

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ALEF FERNANDO BORILLE DOS SANTOS

**Fontes e doses de nitrogênio associado a doses de
Azospirillum sp. na emissão de CO₂ e na produção de milho
no sistema de consórcio milho e cana-de-açúcar.**

CHAPADÃO DO SUL – MS

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ALEF FERNANDO BORILLE DOS SANTOS

**Fontes e doses de nitrogênio associado a doses de
Azospirillum sp. na emissão de CO₂ e na produção de milho
no sistema de consórcio milho e cana-de-açúcar.**

Orientadora: Profa. Dra Rita de Cássia Félix Alvarez

Coorientadora: Profa. Dra Dthenifer Cordeiro Santana

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL – MS

2024



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: Alef Fernando Borille dos Santos

ORIENTADOR: Dra. Rita de Cassia Felix Alvarez

TÍTULO: Fontes e doses de nitrogênio associado a doses de *Azospirillum sp.* na emissão de CO₂ e produtividade de milho no sistema de consórcio milho e cana-de-açúcar.

AVALIADORES:

Prof. Dra. Rita de Cassia Felix Alvarez

Prof. Dr. Cassiano Garcia Roque

Prof. Dr. Rafael Ferreira Barreto

Chapadão do Sul, 04 de outubro de 2024.

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Rita de Cassia Felix Alvarez, Professora do Magistério Superior**, em 04/10/2024, às 08:55, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Ferreira Barreto, Professor do Magisterio Superior**, em 04/10/2024, às 08:56, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA
MÁXIMA
NO MEC

UFMS
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Cassiano Garcia Roque, Professor do Magisterio Superior**, em 04/10/2024, às 08:58, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Resumo

As emissões de CO₂ vem sendo estudadas devido o compromisso dos países em reduzir os gases de efeito estufa, e a agricultura sustentável é um dos principais fatores que pode contribuir para essa redução. Os sistemas de cultivos consorciados promovem aumento do estoque de carbono no solo, porém aumenta a demanda de nutrientes para manter altas produtividades. Com isso o objetivo desta pesquisa foi avaliar os efeitos de fontes e doses de nitrogênio associados a aplicação de *Azospirillum brasilense* no consórcio milho e cana-de-açúcar nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) pelo solo e a produção do milho. O experimento foi instalado em janeiro de 2024 no município de Chapadão do céu – GO. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho mesotrófico. Após nove cortes do canavial, avaliamos o desempenho produtivo do milho consorciado e as emissões de CO₂ nesse ambiente. Para ambos os experimentos, o delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. Nas parcelas foram realizados dois experimentos com dois híbridos de milho e nas subparcelas, as fontes de N (uréia e nitrato de amônio), doses de inoculação com *Azospirillum brasilense* (SI: sem inoculação, DP: 100 ml ha⁻¹, 2DP: 200 ml ha⁻¹; 3 DP: 300 ml ha⁻¹) e doses do fertilizante nitrogenado (D1=0 kg ha⁻¹; D2 = 60 kg ha⁻¹; D3 = 120 kg ha⁻¹; D4 = 180 kg ha⁻¹ e D5 = 240 kg ha⁻¹). Foram avaliados a produtividade do milho e emissão de CO₂ em três fases do milho. Foi constatado que a utilização de inoculante reduziu as emissões de CO₂ quando foi utilizado a fonte nitrato de amônio e que podemos reduzir as doses de nitrogênio na cultura do milho com a inoculação sem perder produtividade.

Palavras-chave: agrosistema; FCO₂; sustentabilidade, bactérias promotoras do crescimento vegetal, inoculação

Abstract

CO₂ emissions have been studied due to the commitment of countries to reduce greenhouse gases, and sustainable agriculture is one of the main factors that can contribute to this reduction. Intercropping systems increase the carbon stock in the soil, but increase the demand for nutrients to maintain high yields. With this in mind, the objective of this research was to evaluate the effects of nitrogen sources and doses associated with the application of *Azospirillum brasilense* in maize and sugarcane intercropping on carbon dioxide (CO₂) emissions from the soil and maize production. The experiment was carried out in January 2024 at municipality of Chapadão do Céu - GO. The soil in the experimental area is classified as Latossolo Vermelho distroférrico. The experimental area was cultivated with sugarcane for 9 cuts and we evaluated the productive performance of the maize and CO₂ emissions in this environment. The experimental design used was randomized blocks in a subdivided plot scheme, with four replications. In the plots, two experiments were carried out with two maize hybrids and in the subplots, the N sources (urea and ammonium nitrate), doses of inoculation with *Azospirillum brasilense* (SI: no inoculation, DP: 100 ml ha⁻¹, 2DP: 200 ml ha⁻¹; 3 DP: 300 ml ha⁻¹) and nitrogen fertilizer doses (D1=0 kg ha⁻¹; D2 = 60 kg ha⁻¹; D3 = 120 kg ha⁻¹; D4 = 180 kg ha⁻¹ and D5 = 240 kg ha⁻¹). Corn yields and CO₂ emissions were evaluated at three corn stages. It was found that the use of inoculants reduced CO₂ emissions when ammonium nitrate was used and that we can reduce the doses of nitrogen in the maize crop with inoculation without losing productivity, although the results varied according to the hybrids used.

Keywords: agrosystem; FCO₂; sustainability, plant growth promoting bacteria, inoculation

Introdução

A emissão de CO₂ tem sido pauta de muitas pesquisas na área da agricultura, avaliações em eucalipto, floresta nativa, pastagem e soja, em diferentes biomas buscam entender qual sistema é mais eficiente no sequestro de carbono (TEODORO et al., 2024). Essa necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa vem associado a necessidade de aumentar a produção de grãos (GALINDO et al., 2022).

A adubação nitrogenada é um dos principais pontos de aumento da produção da cultura do milho (ZHANG et al., 2022), e está associado ao aumento da emissão de gases de efeito estufa (GALINDO et al., 2022), e de outros impactos como a eutrofização de águas (GALINDO et al., 2024), acidificação do solo e emissão de gases amônia e óxido de nitrogênio (GALINDO et al., 2022). Porém o fluxo de CO₂ realizado pelo solo variam devido a vários fatores, umidade do solo, temperatura, atividade dos microrganismos, propriedades físicas e químicas do solo, sistema de cultivo, quantidade de matéria orgânica (MOTA NETO et al., 2024; MUNJONJI et al., 2024).

A utilização de microrganismos promotores de crescimento e fixadores biológicos de nitrogênio é uma ferramenta que pode reduzir a necessidade de utilizar altas doses de fertilizantes nitrogenados (HUNGRIA et al., 2022) além de reduzir de forma significativa as emissões de CO₂ do solo quando inoculamos o milho no sistema de cultivo solteiro (YOSHIURA et al., 2021). Além desses benefícios a inoculação com *Azospirillum* sp. apresenta aumento da exploração radicular da cultura, através da produção de fitohormônios, esses estímulos também geram interações entre micorrizas melhorando a absorção de fósforo. Também apresenta potencial de estimular a cultura a tolerar os estresses bióticos e abióticos (SILVA et al., 2024).

A utilização da agricultura de consórcio é antiga, buscando otimizar o uso da área melhorando a eficiência do uso da água e da luz, aproveitando aplicação de insumos agrícolas para as duas culturas, além de ajudar na conservação do solo. O milho tem se mostrado uma das principais culturas utilizadas no sistema de consórcio (LI et al., 2020).

