

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

RENATO NUNES VAEZ

**A INTERAÇÃO GENÓTIPOS X AMBIENTES IMPACTA A EMISSÃO DE  
CO<sub>2</sub> DO SOLO EM MILHO?**

CHAPADÃO DO SUL - MS

2025

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

RENATO NUNES VAEZ

**A INTERAÇÃO GENÓTIPOS X AMBIENTES IMPACTA A EMISSÃO DE  
CO<sub>2</sub> DO SOLO EM MILHO?**

Orientador: Dr. PAULO EDUARDO TEODORO

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

2025



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



**DISCENTE:** Renato Nunes Vaez

**ORIENTADOR:** Dr. Paulo Eduardo Teodoro

### **AVALIADORES**

Dr. Paulo Eduardo Teodoro

Dra. Larissa Pereira Ribeiro Teodoro

Dr. Rafael Ferreira Barreto

**TÍTULO:** A interação genótipos x ambientes impacta a emissão de CO<sub>2</sub> do solo em milho?

NOTA  
MÁXIMA  
NO MEC

UFMS  
É 10!!!



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Eduardo Teodoro, Professor do Magisterio Superior**, em 06/12/2024, às 15:00, 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 **Larissa Pereira Ribeiro, Professora do Magistério Superior**, em 06/12/2024, às 15:01, 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 06/12/2024, às 15:04, 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](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufms.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador 5294311 e o código CRC 534AF2E4.

**COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio, incentivo e colaboração de muitas pessoas, às quais expresso minha profunda gratidão.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Eduardo Teodoro, pela orientação, paciência e confiança ao longo de todo o processo.

À Dra. Dthenifer Cordeiro Santana, por toda a ajuda prestada, e aos professores e colegas que contribuíram direta ou indiretamente com suas sugestões, críticas e auxílio durante a realização da pesquisa.

Por último, mas não menos importante, agradeço a Deus, por me conceder a oportunidade de lutar diariamente pelos meus objetivos, e à minha família, por estarem sempre ao meu lado, oferecendo apoio e amor incondicionais.

A todos, o meu muito obrigado!

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Localização geográfica das áreas experimentais.....                                                                                                                                             | 10 |
| <b>Figura 2.</b> Emissão <i>in situ</i> de CO <sub>2</sub> (FCO <sub>2</sub> ) para cada genótipo de milho em função dos ambientes avaliados ao longo do ciclo de cada genótipo.....                             | 21 |
| <b>Figura 3.</b> Análise de componentes principais da emissão <i>in situ</i> de CO <sub>2</sub> (FCO <sub>2</sub> ), temperatura do solo (TS) e umidade do solo (UMD) para os genótipos, ambientes e épocas..... | 22 |
| <b>Figura 4.</b> Correlação de Pearson para emissão <i>in situ</i> de CO <sub>2</sub> (FCO <sub>2</sub> ), temperatura do solo (TS) e umidade do solo (UMD) para os genótipos.....                               | 24 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Características ambientais e propriedades do solo avaliadas nos diferentes ambientes.....                                                                         | 11 |
| <b>Tabela 2.</b> Resumo da análise de variância para a emissão <i>in situ</i> de CO <sub>2</sub> (FCO <sub>2</sub> ), temperatura do solo (TS) e umidade do solo (UMD).....        | 12 |
| <b>Tabela 3.</b> Desdobramento para a interação entre genótipo e ambiente para a emissão <i>in situ</i> de CO <sub>2</sub> (FCO <sub>2</sub> ) na primeira época de avaliação..... | 13 |
| <b>Tabela 4.</b> Desdobramento para a interação entre genótipo e ambiente para a temperatura do solo (TS) na primeira época de avaliação.....                                      | 14 |
| <b>Tabela 5.</b> Desdobramento para a interação entre genótipo e ambiente para umidade do solo (UMD) na primeira época de avaliação.....                                           | 15 |
| <b>Tabela 6.</b> Desdobramento para a interação entre genótipo e ambiente para a emissão <i>in situ</i> de CO <sub>2</sub> (FCO <sub>2</sub> ) na segunda época de avaliação.....  | 16 |
| <b>Tabela 7.</b> Desdobramento para a interação entre genótipo e ambiente para temperatura do solo (TS) na segunda época de avaliação.....                                         | 17 |
| <b>Tabela 8.</b> Desdobramento para a interação entre genótipo e ambiente para umidade do solo (UMD) na segunda época de avaliação.....                                            | 18 |
| <b>Tabela 9.</b> Desdobramento para a interação entre genótipo e ambiente para a emissão <i>in situ</i> de CO <sub>2</sub> (FCO <sub>2</sub> ) na terceira época de avaliação..... | 19 |
| <b>Tabela 10.</b> Desdobramento para a interação entre genótipo e ambiente para temperatura do solo (TS) na terceira época de avaliação.....                                       | 20 |
| <b>Tabela 11.</b> Desdobramento para a interação entre genótipo e ambiente para umidade do solo (UMD) na terceira época de avaliação.....                                          | 22 |

