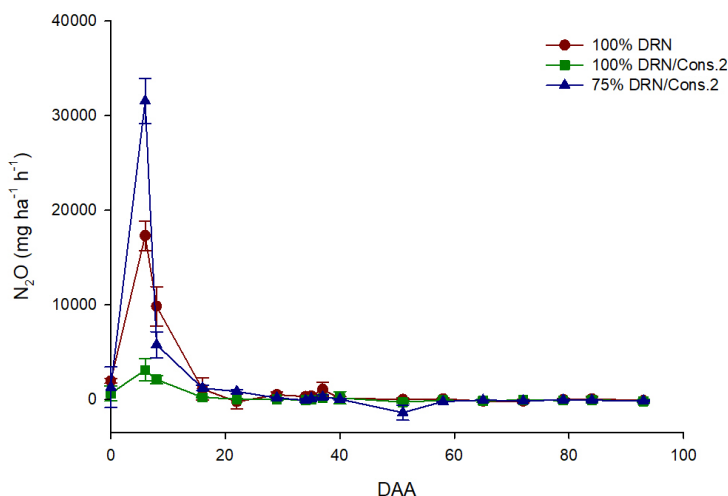


Figura 1. Fluxos de óxido nitroso (N_2O) em Planossolo, em função do uso exclusivo ou combinado de adubação nitrogenada mineral (DRN) e inoculante de bactéria diazotrófica (Cons.2) em lavoura de arroz irrigado, no município de Capão do Leão, RS, na safra agrícola 2021/2022. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

Com relação aos fluxos de CH_4 do solo, esses foram característicos do cultivo de arroz irrigado por inundação do solo, sendo inicialmente baixos e aumentando gradativamente a partir da segunda adubação nitrogenada em cobertura (Figura 2), prática que estimula o crescimento das plantas e a exsudação radicular (Reddy; Delaune, 2008). Para todos os tratamentos, o primeiro pico de emissão elevada de CH_4 ocorreu no 50º DAA, decrescendo bruscamente imediatamente após (Figura 2), possivelmente em razão de instabilidade temporária na manutenção da lâmina de irrigação para a cultura do arroz, promovendo a oxidação no solo. Sob condições anaeróbias, a produção de CH_4 é controlada pela disponibilidade de substratos de C oriundos da mineralização de matéria orgânica do solo (MOS), pela redução dos aceptores finais de elétrons (Fe^{3+} , Mn^{4+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , etc) e pela atividade metanogênica (Dalal et al., 2008). A decomposição da MO em solos alagados se dá de forma mais lenta, pois o metabolismo anaeróbico fornece menos energia aos microrganismos do que a respiração aeróbia, possibilitando, assim, maior acúmulo (Liesack et al., 2000).

Os fluxos de CH_4 do solo aumentaram novamente durante a fase reprodutiva, a partir do 58º DAA, quando as plantas apresentam maior quantidade de biomassa de raízes, propiciando maior quantidade de substratos para a atividade metanogênica (Neue, 1993). Emissões elevadas de CH_4 na fase reprodutiva do arroz resultam das condições ambientais favoráveis à atividade metanogênica (Towprayoon et al., 2005). Tais condições incluem o pH do solo próximo a 6,0, a forte condição de anaerobiose no solo sob inundação, a disponibilidade de exsudatos radiculares (Pusatjapong et al., 2003) e alta capacidade de transporte de CH_4 pelas plantas de arroz (Aulakh et al., 2000). Wassmann; Aulakh (2000) relataram, também, que a intensa atividade fotossintética das plantas de arroz nessa fase aumenta a liberação de exsudatos radiculares, disponibilizando substrato para as bactérias metanog nicas.