A utilização do sistema de consórcio milho e cana-de-açúcar foi estudado em 1977 nas ilhas Maurício, visando o melhor aproveitamento da área e o cultivo de milho para produção de ração (R PILLAY et al., 1978). Em 2015 a Embrapa Cerrados começou a desenvolver o cultivo desse consórcio na cana planta buscando aproveitamento de área após o plantio da cana-de-açúcar e a entrada do período seco (DOS SANTOS JUNIOR et al., 2020).

Os sistemas de consórcio têm sido explorados através do mundo como uma forma sustentável e que tem potencial para garantir a segurança alimentar (ZHANG et al., 2024) e possuem potencial de acúmulo de carbono e nitrogênio no solo, mitigando gases de efeito estufa e lixiviação de nitrato, além de trazer aumento de produtividade quando realizado por muito tempo (CONG et al., 2015). Também foram encontrados benefícios como aumento de 16% a 29% produtividade e redução de 19% a 36% da necessidade de fertilizantes por área quando se utiliza o consórcio de culturas (MOTA NETO et al., 2024). Outra forma de aumentarmos a produção é aumentar área de cultivo, com isso buscamos otimizar áreas de cana-de-açúcar que seriam colhidas com 18 meses adicionando a cultura do milho logo após a colheita da cana-de-açúcar e após o final do ciclo do milho deixar a cana-de-açúcar desenvolver por 12 meses e colher.

Nossa hipótese é que a utilização do sistema de consórcio pode trazer segurança energética e alimentar ao planeta com sustentabilidade, onde teremos melhores resultados com a utilização do inoculante nas doses recomendadas aliada com as fontes de nitrogênio. Com isso o objetivo desta pesquisa foi verificar o efeito de doses e fontes de nitrogênio associado a doses de *Azospirillum* sp. nas emissões de CO₂ no sistema de consórcio milho e cana-de-açúcar e quantificar a produtividade do milho nesse sistema.

Metodologia

O experimento foi conduzido no município de Chapadão do Céu – GO, nas coordenadas 18°17'59.5" S; 52°42'12.1" O. O solo é classificado como Latossolo vermelho mesotrófico, conforme a tabela 1.

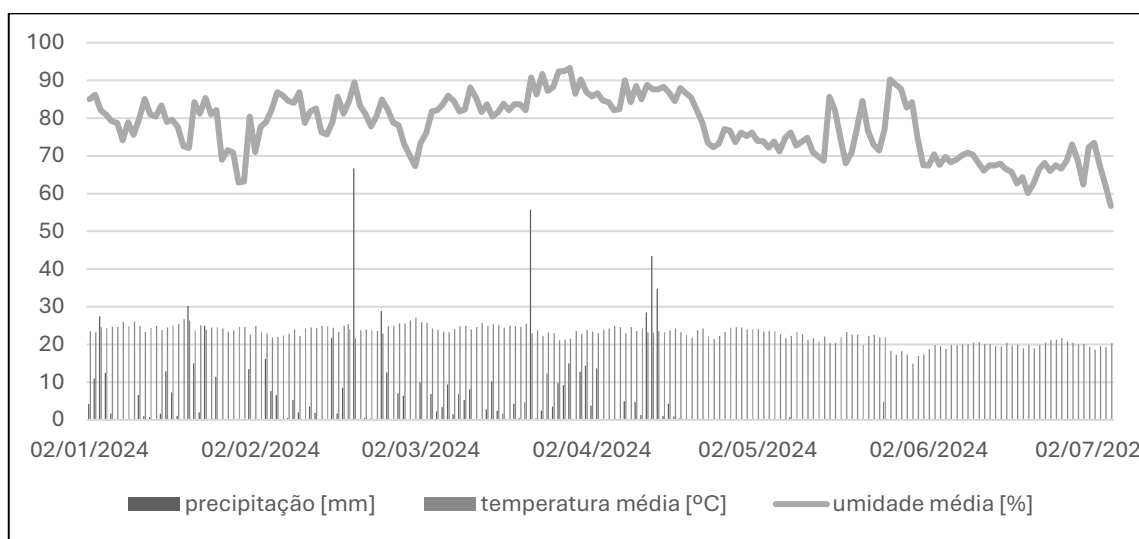
Tabela 1. Análise de solo realizada na área experimental, Chapadão do Céu – GO, 2024.

Prof	MO	pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	S
cm	g kg ⁻¹	CaCl ₂	mg dm ⁻³ resina			mmolc dm ⁻³			mg dm ⁻³
0-25	27,25	5,41	34,35	0,86	41,55	13,00	1,00	22,20	16,55
25-50	20,15	4,85	13,15	0,39	14,75	5,35	1,78	29,00	62,50

Prof	SB	CTC	V%	m%	B	Cu	Mn	Fe	Zn
cm	mmolc dm ⁻³		%				mg dm ⁻³		
0-25	55,41	77,61	71,11	1,82	0,32	1,20	0,63	44,17	1,77
25-50	20,49	49,49	40,91	8,89	-	-	-	-	-

De acordo com a classificação de Koppen, o clima da região é aw tipo (ALVARES et al., 2013), com verões chuvosos e invernos secos. A precipitação anual acumulada é 1.740 mm e a temperatura média anual é 23,2°C. Os dados médios de precipitação e temperatura do ar durante o ciclo de cultivo são mostrados na Figura 1.

O regime de chuvas foi bem distribuído durante o ciclo da cultura, interrompendo as chuvas no dia 17/04/2024 próximo ao ponto de colheita do milho, a temperatura média diária também atendeu as necessidades da cultura durante seu desenvolvimento.



Fonte: Dados do próprio autor

Figura 1. Dados mensais registrado pela plataforma Zeus, de precipitação pluviométrica (mm), temperatura média (°C) e umidade relativa (%). Chapadão do Céu - GO, Brasil, 2023/24

O experimento foi instalado na safra 2023/2024 utilizando dois híbridos de milho (Agrocere 8701 PRO4 e Pioneer 3845 VYHR) com espaçamento de 0,5 metro 106 dias após colheita da cana-de-açúcar (SP 801816) plantada em 21/04/2014 (com 9 cortes) com espaçamento de 1,5 metro, intercalando 3 linhas de milho na entrelinha da cana. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. Nas parcelas foram inseridos os híbridos de milho e nas subparcelas, as fontes e doses de N em cobertura (uréia e nitrato de amônio) e doses de inoculação com *Azospirillum brasilense* (SI: sem inoculação, DP: dose padrão, 2DP: dose padrão duplicada; 3 DP: dose padrão triplicada). As doses de N em cobertura corresponderam a: D1=0 kg ha⁻¹; D2 = 60 kg ha⁻¹; D3 = 120 kg ha⁻¹; D4 = 180 kg ha⁻¹ e D5 = 240 kg ha⁻¹. As doses de *Azospirillum brasilense* utilizadas corresponderam a: SI = 0 mL ha⁻¹; DP = 100 mL ha⁻¹; 2DP = 200 mL ha⁻¹ e 3DP = 300

mL ha⁻¹). Sendo 9 linhas de milho (4 linhas de cana) por 10 metros, onde a área experimental foram as 3 linhas centrais de milho. As doses de 120 kg ha⁻¹, 180 kg ha⁻¹ e 240 kg ha⁻¹ foram parceladas em duas aplicações sendo 60 + 60; 120 + 60 e 120 + 120 kg ha⁻¹, respectivamente.

O *Azospirillum brasilense* utilizado possui densidade de 1,00 g.dm⁻³, 2 x 10⁸ UFC.mL⁻¹ e estirpes AbV5 e AbV6, aplicados nos tratamentos de sementes no dia do plantio, 26 de janeiro de 2024.