## RESUMO

A pesquisa buscou entender a variabilidade do fluxo de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em solos cultivados com diferentes híbridos de milho, os objetivos incluem estimar  $\text{FCO}_2$ , umidade e temperatura do solo, avaliar a relação entre estas variáveis e os genótipos de milho. Foram utilizados 5 genótipos de milho na segunda safra de 2024 em 4 ambientes diferentes sendo avaliados dois ambientes no Mato Grosso do Sul e dois em Goiás, durante três estágios fenológicos da cultura, onde as variáveis analisadas foram, fluxo de  $\text{CO}_2$  ( $\text{FCO}_2$ ), umidade e temperatura do solo. As emissões de  $\text{CO}_2$  do solo ( $\text{FCO}_2$ ) foram medidas no local com o sistema portátil EGM-5, em 10 pontos por genótipo. As emissões de  $\text{CO}_2$  do solo variaram conforme os genótipos de milho e os ambientes do cerrado brasileiro. A interação genótipo-ambiente mostrou que alguns genótipos, como G1 e G3, apresentaram menores emissões. Variáveis como temperatura e umidade do solo influenciaram o fluxo de  $\text{CO}_2$ . A seleção de genótipos específicos para o cerrado emerge como uma abordagem promissora para mitigar as emissões de  $\text{CO}_2$  na agricultura.

**Palavra-chave:** Fluxo de  $\text{CO}_2$ , genótipos de milho, análises de componentes principais e neutralização de carbono.

## ABSTRACT

The research sought to understand the variability of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) flow in soils cultivated with different corn hybrids, the objectives include estimating FCO<sub>2</sub>, soil moisture and temperature, evaluating the relationship between these variables and corn genotypes. Five maize genotypes were used in the second harvest of 2024 in four different environments, with two environments in Mato Grosso do Sul and two in Goiás being evaluated during three phenological stages of the crop, where the variables analyzed were CO<sub>2</sub> flow (FCO<sub>2</sub>), soil moisture and temperature. Soil CO<sub>2</sub> emissions (FCO<sub>2</sub>) were measured on site with the EGM-5 portable system, at 10 points per genotype. Soil CO<sub>2</sub> emissions varied according to corn genotypes and environments in the Brazilian cerrado. The genotype-environment interaction showed that some genotypes, such as G1 and G3, had lower emissions. Variables such as temperature and soil moisture influenced CO<sub>2</sub> flow. The selection of specific genotypes for the cerrado emerges as a promising approach to mitigating CO<sub>2</sub> emissions in agriculture.

**Key words:** CO<sub>2</sub> flux, maize genotypes, principal component analysis, carbon neutralization.



## **SUMÁRIO**

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| <b>INTRODUÇÃO</b>                 | 10 |
| <b>MATERIAL E MÉTODOS</b>         | 11 |
| <b>RESULTADOS</b>                 | 13 |
| <b>DISCUSSÃO</b>                  | 25 |
| <b>CONCLUSÃO</b>                  | 27 |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> | 27 |

## INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas mais importantes no Brasil, desempenhando um papel importante na economia do país. O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de milho do mundo, sendo essencial para a alimentação humana e animal, além de ser um componente indispensável em várias indústrias. No Brasil, a produção de milho ocupa uma posição de destaque na economia agrícola. Para maximizar a produtividade e garantir a sustentabilidade das lavouras, é fundamental adotar uma estratégia diversificada no plantio, utilizando vários híbridos de milho. Esta abordagem oferece uma série de vantagens que vão desde a mitigação de riscos até a otimização do uso de recursos (EMBRAPA, 2022).