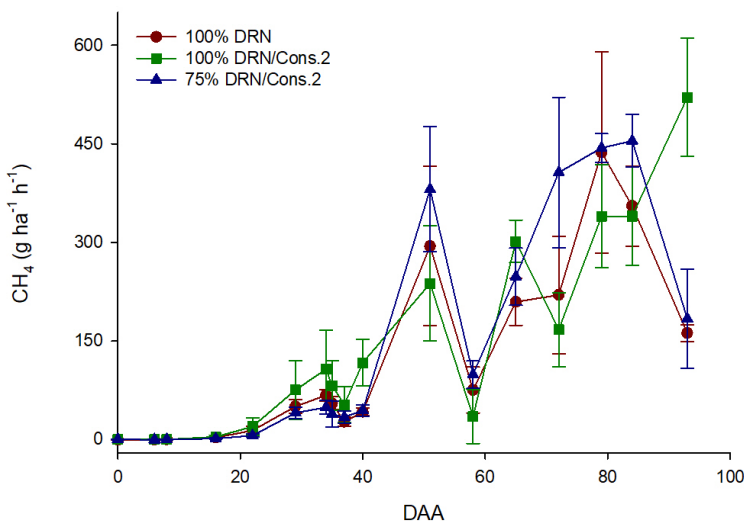


Figura 2. Fluxos de metano (CH_4) em Planossolo, em função do uso exclusivo ou combinado de adubação nitrogenada mineral (DRN) e inoculante de bactéria diazotrófica (Cons.2) em lavoura de arroz irrigado, no município de Capão do Leão, RS, na safra agrícola 2021/2022. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

O comportamento dos fluxos de CH_4 foi semelhante em todos os tratamentos avaliados, diferindo, apenas, em magnitude, sendo o pico mais elevado de emissão de CH_4 registrado no 78º DAA, período que coincide com o fim da floração e início da maturaq o dos grãos. Neste momento, as emissões de

metano totalizaram 443,77 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹ no tratamento 75% DRN/Cons. 2; 436,89 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹, para o tratamento 100% DRN, e 339,73 g CH₄ ha⁻¹ h⁻¹, para o tratamento 100% DRN/Cons. 2 (Figura 2).

Emissões sazonais de CH₄ e N₂O e PAGp

Com relação às emissões sazonais de N₂O, essas foram bastante baixas para todos os tratamentos avaliados, não alcançando 4 kg ha⁻¹ de N₂O. Em cultivos de arroz irrigado por inundação contínua, o potencial de emissões de N₂O do solo é normalmente bastante baixo, devida à estabilidade das condições de oxirredução do solo. O tratamento em que se associou 100% DRN ao uso de inoculante de bactérias diazotróficas proporcionou emissões de N₂O praticamente nula (0,6 kg N₂O ha⁻¹), sendo inferior aos demais tratamentos (3,3 e 3,8 kg N₂O ha⁻¹), que não diferiram entre si (Figura 3).

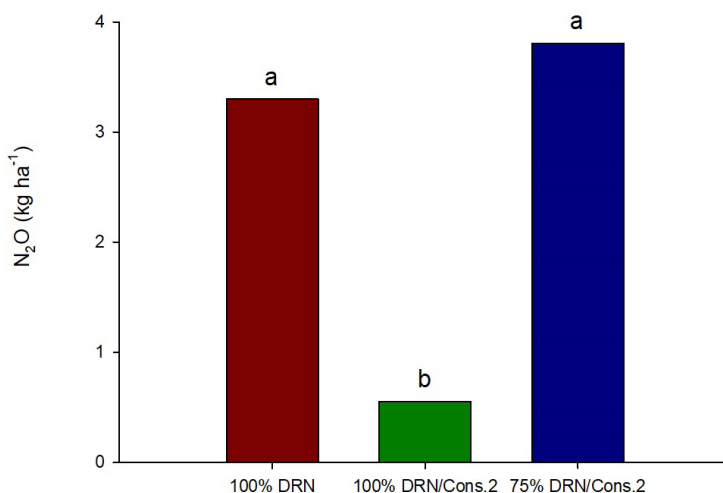


Figura 3. Emissões sazonais de óxido nitroso (N₂O) em Planossolo, em função do uso exclusivo ou combinado de adubação nitrogenada mineral (DRN) e inoculante de bactéria diazotrófica (Cons.2) em lavoura de arroz irrigado, no município de Capão do Leão, RS, na safra agrícola 2021/2022. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

Com relação às emissões totais de CH_4 , não houve diferença entre os tratamentos de manejo do N para o arroz. Os totais medidos corresponderam a 390,4 kg CH_4 ha⁻¹, para o tratamento 75% DRN/Cons. 2; 346,4 kg CH_4 ha⁻¹, para o tratamento 100% DRN/Cons. 2 e 313,9 kg CH_4 ha⁻¹, para o tratamento com 100% DRN (Figura 4).