Fonte: Próprio autor

Foto 1. Sistema de plantio milho x cana-de-açúcar.

A adubação de semeadura utilizada foi a padrão comumente aplicada em áreas comerciais, 225 kg ha⁻¹ de 11-52-00 e 250 kg ha⁻¹ de 00-00-60, e os híbridos de milho semeados com 68.000 sementes ha⁻¹ (AG 8701 PRO4) e 70.000 sementes ha⁻¹ (P3845 VYHR). 24 horas após a semeadura, realizamos a roçada mecânica da área para simularmos o corte do canavial ideal para o projeto, por conta do tempo da colheita da cana-de-açúcar e o plantio do milho, sendo uma simulação de porte ideal.

A primeira parcela da adubação de cobertura foi realizada no dia 09/02/2024 e a segunda parcela no dia 01/03/2024. Para o travamento da cana realizamos a aplicação de 504 g ha⁻¹ i.a. de glifosato sal de amônio no dia 24/02/2024. A colheita do experimento foi realizada no dia 18/06/2024, a área de colheita foi de 4 m².

Para as avaliações do fluxo de CO₂ do solo (FCO₂), foi utilizado o sistema portátil EGM-5, modelo AGA560 em 1 ponto em cada parcela avaliada. Este equipamento monitora as variações da concentração de CO₂ no interior da câmara de solos por meio de espectroscopia de absorção óptica na região espectral do infravermelho (ACS041). A câmara de solos é um sistema fechado com volume interno de 854,2 cm³ e área de contato circular de 83,7 cm², sendo acoplada sobre os colares de PVC que foram inseridos com 24 horas de antecedência no solo em cada ponto. Tal procedimento decorre do fato que, a inserção direta da câmara sobre o solo pode causar distúrbios ocasionando emissões adicionais de CO₂ do solo.

A FCO₂ foi avaliada em cada ponto por um ajuste da concentração de CO₂ do ar dentro da câmara em função de uma regressão quadrática no tempo após o seu fechamento e a compensação de água. O modo de medida para a determinação da emissão de CO₂ do solo levou 30 segundos em cada um dos pontos amostrais e a pressão barométrica dentro da câmara foi determinada a cada 1,0 segundos, totalizando 30 leituras em cada ponto amostral. O FCO₂ (μmol m⁻² s⁻¹) foi calculado conforme Equação 1, proposta por Parkinson (1981).

$$FCO_2 = \frac{dC}{dT} \times \frac{P}{1013} \times \frac{273}{273+T} \times \frac{V}{A} \times 44.615 \quad (1)$$

Em que: dC é mudança na concentração de CO₂ em ppm; dT é o tempo de execução do processo (1 segundo); P é a pressão barométrica mensurada em mbar; T é a temperatura do ar em °C; V é o volume da câmara do EGM5 em m³; A é a área dos anéis de PVC instalados no solo em m².

A temperatura do solo, nos mesmos pontos de coleta, foi monitorada por meio de um sensor de temperatura que é parte integrante do sistema ACS044. Consiste em uma haste de 20 cm que é inserida no interior do solo a 5 cm do local onde será previamente instalados os colares de PVC para a avaliação da emissão de CO₂ do solo. Da mesma forma, a umidade do solo foi registrada utilizando-se um aparelho sensor HydraProbe (Stevens), constituído por uma sonda com três hastes de 12 cm que serão inseridas no interior do solo, perpendicular em relação à superfície, também a 5 cm dos colares de PVC. O valor da umidade do solo é derivado a partir do tempo que uma corrente elétrica leva para percorrer a distância de 32 mm de uma haste a outra. As avaliações da temperatura e umidade do solo foram realizadas junto as avaliações da emissão de CO₂ do solo nos dias 01/03/2024 (durante a segunda aplicação de cobertura, L1), 20/04/2024 (próximo ao florescimento, L2) e 15/07/2024 (3 dias antes da colheita, L3).

Os dados foram submetidos à análise de variância usando o teste F em nível de probabilidade de 5%. Quando significativas, os tratamentos qualitativos foram comparados

pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$) e os tratamentos quantitativos por regressão. As análises foram realizadas pelo software RBIO (LOPES BHERING, 2017).

Resultados

Os resultados obtidos estão apresentados divididos por híbridos, o híbrido Agrocere 8701 PRO4 e o híbrido Pioneer 3845 VYHR.

Tabela 1. Análise de variância para a produtividade (PROD) e emissão de CO_2 (L1, L2 e L3) in situ (FCO_2) sob influência dos fatores inoculação, fonte e dose de nitrogênio utilizados em milho. AG 8701 PRO4, Chapadão do Céu – GO, Safra 2023/2024.

	G.L.	PROD	L1	L2	L3
Bloco	3	7436534	6.809	0.849	0.2979
Inoculação	3	9898968*	6.001	20.685*	2.5293*
Fonte	1	7633565	0.071	87.853*	0.3115
Dose	4	30035774*	1.462	3.0349*	0.7731*
Inoculação*Fonte	3	6137757	1.805	10.625*	0.2208
Inoculação*Dose	12	2105236	5.809*	1.420	0.5715*
Fonte*Dose	4	4855012	1.645	3.024*	0.3452
Inoculação*Fonte*Dose	12	6235826*	3.555	4.097*	0.2796
Resíduo	117	3282010	2.692	0.971	0.2073
C.V.(%)		19.05	27.62	31.73	38.25

* Significativo a 5% no teste de F.

Avaliando o híbrido Agrocere 8701 PRO4 obtivemos interação tripla entre as variáveis estudadas para produtividade e emissão de FCO_2 próximo ao pendoamento. A emissão de FCO_2 próxima ao pendoamento também teve interação significativa entre fonte e dose, e inoculação e fonte de nitrogênio. As emissões de FCO_2 durante a segunda aplicação de adubação e a colheita tivemos interação entre as variáveis inoculação e doses de nitrogênio.

Na fonte ureia a utilização de 100 ml ha^{-1} e 200 ml ha^{-1} do inoculante proporcionou menor produtividade nas doses 0 e 60 kg ha^{-1} . Também tivemos incremento de produtividade para a dose de 60 kg ha^{-1} de ureia associada a 300 ml ha^{-1} de inoculante em comparação ao nitrato de amônio (Tabela 2).

Tabela 2. Comparação de médias para a produtividade (PROD) para os fatores inoculação, fonte e dose de nitrogênio utilizados em milho:

Nitrato de amônio

Inoculante	0 kg ha ⁻¹	60 kg ha ⁻¹	120 kg ha ⁻¹	180 kg ha ⁻¹	240 kg ha ⁻¹
sem	7515.38 aA	10067.37 aA	9778.58 aA	10072.66 aA	10508.35 aA
100 ml ha ⁻¹	9296.82 aA	8884.20 aA	8437.22 aA	11140.01 aA	9897.73 aA
200 ml ha ⁻¹	9371.99 aA	8078.54 aA	8769.37 aA	9814.54 aA	8770.87 aA
300 ml ha ⁻¹	7230.11 aA	9201.25 aB	9537.30 aA	9516.08 aA	9934.75 aA

Ureia					
sem	9066.51 aA	8714.93 bA	11490.93 aA	10406.18 aA	10448.51 aA
100 ml ha ⁻¹	6740.53 bB	9277.18 bA	10293.89 aA	10410.59 aA	11834.87 aA
200 ml ha ⁻¹	4907.54 bB	8324.81 bA	9504.39 aA	10538.58 aA	9688.48 aA
300 ml ha ⁻¹	9393.12 aA	11880.23 aA	10491.53 aA	11446.44 aA	9700.90 aA

Letras minúsculas comparam inoculação dentro da combinação dos níveis Fonte dentro de cada dose (coluna);
Letras maiúsculas comparam fator fonte dentro da combinação dos níveis de inoculação dentro de cada dose

Podemos verificar que para fonte ureia as doses utilizadas apresentaram resposta quando usamos 100 ml ha⁻¹ e 200 ml ha⁻¹ de inoculante, mostrando efeito linear de acréscimo de produtividade, quando aumentamos a dose de ureia usando 100 ml ha⁻¹ de inoculante (Tabela 2, Figura 3). Quando acrescentamos 200 ml ha⁻¹ de inoculante temos efeito quadrático tendo como dose máxima de ureia com 177 kg ha⁻¹ sendo produzido 10.392,67 kg de milho por ha Figura (2). Quando comparamos as doses de 100 ml ha⁻¹ e 200 ml ha⁻¹ entendemos que a utilização da dose maior pode trazer redução da produtividade com o aumento da adubação, para produzir os mesmos 10.392,67 kg ha⁻¹ precisaríamos de 156,10 kg ha⁻¹ de ureia.