A substituição de áreas de vegetação nativa pela agricultura pode levar a alterações nas características físicas, químicas e biológicas do solo, desencadeando um desequilíbrio na dinâmica de deposição de matéria orgânica, o que consequentemente aumenta a emissão de carbono na forma de gases para a atmosfera (ASSUNÇÃO et al., 2019; ROSSET et al., 2014; SALES et al., 2018). A emissão e o transporte de CO<sub>2</sub> no solo são influenciados por uma variedade de processos físicos e bioquímicos. A taxa de liberação de CO<sub>2</sub> varia temporal e espacialmente, dependendo das condições ambientais, das características do solo e das práticas de manejo agrícola. A temperatura e a umidade do solo são os principais fatores que controlam a emissão de CO<sub>2</sub> do solo, especialmente quando se considera a variabilidade temporal. Esses parâmetros influenciam os processos metabólicos de organismos vivos, bem como as reações bioquímicas no solo e na atmosfera (BRITO et al., 2010).

Genótipos adaptados às condições locais, como o cerrado brasileiro, tendem a apresentar maior estabilidade nas emissões de CO<sub>2</sub>, independentemente das variações climáticas, devido à sua resiliência e compatibilidade com o ambiente (AZEVEDO et al., 2021). A quantidade e composição dos exsudatos radiculares variam entre cultivares, influenciando diretamente a atividade microbiana e as emissões de CO<sub>2</sub>. Cultivares com raízes mais profundas ou densas podem aumentar a respiração do solo (GAO et al., 2020).

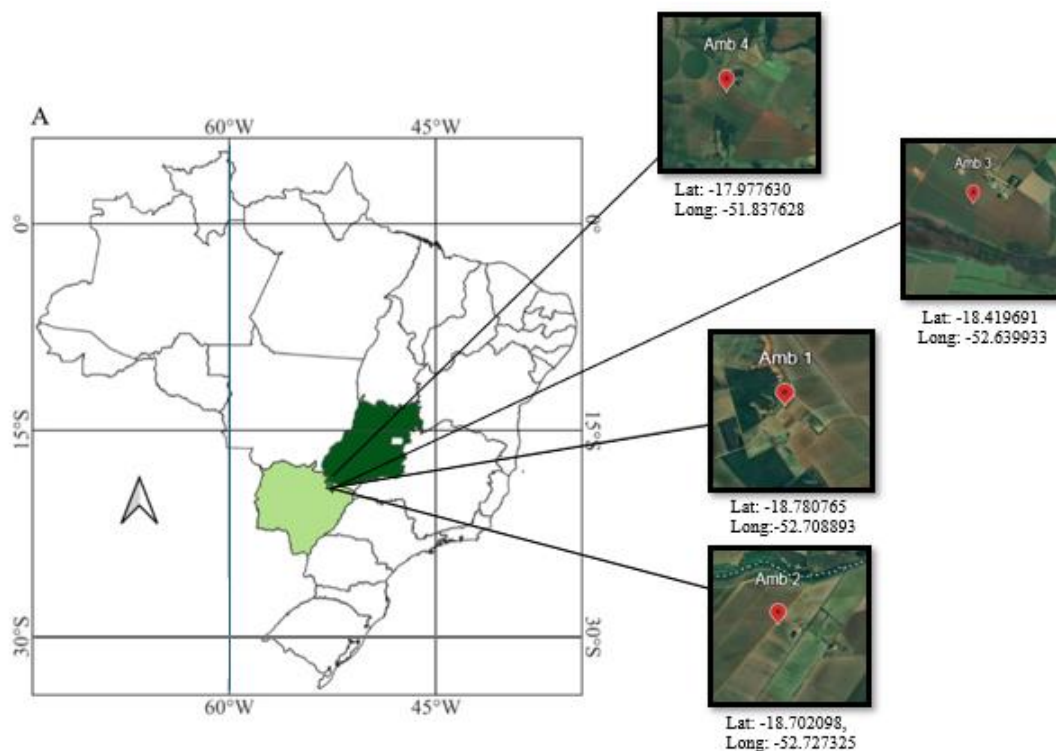
A busca por balanço positivo de carbono no cultivo de milho é essencial para promover a sustentabilidade ambiental e combater as mudanças climáticas. Assim, entender a dinâmica do fluxo de CO<sub>2</sub> em solos cultivados com diferentes genótipos é crucial para a adoção de estratégias que contribuam para atender às demandas estaduais e internacionais de desenvolvimento sustentável e carbono zero. A hipótese dessa pesquisa é que o fluxo de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>) é variável entre os híbridos de milho. Os objetivos incluem estimar FCO<sub>2</sub>, umidade e temperatura do solo, avaliar a relação entre estas variáveis e os genótipos de milho e consequentemente contribuir para ações de neutralização de carbono no bioma cerrado.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