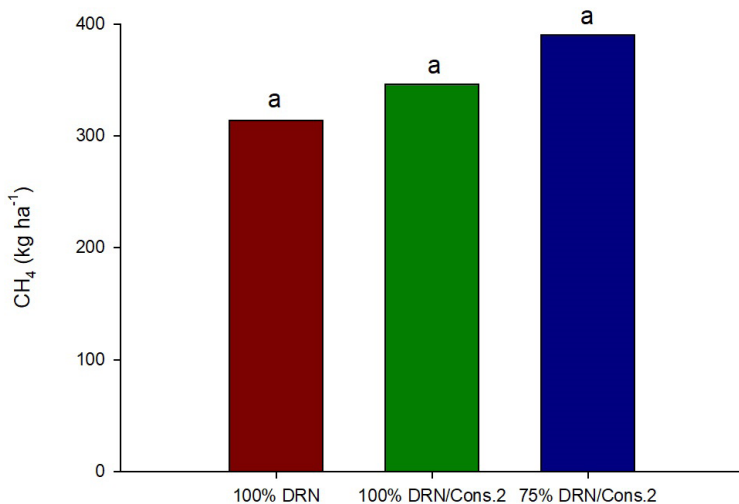


Figura 4. Emissão total de CH_4 em Planossolo, em função do uso exclusivo ou combinado de adubação nitrogenada mineral (DRN) e inoculante de bactéria diazotrófica (Cons.2) em lavoura de arroz irrigado, no município de Capão do Leão, RS, na safra agrícola 2021/2022. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

Independentemente do tratamento, o metano foi o principal componente do Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) da cultura do arroz, correspondendo a mais de 90% do total. Os valores de PAGp não variaram entre os tratamentos de manejo do N para o arroz. O valor do PAGp do tratamento 75% DRN/Cons. 2 foi de 14.408,26 kg CO_2 eq. ha⁻¹, sendo 17% e 19% maior que o PAGp dos tratamentos 100% DRN/Cons. 2 e 100% DRN, respectivamente (Figura 5).

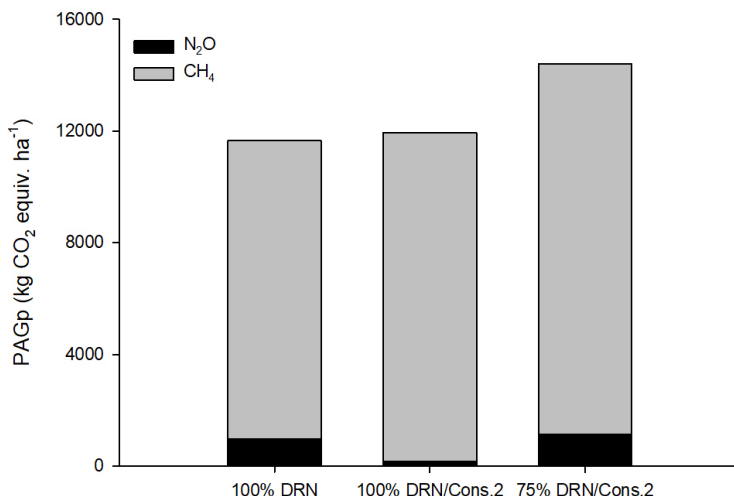


Figura 5. Potencial de aquecimento global parcial (PAGp) de Planossolo, em função do uso exclusivo ou combinado de adubação nitrogenada mineral (DRN) e inoculante de bactéria diazotrófica (Cons.2) em lavoura de arroz irrigado, no município de Capão do Leão, RS, na safra agrícola 2021/2022. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, 2022.

Estudo 2: Avaliação da qualidade da água como indicador ambiental da tecnologia de fixação biológica de nitrogênio em arroz irrigado

Atributos físicos de qualidade da água da lavoura de arroz

Na Tabela 6 são apresentados dados de atributos físicos da água da lavoura de arroz. Os dados médios oriundos de coleta de amostras em triplicata no campo e em laboratório foram interpretados conforme os padrões estabelecidos pela resolução n° 357 de 2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), para o enquadramento de águas na “Classe 3” (irrigação de cerealíferas). Nesta classe, o padrão de qualidade de água para a turbidez é até 100 UNT (unidade nefelométrica de turbidez) e para o pH deve variar entre 6 e 9.