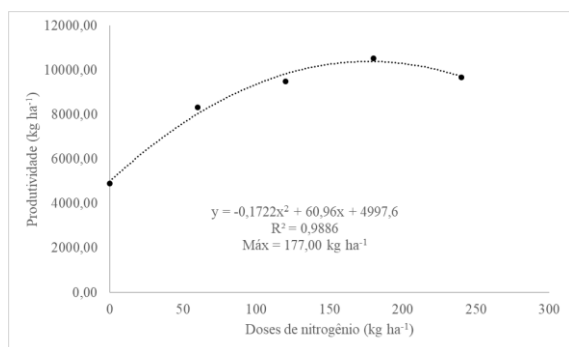


Figura 2. Regressão para o efeito dose significativo para ureia na inoculação 200 ml ha⁻¹ para a variável produtividade para o híbrido Agrocere 8701 PRO4

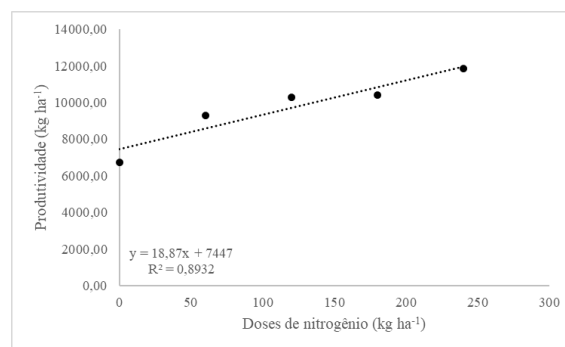


Figura 3. Regressão para o efeito dose significativo para ureia na inoculação 100 ml ha⁻¹ para a variável produtividade no híbrido Agrocere 8701 PRO4

Não tivemos diferença estatística em produtividade conforme aumentamos as doses e realizamos o parcelamento da aplicação de nitrogênio, tendo um efeito positivo para a utilização do inoculante quando usamos pouco fertilizante mineral.

Conforme a Tabela 1 tivemos diferença entre as médias da inoculação dentro das doses de nitrogênio na primeira leitura de FCO₂, ocorrendo uma redução significativa na dose de 100 ml ha⁻¹ quando usamos 240 kg ha⁻¹ de nitrogênio (Tabela 3).

Tabela 3. Comparação de médias entre os efeitos da inoculação dentro de cada dose para L1

	0 kg ha ⁻¹	60 kg ha ⁻¹	120 kg ha ⁻¹	180 kg ha ⁻¹	240 kg ha ⁻¹
sem	4.88 a	7.33 a	6.30 a	5.72 a	6.72 b
100 ml ha ⁻¹	5.03 a	5.42 a	5.73 a	7.07 a	4.13 a
200 ml ha ⁻¹	6.19 a	5.65 a	5.46 a	6.03 a	5.53 b
300 ml ha ⁻¹	6.72 a	5.85 a	6.76 a	5.80 a	6.47 b

Letras iguais na coluna não se diferenciam a 5% de probabilidade ao teste de Scott-Knott

Quando variamos doses de nitrogênio em cobertura, na dose de 100 ml ha⁻¹ de inoculante temos um ajuste quadrático onde temos o ponto de máxima com 133 kg ha⁻¹ de cobertura, proporcionando um valor de 6,47 μmol m⁻² s⁻¹ FCO₂, após essa quantidade de nitrogênio em cobertura temos redução nas emissões (Figura 3). Não foi realizado uma regressão de doses de inoculante devido não termos ajuste para a equação.

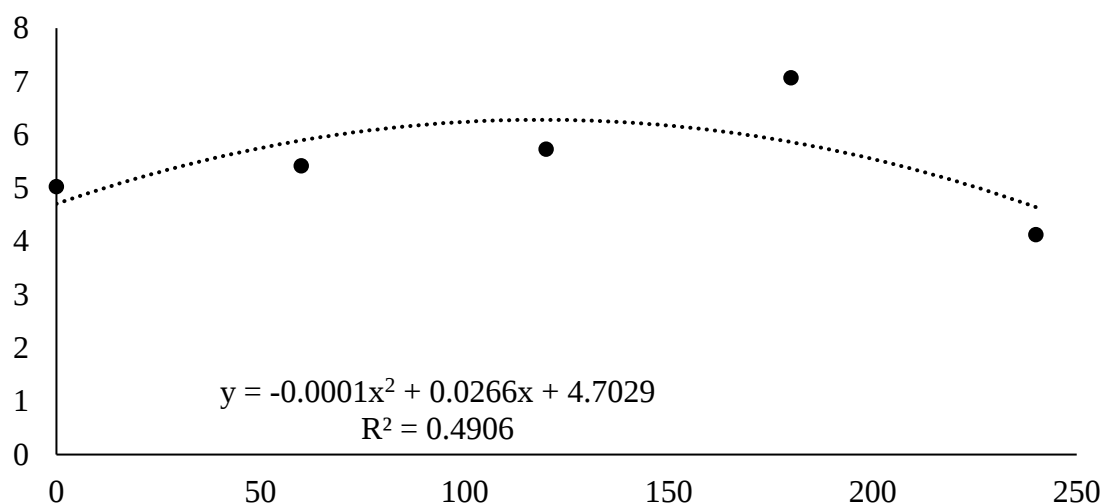


Figura 3. Regressão para o efeito dose significativo na inoculação 100 ml ha⁻¹ para a variável L1.

Os resultados trouxeram uma interação tripla entre as variáveis estudadas na segunda leitura de FCO₂, próximo ao florescimento da cultura, mostrando que a utilização de 100 ml ha⁻¹ tem a tendência de reduzir as emissões, sendo mais significativa na fonte ureia. Também temos a redução das emissões em relação as fontes, onde o nitrato de amônio obteve emissões mais baixas quando comparamos dentro de cada dose de nitrogênio, principalmente nas doses de 200 e 300 ml ha⁻¹ (Tabela 4).

Tabela 4. Comparação de médias para FCO₂ na segunda avaliação (L2) para os fatores inoculação, fonte e dose de nitrogênio utilizados em milho.