A pesquisa foi realizada nos estados do Mato Grosso do Sul e Goiás, situados na região Centro-Oeste do Brasil. Somado, os dois apresentam uma extensão de 697.248,79 km<sup>2</sup> e 324 municípios, essa região apresenta uma rica variedade de características edafoclimáticas. As altitudes no Mato Grosso do Sul apresentam uma variação considerável, variando de 24 a 1000 metros acima do nível do mar, enquanto as altitudes de Goiás variam de 200 a 1.605 metros.

Foram avaliados dois ambientes Amb1 e Amb2 no Mato Grosso do Sul e Amb3 e Amb4 em Goiás.



**Figura 1.** Localização geográfica das áreas experimentais.

Ambos os ambientes compreenderam áreas de cultivo de cinco genótipos de milho comerciais em segunda safra e com histórico de cultivo em sucessão entre plantio direto de soja e milho superior a dez anos.

Nessas áreas, as avaliações ocorreram durante três fases da cultura sendo a primeira em estágio vegetativo V4, aproximadamente 40 dias após emergência, a segunda avaliação no estágio reprodutivo R1, 80 dias após a emergência e a terceira em pré-colheita, 118 dias após a emergência no estágio R6.

Tabela 1. Características ambientais e propriedades do solo avaliadas nos diferentes ambientes.

|                              | Amb1  | Amb2  | Amb3  | Amb4 |
|------------------------------|-------|-------|-------|------|
| Altitude (m)                 | 820   | 810   | 812   | 783  |
| Pluviosidade (mm)            | 540,4 | 570   | 554   | 754  |
| Textura (g/dm <sup>3</sup> ) | 535   | 567   | 554,5 | 589  |
| M.O (g/dm <sup>3</sup> )     | 33,75 | 34,72 | 39,03 | 35,2 |

### Variáveis avaliadas

Para avaliações de emissão de CO<sub>2</sub> do solo *in situ* (FCO<sub>2</sub>), o sistema portátil EGM-5 (PP-System, Amesbury, EUA), modelo AGA560, foi usado em 10 pontos para cada genótipo por avaliação. O sistema EGM-5 tem sido utilizado para aquisição de dados *in-situ* em estudos publicados recentemente (HONG et al., 2023; LIU et al., 2023; YERLI & SAHIN, 2023; WITCOMBE et al., 2023). Este equipamento monitora as variações da concentração de CO<sub>2</sub> no interior da câmara de solo através de espectroscopia de absorção ótica na região espectral do infravermelho (ACS041). A câmara de solo é um sistema fechado com volume interno de 854,2 cm<sup>3</sup> e área de contato circular de 83,7 cm<sup>2</sup>, que foi acoplada a colares de PVC inseridos com 24 horas de antecedência no solo em cada ponto. Este procedimento decorre do facto de a inserção direta da câmara no solo poder provocar perturbações que causam emissões adicionais de CO<sub>2</sub> do solo.

O FCO<sub>2</sub> foi medido em cada ponto de amostragem através do ajuste da concentração de CO<sub>2</sub> do ar no interior da câmara de acordo com uma regressão quadrática ao longo do tempo após o seu fecho e do desvio da água. O procedimento de medição para avaliar as emissões de CO<sub>2</sub> do solo leva 30 segundos em cada ponto e a pressão barométrica no interior da câmara foi calculada a cada 1,0 segundo, totalizando 30 leituras por ponto de amostragem. O FCO<sub>2</sub> (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) foi calculado de acordo com a equação abaixo proposta por Parkinson (1981):

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

Em que: dC é a variação da concentração de CO<sub>2</sub> (ppm); dT é o tempo de execução do processo (1 segundo); P é a pressão barométrica medida (mbar); T é a temperatura do ar em °C; V é o volume da câmara EGM-5 (m<sup>3</sup>); A é a área dos anéis de PVC instalados no solo (m<sup>2</sup>).