Tabela 6. Condutividade elétrica, pH e turbidez da água de lavou-
ra de arroz irrigado 'BRS Pampa CL', em função do uso exclusi-
vo ou combinado de adubação nitrogenada mineral e inoculante
de bactéria diazotrófica. Embrapa Clima Temperado, Capão do
Leão, RS. Safra agrícola 2021/2022.

Tratamento	Condutividade elétrica	pH	Turbidez
	$\mu\text{S/cm}$		UNT
T1	61,23	7,24	4,55
T2	64,47	6,73	4,74
T3	64,97	6,80	3,03
T4	62,03	6,66	5,82
T5	64,90	6,61	6,69
T6	76,73	6,61	4,71
T7	75,03	6,71	5,87
T8	69,33	6,77	2,57
T9	68,73	6,56	7,81
C.V. (%)	1,54	0,76	6,14

T1 - testemunha com omissão da adubação nitrogenada e sem o uso de inoculante de bac-
téria diazotrófica (IBD); T2 - 120 kg ha⁻¹ de N; T3 - 110 kg ha⁻¹ de N; T4 - 90 kg ha⁻¹ de N; T5
- *Azospirillum brasilense*; T6 - inoculante 1 (acessos CMM 174 + CMM 175 + CMM 179); T7
- inoculante 2 (acessos CMM 176 + CMM 197 + CMM 205); T8 - 90 kg de N ha⁻¹ / inoculante
1 (acessos CMM 174 + CMM 175 + CMM 179); T9 - 90 kg de N ha⁻¹ / inoculante 2 (acessos
CMM 176 + CMM 197 + CMM 205).

Independentemente do tratamento, a concentração de sais na água das par-
celas experimentais, expressa pelo parâmetro condutividade elétrica, não
atingiu valores restritivos ao desenvolvimento da cultura do arroz (Tabela
6), que deve ser inferior a 2000 $\mu\text{S/cm}$, condição em que se preconiza a
suspensão da irrigação para evitar prejuízos à produtividade do arrozal
(Sociedade..., 2007). A baixa condutividade elétrica da água de um arrozal
é indicativo de baixos teores de nutrientes, como cálcio, magnésio, potássio
e nitrogênio, dissolvidos na água (Mundstock, 2015), demonstrando baixo
residual na água e, portanto, minimizando eventuais riscos de contaminação
de mananciais hídricos associados à drenagem.

Quanto ao pH, esse parâmetro manteve-se conforme os valores de referência (Brasil, 2005) e próximos à neutralidade (7,0) em todos os tratamentos, destacando-se o valor de 7,24, medido no tratamento testemunha com ausência de uso de fertilização mineral e de inoculante (Tabela 6). Ressalta-se que, durante o alagamento do solo, duas forças que atuam em sentidos opostos definem o pH do solo: a redução do solo eleva o pH e o acúmulo de CO_2 tende a diminuí-lo, sendo que os dois efeitos se anulam e o pH entra em equilíbrio (Vahl; Souza, 2004). Dessa forma, mudanças na atividade bioquímica do solo inundado associadas aos efeitos dos inoculantes, não se refletiram em alterações na acidez ativa do solo.

O parâmetro turbidez apresentou valores de UNT inferiores ao limite máximo permitido em água de drenagem, conforme Resolução 357/2005 do Conama (Brasil, 2005) (Tabela 5), mostrando baixa possibilidade que a água de irrigação do arroz carregue particulados diversos, como silte, argila, matéria orgânica e resíduos, quando da drenagem da lavoura. Ademais, a turbidez da água nas lavouras de arroz irrigado tende a diminuir à medida que ocorre o desenvolvimento da planta (Molozzi et al., 2006), decorrente da estabilização da lâmina de água no sistema convencional de cultivo de arroz.

Considerações e recomendações técnicas relativas aos resultados dos Estudos 1 e 2

A tecnologia de FBN em arroz irrigado é relativamente recente. Nos últimos anos vem sendo objeto de pesquisas de diferentes naturezas, visando a avaliação de sua eficiência agrônômica, efeito sobre o desempenho agrônômico e produtivo da cultura do arroz irrigado, estabelecimento de recomendações para uso e, também, a mensuração de seu impacto ambiental.