Inoculante	Nitrato de amônio				
	0 kg ha ⁻¹	60 kg ha ⁻¹	120 kg ha ⁻¹	180 kg ha ⁻¹	240 kg ha ⁻¹
sem	2.65 aA	1.89 aA	2.68 aA	2.12 bA	2.01 bA
100 ml ha ⁻¹	2.19 aA	2.00 aA	2.47 aA	1.88 bA	1.76 bA
200 ml ha ⁻¹	3.12 aA	2.88 aA	2.45 aA	3.50 aA	3.39 aA
300 ml ha ⁻¹	2.64 aA	1.40 aA	3.37 aA	3.26 aA	1.51 bA

Inoculante	Ureia				
	0 kg ha ⁻¹	60 kg ha ⁻¹	120 kg ha ⁻¹	180 kg ha ⁻¹	240 kg ha ⁻¹
sem	2.71 aA	4.64 bB	3.37 aA	3.78 bB	3.25 aA
100 ml ha ⁻¹	2.64 aA	1.98 aA	2.39 aA	2.22 aA	2.33 aA
200 ml ha ⁻¹	1.73 aA	4.71 bB	5.36 bB	4.48 bA	4.48 bA
300 ml ha ⁻¹	2.71 aA	5.90 bB	6.02 bB	3.51 bA	6.02 cB

Letras minúsculas comparam inoculação dentro da combinação dos níveis Fonte dentro de cada dose (coluna); Letras maiúsculas comparam fator fonte dentro da combinação dos níveis de inoculação dentro de cada dose

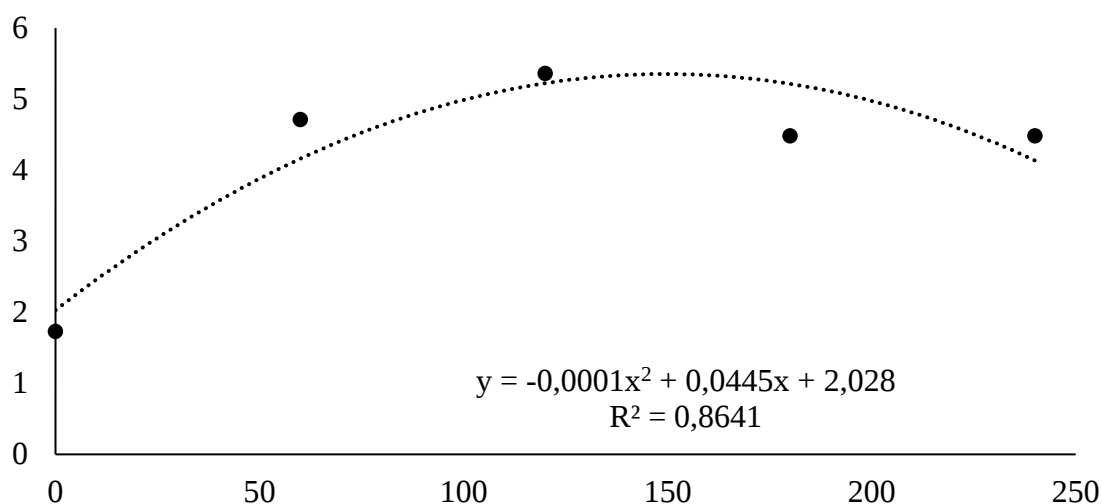


Figura 4. Regressão para o efeito dose significativo na inoculação 200 ml ha⁻¹ para a variável L2 para ureia.

Quando avaliamos o efeito das doses de nitrogênio da fonte ureia para a dose de 200 ml há⁻¹ de inoculante temos uma tendência quadrática, onde alcançamos a emissão máxima de CO₂ na dose de 222,50 kg ha⁻¹ de nitrogênio, alcançado 11,91 μmol m⁻² s⁻¹.

Tabela 5. Comparação de médias entre os efeitos da inoculação dentro de cada dose para L3:

	0 kg ha ⁻¹	60 kg ha ⁻¹	120 kg ha ⁻¹	180 kg ha ⁻¹	240 kg ha ⁻¹
sem	1.33 a	1.26 a	1.48 b	1.36 a	1.47 a
100 ml ha ⁻¹	1.41 a	0.82 a	1.06 a	1.12 a	1.08 a
200 ml ha ⁻¹	1.33 a	1.22 a	0.75 a	0.92 a	1.33 a
300 ml ha ⁻¹	1.26 a	1.32 a	0.86 a	0.92 a	1.16 a

Letras iguais na coluna não se diferenciam a 5% de probabilidade ao teste de Scott-Knott

Na última leitura realizada de FCO₂ temos uma redução na emissão de CO₂ na dose de 120 kg ha⁻¹ quando usamos inoculação em associação chegando próximo a 50% de redução na dose de 200 ml ha⁻¹.

Para o híbrido Pioneer 3845 VYHR, tivemos interação tripla entre fontes e doses de nitrogênio, e inoculação para as emissões de CO₂, e entre fontes e doses de nitrogenada na produtividade (Tabela 6).

Quando comparamos as fontes de nitrogênio, o nitrato de amônio obteve maior resposta em doses até 120 kg ha⁻¹ em relação a ureia (Tabela 7), tendo efeito linear de aumento de produtividade com o aumento das doses, entretanto na ureia também tivemos esse efeito linear na produtividade, com aumento das doses (Figura 5 e 6).

Tabela 6. Análise de variância para a produtividade (PROD) e emissão de CO₂ (L1, L2 e L3) in situ (FCO₂) sob influência dos fatores inoculação, fonte e dose de nitrogênio utilizados em milho. P3845 VYHR, Chapadão do Céu – GO, Safra 2023/2024.

F.V.	G.L.	PROD	L1	L2	L3
Bloco	3	14051755*	2.88	2.66	0.65*
Inoculação	3	7734241	106.92*	14.19*	0.37
Fonte	1	26207870*	0.00	2.44	0.79*
Dose	4	69135231*	14.34	9.06*	0.37
Inoculação*Fonte	3	5344110	4.94	7.67*	0.95*
Inoculação*Dose	12	3831060	42.30*	3.95	0.14
Fonte*Dose	4	16013060*	22.041	14.62*	0.31
Inoculação*Fonte*Dose	12	3814199	23.59	1.72	0.50*
Resíduo	117	4203346	17.61	2.65	0.18
C.V. (%)		19.17	46.06	42.29	39.63

* Significativo a 5% no teste de F.

Tabela 7. Comparação de médias para as fontes de nitrogênio em cada dose para produtividade:

	0 kg ha ⁻¹	60 kg ha ⁻¹	120 kg ha ⁻¹	180 kg ha ⁻¹	240 kg ha ⁻¹
Nitrato de amônio	7910.40 a	10734.33 a	12077.63 a	11899.60 a	12876.20 a
Ureia	9360.30 a	9009.61 b	9876.72 b	11365.74 a	11838.57 a

Letras iguais na coluna não se diferenciam a 5% de probabilidade ao teste de Scott-Knott

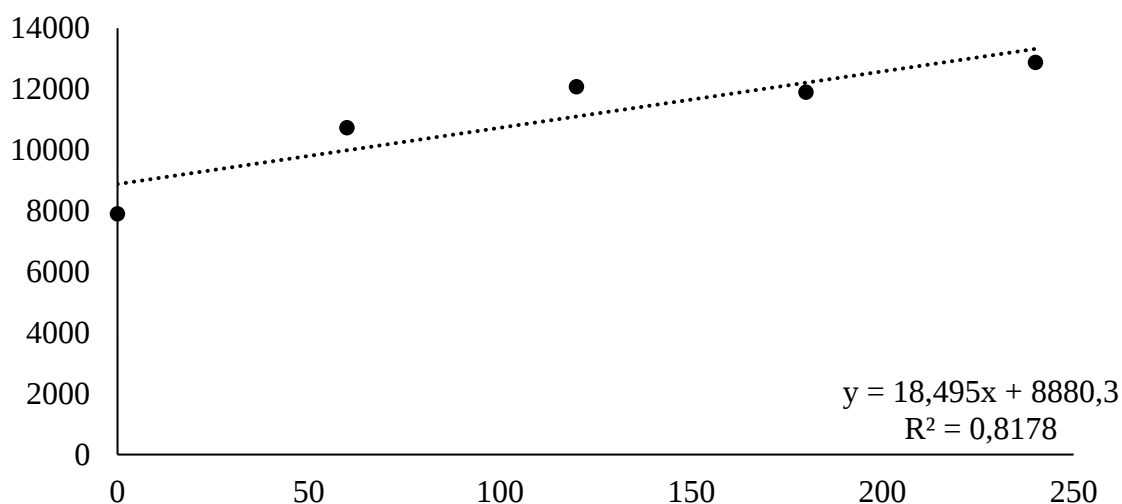


Figura 5. Regressão para o efeito dose significativo da fonte nitrato para a variável produtividade