A umidade do solo foi registada utilizando um dispositivo sensor HydraProbe (Stevens), que consiste numa sonda com três hastes de 12 cm que é inserida no interior do solo

perpendicularmente à superfície, também a 5 cm dos colares de PVC. A temperatura do solo foi medida nos mesmos pontos de coleta, monitorada usando um sensor de temperatura que é um componente integral do sistema. O valor da umidade do solo é obtido a partir do tempo que uma corrente eléctrica demora a percorrer 32 mm de uma haste para outra. A avaliação da umidade do solo e temperatura foram efetuadas em conjunto com as avaliações das emissões de CO<sub>2</sub> do solo.

### Análise estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância realizada no software Rbio e para as variáveis avaliadas teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Posteriormente, foi realizada análise de componentes principais para verificar a inter-relação entre o fluxo de CO<sub>2</sub>, umidade, temperatura do solo e as variáveis avaliadas no software R. Por fim, foi construído um scatterplot contendo a correlação de Pearson entre as variáveis.

## **RESULTADOS**

A interação entre os genótipos e os ambientes foi significativa para a emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo nos três estádios fenológicos do milho (Tabela 2).

Tabela 2. Resumo da análise de variância para os quadrados médios das variáveis emissão in situ de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>), temperatura do solo (TS) e umidade do solo (UMD).

| V4           |     |                  |         |           |
|--------------|-----|------------------|---------|-----------|
| FV           | GL  | FCO <sub>2</sub> | TS      | UMD       |
| Genótipo (G) | 4   | 0.71             | 81.13*  | 213*      |
| Ambiente (A) | 3   | 2.14             | 11.85*  | 10829.33* |
| G × A        | 12  | 3.53*            | 172.11* | 169.67*   |
| Resíduo      | 171 | 1.37             | 0.80    | 17.29     |
| CV           |     | 32.66            | 3.22    | 20.13     |
| R1           |     |                  |         |           |
| FV           | GL  | FCO <sub>2</sub> | TS      | UMD       |
| Genótipo (G) | 4   | 4.09*            | 6.23*   | 56.35*    |

|              |     |                  |          |         |
|--------------|-----|------------------|----------|---------|
| Ambiente (A) | 3   | 21.66*           | 616.43*  | 243.13* |
| G × A        | 12  | 2.24*            | 15.21*   | 63.21*  |
| Resíduo      | 171 | 1.14             | 0.03     | 9.9     |
| CV           |     | 34.96            | 0.65     | 32.34   |
| R6           |     |                  |          |         |
| FV           | GL  | FCO <sub>2</sub> | TS       | UMD     |
| Genótipo (G) | 4   | 0.52*            | 99.35*   | 54.63*  |
| Ambiente (A) | 3   | 4.59*            | 1775.37* | 1862.2* |
| G × A        | 12  | 0.33*            | 101.82*  | 59.23*  |
| Resíduo      | 171 | 0.124567         | 22.95    | 0.37    |
| CV           |     | 37.41            | 21.43    | 14.15   |

FV: fonte de variação; CV: coeficiente de variação; GL: graus de liberdade

A interação genótipo\*ambiente manteve-se significativa, o que reforça a ideia de que a resposta à emissão de CO<sub>2</sub> foi dependente tanto do ambiente quanto do genótipo em uso. Para temperatura e umidade do solo na (Tabela 2 em V4, R1 e R6), a interação genótipo\*ambiente foi significativa, indicando que os efeitos combinados de ambiente e genótipo influenciaram fortemente a temperatura e umidade do solo.

Na Tabela 3 o genótipo G1 apresentou valores de FCO<sub>2</sub> constantes em Amb1 e Amb2, o que indica que não houve diferença significativa entre esses ambientes.

Tabela 3. Desdobramento para a interação significativa entre genótipo e ambiente para a variável fluxo de CO<sub>2</sub> (g m<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), na primeira época de avaliação.

| Genótipo | Amb1    | Amb2    | Amb3    | Amb4    |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| G1       | 2,89 aB | 3,21 aB | 4,14 aA | 4,30 aA |
| G2       | 3,70 aA | 3,06 aA | 2,99 bA | 3,78 aA |
| G3       | 3,40 aA | 3,60 aA | 4,61 aA | 3,40 aA |
| G4       | 3,95 aA | 3,27 aA | 3,32 bA | 3,79 aA |
| G5       | 4,42 aA | 3,48 aA | 2,67 bB | 3,79 aA |

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

No entanto, em Amb3 e Amb4, G1 apresentou valores significativamente maiores, indicando que o genótipo G1 teve valores maiores de FCO<sub>2</sub> nesses ambientes. Em Amb1 e Amb4, G2 apresentou valores semelhantes, sem diferenças significativas entre esses ambientes, em Amb2 e Amb3, G2 apresentou valores menores. Para Amb3, sugere-se que G2 teve uma resposta inferior à dos outros genótipos nesse ambiente.