Considerando-se a importância do cereal para a economia do Rio Grande do Sul e do País e segurança alimentar nacional, tornam-se necessários ajustes no manejo fitotécnico e fitossanitário da lavoura, visando potencializar a eficácia dos inoculantes, a produtividade da cultura e minimizar eventuais impactos ambientais negativos da tecnologia.

Nesse sentido, resultados gerados pelo projeto 'Fixação biológica de nitrogênio em arroz irrigado como base a uma agricultura de baixo carbono' demonstraram potencial de uso de inoculantes de bactérias diazotróficas endofíticas, em associação à adubação nitrogenada mineral, para otimizar o desempenho produtivo da cultura. O uso de inoculantes específicos, isolados de cultivares de arroz irrigado, pode substituir parcialmente a adubação nitrogenada mineral para cultura, obedecendo-se a um limite máximo de 25% da dose recomendada de nitrogênio para a cultura. Esta recomendação é direcionada a cultivares com elevada eficiência de uso do nitrogênio, como 'BRS Pampa CL'. Com esse respeito, é importante enfatizar a necessidade de associar a adoção da tecnologia de FBN à adequação de demais fatores determinantes da produtividade da cultura do arroz, incluindo condições climáticas e de solo, época de semeadura, equilíbrio nutricional, manejo da água e manejo fitossanitário.

Outro aspecto a ser observado refere-se à compatibilização do uso de inoculantes de bactérias diazotróficas endofíticas com o manejo fitossanitário da lavoura, particularmente o uso de agrotóxicos com aplicação direta no solo e, principalmente em tratamentos de sementes. Nesse sentido, reforça-se a indicação de produtos menos impactantes, evitando prejuízos à eficiência do inoculante.

Sempre que possível, evitar usar o inoculante associado a outros produtos para garantir maior eficácia da inoculação. Em situações em que tal condição não possa ser atendida, uma opção recomendável é o emprego da tecnologia de inoculação no sulco de semeadura. A associação de agrotóxicos diretamente às sementes, quando necessária, deve ser compatibilizada à prática de inoculação, visando maximizar o número de células viáveis nas sementes por ocasião da semeadura.

Quanto ao impacto ambiental, o uso da tecnologia de FBN em substituição parcial à adubação nitrogenada mineral para o arroz irrigado apresenta potencial mitigador de emissões de N_2O para a atmosfera, embora não atenuie significativamente o potencial de aquecimento global do cultivo de arroz, pelo fato deste estar fortemente associado às emissões de CH_4 . A tecnologia FBN não interfere, também, na qualidade físico-química da água da lavoura.

Adicionalmente, a possibilidade de redução na necessidade de aporte de nitrogênio mineral via adubação também contribui para minimizar os riscos de contaminação de recursos hídricos e de perdas gasosas na forma de N_2O , reduzindo, ainda, os custos de produção.

Em síntese, os resultados disponibilizados demonstram viabilidade da tecnologia FBN para o arroz irrigado, contribuindo para uma agricultura de baixo de carbono nas terras baixas do RS, não comprometendo o meio ambiente. Trata-se de um insumo de baixo custo com efeito agrônômico e isento de impacto ambiental negativo, podendo contribuir para o enfrentamento à atual crise de abastecimento de fertilizantes nitrogenados minerais.

Conclusões

- O uso combinado de fertilizante nitrogenado mineral e de inoculante de bactérias diazotróficas endofíticas otimiza o desempenho produtivo do arroz irrigado 'BRS Pampa CL'.
- A substituição parcial da fertilização nitrogenada mineral pelo uso de inoculante de bactérias diazotróficas endofíticas reduz as emissões de N_2O associadas ao cultivo de arroz irrigado, embora não influencie o potencial de aquecimento global da cultura, dado que esse é composto preponderantemente por CH_4 , cujas emissões mantiveram-se invariáveis independentemente do manejo da adubação nitrogenada.
- A tecnologia de fixação biológica de nitrogênio em arroz irrigado, contemplando o uso de inoculantes com bactérias diazotróficas, não altera a qualidade físico-química da água da lavoura de arroz, comparativamente à água utilizada para irrigação do arroz, originada do manancial hídrico.
- A atividade bioquímica do solo inundado, associada ao uso de inoculantes com bactérias diazotróficas, mantém inalterada a acidez da água de irrigação da lavoura.