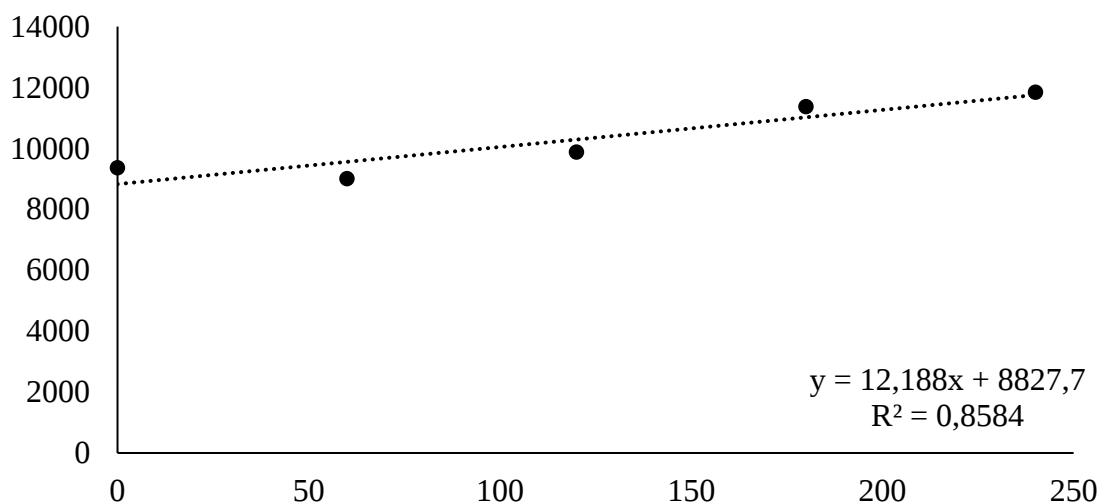


Figura 6. Regressão para o efeito dose significativo da fonte ureia para a variável produtividade

Tabela 8. Comparação de médias entre os efeitos da inoculação dentro de cada dose para L1

	0 kg ha ⁻¹	60 kg ha ⁻¹	120 kg ha ⁻¹	180 kg ha ⁻¹	240 kg ha ⁻¹
sem	14.01 a	7.50 a	6.01 a	6.64 a	9.50 b
100 ml ha ⁻¹	12.64 a	7.21 a	7.31 a	7.07 a	5.79 a
200 ml ha ⁻¹	11.19 a	8.95 a	11.20 b	9.40 a	10.05 b

300 ml ha ⁻¹	12.64 a	11.22 a	12.82 b	9.60 a	12.36 b
-------------------------	---------	---------	---------	--------	---------

Letras iguais na coluna não se diferenciam a 5% de probabilidade ao teste de Scott-Knott

Os resultados de emissão de CO₂ na primeira leitura realizada (na segunda adubação) tivemos interação entre doses de nitrogênio e doses de inoculante, onde uma tendência de redução das emissões na dose de 100 ml ha⁻¹ de inoculante e 240 kg ha⁻¹ de cobertura, na dose de 120 kg ha⁻¹ tivemos menores emissões sem aplicação e inoculante e com 100 ml há⁻¹ (Tabela 8). Também podemos ver uma tendência de aumento das emissões com o aumento do inoculante para esse híbrido.

Na dose de 300 ml há⁻¹ temos um ajuste quadrático para doses de nitrogênio onde temos como ponto de maior emissão de CO₂ a dose de 132,50 kg ha⁻¹ de nitrogênio em cobertura emitindo 11,12 μmol m⁻² s⁻¹ (Figura 7). Quando não aplicamos inoculante temos o efeito de redução das emissões com o aumento das doses de nitrogênio, sendo o ponto de máxima emissão com 55 kg há⁻¹ de nitrogênio emitindo 7,78 μmol m⁻² s⁻¹ (Figura 8).

Quando comparamos as médias das emissões de CO₂ na segunda coleta de dados (próximo ao pendoamento), entre doses de inoculante e fontes de nitrogênio, temos diferença uma diferença estatística na dose de 300 ml há⁻¹ se destacando na fonte nitrato de amônio, obtendo menos emissões.

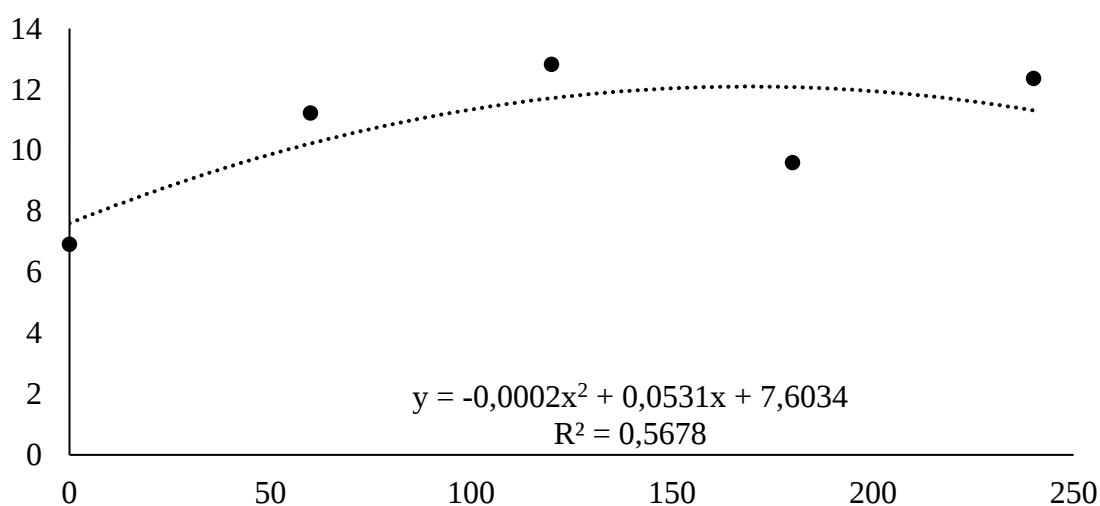


Figura 7. Regressão para o efeito dose significativo da inoculação 300 ml ha⁻¹ sob o L1