O G3 apresentou valores de FCO<sub>2</sub> relativamente altos em todos os ambientes, com médias variando entre 3,40 (Amb1 e Amb4) e 4,61 (Amb3). Não houve diferença significativa entre os ambientes para este genótipo. Para G4, os valores de FCO<sub>2</sub> foram semelhantes em Amb1, Amb2, e Amb4, sem diferença significativa entre esses ambientes.

Em Amb3, indica uma menor emissão de CO<sub>2</sub>, sugerindo que o genótipo G4 foi menos eficiente ou adaptado nesse ambiente em comparação com os demais. G5 apresentou a maior emissão de CO<sub>2</sub> em Amb1, significativamente superior ao observado em Amb3, onde indica uma baixa emissão de CO<sub>2</sub> em comparação aos outros genótipos nesse ambiente. Em Amb2 e Amb4, os valores foram intermediários (3,48 e 3,79), sem diferença significativa entre esses ambientes.

Na Tabela 4, o G1 apresentou um comportamento variável em diferentes ambientes, com uma temperatura do solo significativamente maior em Amb3, comparado aos outros ambientes. Em Amb1 e Amb2, G1 teve temperaturas próximas, sugerindo que esses ambientes não apresentaram diferenças significativas entre si, com temperaturas mais moderadas. Em Amb4, G1 teve a menor temperatura, significativamente inferior aos outros ambientes, o que indica uma forte influência ambiental nesse genótipo específico.

Tabela 4. Desdobramento para a interação significativa entre genótipo e ambiente para a variável temperatura do solo (°C) na primeira época de avaliação.

| Genótipo | Amb1     | Amb2     | Amb3     | Amb4     |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| G1       | 27,24 bB | 27,44 bB | 31,50 aA | 17,17 dC |
| G2       | 27,81 aB | 27,95 bB | 29,91 bA | 28,27 cB |
| G3       | 27,79 aB | 28,41 bB | 28,94 cA | 29,44 bA |
| G4       | 28,25 aC | 29,20 aB | 28,31 cC | 31,25 aA |
| G5       | 26,40 cC | 29,67 aB | 19,40 dD | 31,80 aA |

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

Para o G2 teve valores mais estáveis ao longo dos ambientes. O G3 apresentou

temperaturas estáveis, com pouca variação entre os ambientes, especialmente em Amb1 e Amb2, apresentando maior valor em Amb3. Em Amb3 e Amb4, G3 teve valores próximos, as temperaturas foram significativamente menores em Amb2 e Amb1. O G4 apresentou variações significativas em diferentes ambientes. Em Amb1 e Amb2, as temperaturas foram próximas, mas significativamente menores do que em Amb4, onde G4 apresentou uma das maiores temperaturas. Em Amb3, a temperatura foi um pouco menor, sugerindo uma adaptação menos eficiente neste ambiente. Para G5 mostrou o comportamento mais extremo e variável entre os genótipos. Em Amb4, a temperatura foi a mais alta entre todos os genótipos.

No entanto, em Amb3, G5 apresentou a menor temperatura, indicando uma queda drástica e um comportamento sensível às condições deste ambiente. Em Amb1 e Amb2, os valores foram intermediários, mas com diferenças significativas entre eles.

Na Tabela 5, o G1 apresentou alta umidade do solo em Amb1 e Amb3, não houve diferença significativa entre esses dois ambientes, ambos com altos valores de umidade. No entanto, em Amb2 e Amb4, a umidade do solo foi significativamente menor, especialmente em Amb2, onde o valor foi o menor entre todos os ambientes.

Para o G2 apresentou comportamento variável, com a menor umidade em Amb2 e a maior em Amb3, onde o valor foi significativamente elevado. Em Amb1, G2 apresentou uma umidade intermediária, enquanto em Amb4 o valor foi de 14,51, o que também foi intermediário, sugerindo uma melhor adaptação em Amb4 do que outros genótipos. O G3 apresentou a maior umidade do solo em Amb3, indicando uma performance superior neste ambiente em relação aos outros genótipos.