Referências

ADVIENTO-BORBE, M. A.; PITTELKOW, C.; ANDERS, M.; van KESSEL, K.; HILL, J. E.; McLUNG, A. M.; SIX, J.; LINQUIST, B. A. Optimal fertilizer nitrogen rates and yield-scaled global warming potential in drill seeded rice. **Journal of environmental quality**, v. 42, n. 6, p. 1623-1634, 2013.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20. ed. Washington: APHA, 1998.

BISWAS, J. C.; LADHA, J. K.; DAZZO, F. B.; YANNI, Y. G.; ROLFE, B. G. Rhizobial inoculation influences seedling vigor and yield of rice. **Agronomy Journal**, v. 92, n. 5, p. 880-886, 2000.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58-63. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747>. Acesso em: 24 ago. 2022.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, F. N. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

COSTA, F. de S.; BAYER, C.; LIMA, M. A. de; FRIGHETTO, R. T. S.; MACEDO, V. R. M.; MARCOLIN, E. Variação diária da emissão de metano em solo cultivado com arroz irrigado no Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 38, p. 2049-2053, 2008.

CUNHA, N. G. da; COSTA, F. A. da. **Solos da Estação Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2013. 6 p. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 152).

FONTES, P. C. R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 122 p.

GOMES, J.; BAYER, C.; COSTA, F. de S.; PICCOLO, M. de C.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F. C. B.; SIX, J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops based rotations under subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, v. 106, p. 36-44, 2009.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2001. 48 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 35; Embrapa Cerrados. Circular Técnica, 13).

ISHERWOOD, K. F. **Mineral fertilizer use and the environment**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2003. 63 p. Disponível em: <http://www.anda.org.br/portug>. Acesso em: 29 maio 2005.

JOHNSON-BEEBOUT, S. E.; ANGELES, O.; ALBERTO, M. C. R.; BURESH, R. J. Simultaneous minimization of nitrous oxide and methane emission from rice paddy soils is improbable due to redox potential changes with depth in a greenhouse experiment without plants. **Geoderma**, v. 149, p. 45-53, 2009.

MATTOS, M. L. T.; SCIVITTARO, W. B.; VALGAS, R. A.; MELO, I. S. de; HUNGRIA, M. **Eficiência agrônômica de bactérias endofíticas diazotróficas para a fixação de nitrogênio e promoção do crescimento de arroz irrigado cultivado em terras baixas**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2020. 13 p. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 210).

MISHRA, R. P. N.; SINGH, R. K.; JAISWAL, H. K.; KUMAR, V.; MAURYA, S. Rhizobium-mediated induction of phenolics and plant growth promotion in rice (*Oryza sativa* L.). **Current Microbiology**, v. 52, n. 5, p. 383-389, 2006.

MOLOZZI, J.; PINHEIRO, A.; SILVA, M. R. da. Qualidade da água em diferente estádios de desenvolvimento do arroz irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 9, p. 1393-1398, 2006.

MOSIER, A. R. Chamber and Isotope Techniques. In: ANDREAE, M. O.; SCHIMMEL, D. S. (ed.). **Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere**. Berlin: Wiley, 1989. p. 175-187.

MUNDSTOCK, C. M. **Qualidade física e química da água de irrigação e de drenagem do perímetro de irrigação do Arroio Duro (AUD – Camaquã) de 2005 a 2012**. Camaquã: Associação dos Usuários da Barragem do Arroio Duro (AUD); Porto Alegre: IRGA, 2015. 42 p. Disponível em: <http://www.aud.org.br/paginas-anexos/8.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2022.

OKON, Y.; LABANDERA-GONZALEZ, C. A. Agronomic applications of *Azospirillum*: an evaluation of 20 years worldwide field inoculation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 26, n. 12, p. 1591-1601, 1994.

OSÓRIO FILHO, B. D.; BINZ, A.; LIMA, R. F.; GIONGO, A.; SÁ, E. L. S. Promoção de crescimento de arroz por rizóbios em diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Ciência Rural**, v. 46, n. 3, p. 478-485, 2016.