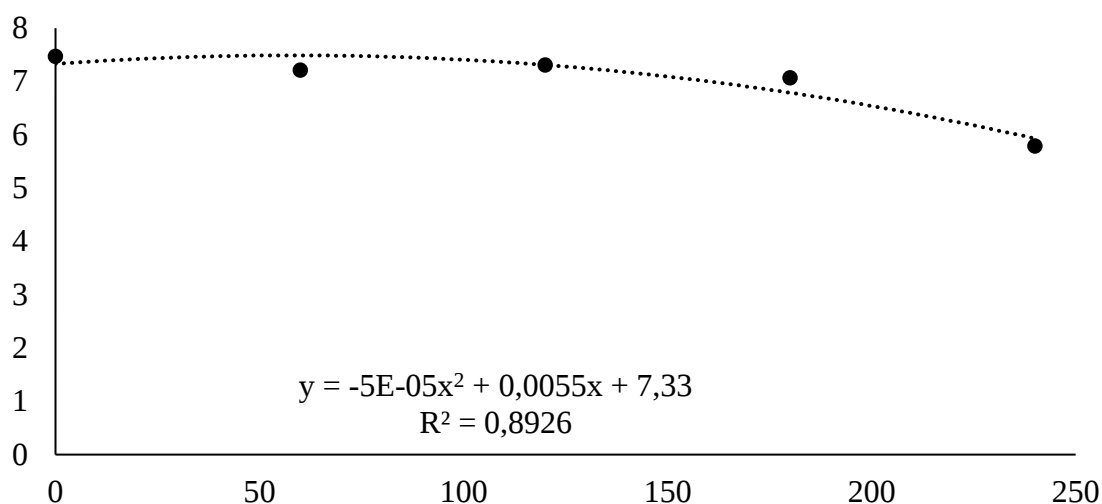


Figura 8. Regressão para o efeito dose significativo sem inoculação sob o L1

Tabela 9. Comparação de médias para interação inoculação e fontes em L2

	Nitrato de amônio	Ureia
sem	3.92 bA	3.78 aA
100 ml ha ⁻¹	4.73 bA	4.28 aA
200 ml ha ⁻¹	4.24 bA	4.28 aA
300 ml ha ⁻¹	2.38 aA	3.90 aB

Letras minúsculas iguais na coluna não se diferenciam dentro de fonte a 5% de probabilidade ao teste de Scott-Knott; Letras maiúsculas iguais na linha não se diferenciam dentro da inoculação a 5% de probabilidade ao teste de Scott-Knott

Na última leitura (próximo a colheita) tivemos variação conforme as doses de inoculante, obtendo menores médias com o dobro da dose, para a fonte nitrato de amônio, trazendo uma regressão linear quando aumentamos a dose de nitrogênio (Figura 9), já para a fonte ureia tivemos esse comportamento com uma dose de inoculante (Figura 10).

Tabela 10. Comparação de médias para a emissão in situ de CO₂ (FCO₂) L3 para os fatores inoculação, fonte e dose de nitrogênio utilizados em milho

Nitrato de amônio					
Inoculante	0 kg ha ⁻¹	60 kg ha ⁻¹	120 kg ha ⁻¹	180 kg ha ⁻¹	240 kg ha ⁻¹
sem	1.11 bA	1.11 aA	1.01 aA	0.77 aA	1.07 aA
100 ml ha ⁻¹	1.57 bB	1.54 aA	0.94 aA	1.30 aA	0.63 aA
200 ml ha ⁻¹	0.46 aB	0.81 aA	0.69 aA	0.92 aA	0.92 aA
300 ml ha ⁻¹	1.07 bA	1.49 aA	0.46 aA	0.92 aA	1.14 aA
Ureia					
sem	1.11 aA	1.31 aA	0.96 aA	0.82 aA	0.84 aA
100 ml ha ⁻¹	0.94 aA	1.05 aA	1.64 aB	1.09 aA	1.35 aB
200 ml ha ⁻¹	1.71 bA	1.74 bB	1.39 aB	1.04 aA	0.93 aA
300 ml ha ⁻¹	0.74 aA	0.91 aA	1.03 aA	0.91 aA	1.25 aA

Letras minúsculas comparam inoculação dentro da combinação dos níveis Fonte dentro de cada dose (coluna); Letras maiúsculas comparam fator fonte dentro da combinação dos níveis de inoculação dentro de cada dose

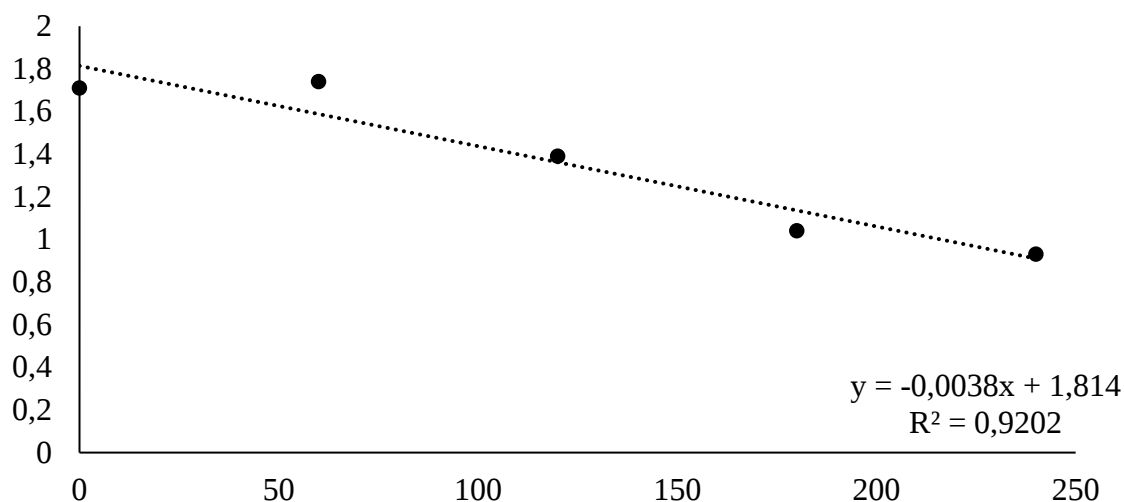


Figura 9. Regressão para o efeito dose significativo da inoculação 200 ml ha⁻¹ da fonte ureia sob o FCO₂ o L3

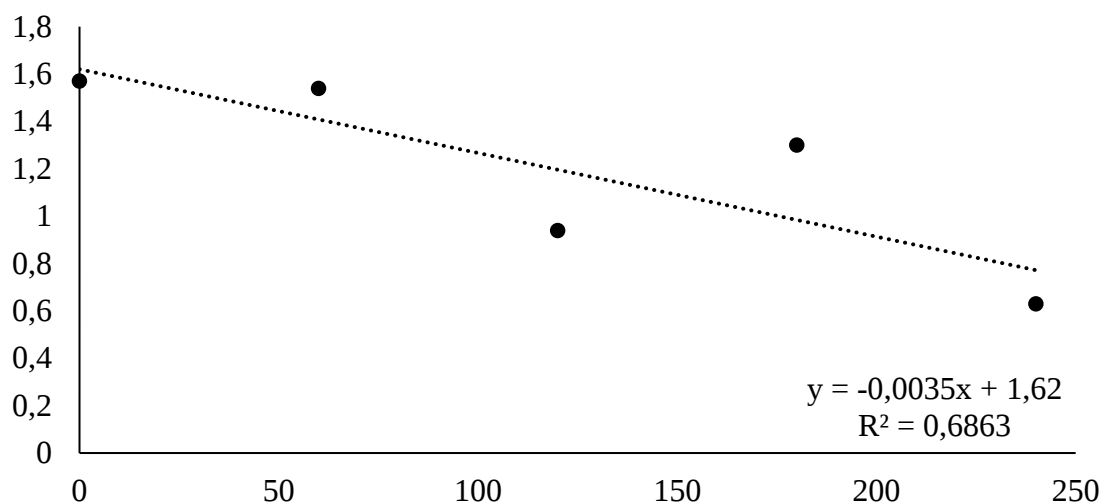


Figura 10. Regressão para o efeito dose significativo da inoculação 100 ml ha⁻¹ da fonte nitrato de amônio sob o L3.

Discussão

Esses resultados demonstram a variação que ocorre com as emissões de CO₂ pelo solo, onde temos vários fatores que impactam nessa avaliação como temperatura, umidade, matéria orgânica e palhada no solo (GUI et al., 2024).

Um dos fatores que podemos considerar que causou redução das emissões foi quantidade de chuvas, uma vez que não tivemos mais chuvas após o dia 17/04/2024 indicando redução das emissões em relação a primeira leitura realizada no dia 01/03/2024, o aumento das emissões tem correlação com a sazonalidade de chuvas, além desse fator, tivemos o final do ciclo do

milho, ocorrendo a senescência da planta e cessando a respiração radicular (MUNJONJI et al., 2024; TEODORO et al., 2024).

Em áreas de plantio direto a utilização de taxas médias de nitrogênio como 180 kg há⁻¹ trouxe melhores resultados nas emissões de CO₂ do que com altas doses na faixa de 210 kg há⁻¹, sendo responsável pela redução das colônias de fungos e bactérias, já a produtividade e produção de biomassa não tiveram diferença em relação a doses de nitrogênio, porém o excesso de nitrogênio pode desencadear desordens fisiológicas que pode causar redução da produtividade (LI et al., 2023).

A produtividade do milho foi impactada pelo aumento da adubação nitrogenada, isso deve-se a alta necessidade desse nutriente pela planta sendo o principal nutriente absorvido (GALINDO et al., 2024). A inoculação pode ser um aliado no fornecimento desse nutriente, porém com restrições, uma vez que ela age como produtor de fitohormônios podendo desencadear efeitos que façam reduzir a eficiência na produção (SANTOS; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2021).

Outro ponto importante para a alta resposta a adubação foi a questão de semearmos no sistema de plantio direto com muita palhada de cana no sistema, necessitando de nitrogênio para a decomposição da palhada devido a relação C/N (LI et al., 2023). As fontes de nitrogênio tiveram impactos onde a utilização da ureia produziu menos que nitrato de amônio, devido aos fatores abióticos que atingem as fontes, altas temperaturas e instabilidade da chuva leva a menor aproveitamento da ureia, gerando perdas por volatilização (CHOI; MATUSHIMA; RO, 2011).

Além de ajudar na redução da adubação nitrogenada a utilização de inoculante ajuda na redução das emissões de carbono, isso deve-se ao fato de que além de ser um microrganismo que possui a capacidade de incorporar carbono (HUNGRIA et al., 2022), ajuda a planta a reduzir os estresses bióticos e abióticos (SANTOS; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2021). Com esse aumento do desenvolvimento radicular permite maior exploração de água e nutrientes do solo refletindo no aumento da produtividade.

As produtividades obtidas neste experimento mostram que o milho mantém sua produtividade sem maiores perdas, quando utilizamos o manejo correto, para maior sucesso dessa pesquisa precisamos fazer os estudos na cana-de-açúcar, identificando se teremos impacto na produtividade da cultura.

Conclusão

Com essa pesquisa concluímos que a utilização de *Azospirillum brasilense* reduz a emissão de CO₂ do solo quando associado a adubação nitrogenada, tendo melhor eficiência na redução quando as doses de nitrogênio são menores, e essa redução ocorre nas duas fontes (ureia e nitrato de amônio) podendo variar conforme o híbrido utilizado. A produção é incrementada pela adubação nitrogenada e pode ser mais eficiente em alguns híbridos quando utilizamos a inoculação, podendo reduzir a adubação de cobertura quando usamos ureia.

Outro ponto importante é a dinâmica das emissões de CO₂ que ocorrem com maior intensidade no início do desenvolvimento da cultura, podendo ser por influência da umidade, atividade microbiológica causada pela adubação e respiração radicular uma vez que a cultura está se desenvolvendo, esses resultados trazem elucidações para novas pesquisas.

Referências bibliográficas

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

CHOI, W.-J.; MATUSHIMA, M.; RO, H.-M. Sensitivity of Soil CO₂ Emissions to Fertilizer Nitrogen Species: Urea, Ammonium Sulfate, Potassium Nitrate, and Ammonium Nitrate. **J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem**, v. 54, n. 6, p. 1004–1007, 2011.

CONG, W. F. et al. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. **Global Change Biology**, v. 21, n. 4, p. 1715–1726, 1 abr. 2015.

GALINDO, F. S. et al. Improving Sustainable Field-Grown Wheat Production With *Azospirillum brasilense* Under Tropical Conditions: A Potential Tool for Improving Nitrogen Management. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, 17 fev. 2022.

GALINDO, F. S. et al. Impact of nitrogen fertilizer sustainability on corn crop yield: the role of beneficial microbial inoculation interactions. **BMC Plant Biology**, v. 24, n. 1, 1 dez. 2024.

GUI, D. et al. Effects of intercropping on soil greenhouse gas emissions - A global meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 918, 25 mar. 2024.

HUNGRIA, M. et al. Improving maize sustainability with partial replacement of N fertilizers by inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 5, p. 2969–2980, 1 set. 2022.

JOÃO DE DEUS GOMES DOS SANTOS JUNIOR et al. Consórcio de Cana-de-açúcar com Milho: recomendações de manejo para a região do Cerrado. **EMBRAPA**, n. 1517– 0187, out. 2020.

LI, C. et al. Syndromes of production in intercropping impact yield gains. **Nature Plants**, v. 6, n. 6, p. 653–660, 1 jun. 2020.

LI, Z. et al. Soil CO₂ emission reduction with no-tillage and medium nitrogen fertilizer applications in semi-humid maize cropland in North China Plain. **European Journal of Agronomy**, v. 147, 1 jul. 2023.

LOPES BHERING, L. Rbio: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform Rbio: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform SOFTWARE/DEVICE RELEASE. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 17, p. 187–190, 2017.

MOTA NETO, L. V. DA et al. Insights on soil carbon cycling in intercropped maize-forage systems as affected by nitrogen. **Geoderma**, v. 449, 1 set. 2024.

MUNJONJI, L. et al. Seasonal dynamics of soil CO₂ emissions from different semi-arid land-use systems. **Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science**, v. 74, n. 1, 2024.

R PILLAY, B. A. et al. **INTERCROPPING SUGARCANE WITH MAIZE Treatments F 0 D Mean SE CV (%) F Cane (t/ha) Sugar (t/ha)**. [s.l: s.n.].

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of azospirillum brasilense strains ab-v5 and ab-v6 on the brazilian agriculture: Lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 45, 2021.

SILVA, P. S. T. et al. Azospirillum brasilense Inoculation in a Maize–Urochloa–Rice Cropping System Promotes Soil Chemical and Biological Changes and Increases Productivity. **Crops**, v. 4, n. 2, p. 211–226, 4 jun. 2024.

TEODORO, P. E. et al. Soil CO₂ emissions under different land-use managements in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, 1 jan. 2024.

YOSHIURA, C. A. et al. Responses of Low-Cost Input Combinations on the Microbial Structure of the Maize Rhizosphere for Greenhouse Gas Mitigation and Plant Biomass Production. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 30 jun. 2021.

ZHANG, S. et al. In arid regions, the different intercropping systems reduce interspecific competition to improve system productivity. **Plant and Soil**, 2024.

ZHANG, Y. et al. Ethephon Reduces Maize Nitrogen Uptake but Improves Nitrogen Utilization in Zea mays L. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 11 jan. 2022.