OSÓRIO FILHO, B. D.; GANO, K. A.; BINZ, A.; LIMA, R. F.; AGUILAR, L. M.; RAMIREZ, A.; CABALLERO-MELLADO, J.; SÁ, E. L.; GIONGO, A. Rhizobia enhance growth in rice plants under flooding conditions. **American and Eurasian Journal of Agriculture & Environmental Science**, v. 14, n. 8, p. 707-718, 2014.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2016. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso: 22 jan. 2020.

REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 32. Farroupilha. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Cachoeirinha: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2018. 205 p.

SCIVITTARO, W. B.; MACHADO, M. O. Adubação e calagem para a cultura do arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. (ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 259-303.

SOARES, J. R.; CANTARELLA, H.; VARGAS, V. P.; CARMO, J. B.; MARTINS, A. A.; SOUSA, R. M.; ANDRADE, C. A. Enhanced-efficiency fertilizers in nitrous oxide emissions from urea applied to sugarcane. **Journal of Environmental Quality**, v. 44, n. 2, p. 423- 430, 2015. DOI: 10.2134/jeq2014.02.0096.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI, 2007. 154 p.

STEINMETZ, S.; FAGUNDES, P. R. R.; MARIOT, C. H. P.; WREGE, M. S.; MATZENAUER, R.; MALUF, J. R.T.; FERREIRA, J. S. A. **Zoneamento agroclimático do arroz irrigado por épocas de semeadura no Estado do Rio Grande do Sul**: versão 4. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007. 37 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 199).

SUN, H.; ZHANG, H.; POWLSON, D.; MIN, J.; SHI, W. Rice production, nitrous oxide emission, and ammonia volatilization as impacted by nitrification inhibitor 2-chloro-6-(Trichloromethyl)-pyridine. **Field Crops Research**, v. 173, n. 1, p. 1-7, 2015. DOI: 10.1016/j.fcr.2014.12.012.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

THILAKARATHNA, M. S.; MCELROY, M. S.; CHAPAGAIN, T.; PAPADOPOULOS, Y. A.; RAIZADA, M. N. Belowground nitrogen transfer from legumes to non-legumes under managed herbaceous cropping systems. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 58, 16 p., 2016.

VAHL, L. C.; SOUZA, R. O. de. Aspectos físico-químicos de solos alagados. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M. de. (ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 97-118.

YANNI, Y. G.; RIZK, R. Y.; ABD EL-FATTAH, F. K.; SQUARTINI, A.; CORICH, V.; GIACOMINI, A.; DE BRUIJN, F.; RADEMAKER, J.; MAYA-FLORES, J.; OSTROM, P.; VEGA-HERNANDEZ, M.; HOLLINGSWORTH, R. I.; MARTINEZ-MOLINA, E.; MATEOS, P.; VELAZQUEZ, E.; WOPEREIS, J.; TRIPLETT, E.; UMALI-GARCIA, M.; ANARNA, J. A.; ROLFE, B. G.; LADHA, J. K.; HILL, J.; MUJOO, R.; NG, P. K.; DAZZO, F. B. The beneficial plant growth-promoting association of *Rhizobium leguminosarum* bv. Trifolli with rice roots. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 28, n. 9, p. 845-870, 2001.

Embrapa Clima Temperado

BR-392, km-78, Caixa Postal 403
CEP 96010-971, Pelotas, RS
Fone: (53) 3275-8100
www.embrapa.br/clima-temperado
www.embrapa.br/fale-conosco

1ª edição

Publicação digital: PDF



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



Comitê Local de Publicações

Presidente

Luis Antônio Suíta de Castro

Vice-presidente

Walkyria Bueno Scivittaro

Secretária-executiva

Bárbara Chevallier Cosenza

Membros

Ana Luíza B. Viegas, Fernando Jackson,

Marilaine Schaun Pelufé, Sonia Desimon

Revisão de texto

Bárbara Chevallier Cosenza

Normalização bibliográfica

Marilaine Schaun Pelufé

Editoração eletrônica

Nathália Santos Fick (46.431.873/0001-50)

Foto da capa

Nathália Furtado Lucas

CGEE 017871