Tabela 5. Desdobramento para a interação significativa entre genótipo e ambiente para a variável umidade do solo (%) na primeira época de avaliação.

| Genótipo | Amb1     | Amb2    | Amb3     | Amb4     |
|----------|----------|---------|----------|----------|
| G1       | 38,31 aA | 2,89 aC | 37,14 bA | 8,33 bB  |
| G2       | 27,40 cB | 5,37 aD | 34,62 bA | 14,51 aC |
| G3       | 29,15 bB | 4,22 aD | 41,68 aA | 9,91 bC  |
| G4       | 31,15 bB | 5,01 aD | 37,76 bA | 31,15 aB |
| G5       | 25,60 cA | 4,25 aC | 26,59 cA | 11,05 bB |

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



Em Amb1, a umidade foi também relativamente alta, embora inferior a G1 no mesmo ambiente. Em Amb2 e Amb4, G3 apresentou valores mais baixos de umidade, mostrando uma sensibilidade à falta de umidade nesses ambientes. O G4 manteve uma umidade do solo relativamente alta em Amb1 e Amb3, indicando boa capacidade de retenção de umidade nestes ambientes. Em Amb4, G4 também manteve uma umidade elevada.

Em Amb2, a umidade foi significativamente menor. O G5 apresentou umidade moderada em Amb1 e Amb3, com valores semelhantes, embora mais baixos que os outros genótipos nesses ambientes. Em Amb2 e Amb4, G5 apresentou umidade significativamente menor, indicando um comportamento inferior em ambientes mais secos.

Na Tabela 6, o G1 apresentou a maior emissão de CO<sub>2</sub> em Amb4. Em Amb1, Amb2 e Amb3, os valores foram mais baixos, sugerindo uma menor atividade biológica e metabolismo nesses ambientes. O G2 teve um comportamento estável ao longo dos ambientes.

Tabela 6. Desdobramento para a interação significativa entre genótipo e ambiente para a variável fluxo de CO<sub>2</sub> (g m<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), na segunda época de avaliação.

| Genótipo | Amb1    | Amb2    | Amb3    | Amb4    |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| G1       | 2,68 bB | 2,16 aB | 3,19 aB | 4,17 bA |
| G2       | 2,40 bA | 2,21 aA | 2,82 aA | 3,29 bA |
| G3       | 2,60 bA | 2,59 aA | 2,64 aA | 3,52 bA |
| G4       | 3,93 aA | 2,39 aB | 3,06 aB | 3,62 bA |
| G5       | 3,41 aB | 2,52 aB | 2,78 aB | 5,19 aA |

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

O G3 também apresentou valores de FCO<sub>2</sub> estáveis em Amb1, Amb2, e Amb3 e Amb4, mas novamente inferior a G1 e G5. O G4 apresentou a maior emissão de CO<sub>2</sub> em Amb1 e Amb4 sendo Amb1 o valor mais elevado entre todos os genótipos neste ambiente. Isso sugere que, em Amb1, G4 favorece uma maior atividade biológica e decomposição de matéria orgânica. Em Amb2 e Amb3, os valores foram mais baixos, mostrando uma queda significativa.

O G5 teve uma emissão de CO<sub>2</sub> significativamente maior em Amb4, sendo o valor mais alto registrado entre todos os genótipos e ambientes. Isso indica uma alta atividade biológica no solo nesse ambiente. Nos outros ambientes, a emissão foi menor: Amb1, Amb2, e Amb3, o G5

responde mais favoravelmente em Amb4. Na Tabela 7 o G1 apresentou a maior temperatura do solo em Amb4, indicando que esse genótipo influenciou um aumento significativo na temperatura nesse ambiente. Nos outros ambientes, as temperaturas foram progressivamente menores.

Tabela 7. Desdobramento para a interação significativa entre genótipo e ambiente para a variável temperatura do solo (°C) na segunda época de avaliação.

| Genótipo | Amb1     | Amb2     | Amb3     | Amb4     |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| G1       | 23,53 dD | 26,76 aC | 28,89 aB | 29,32 eA |
| G2       | 24,37 cC | 21,35 dD | 28,67 bB | 29,79 dA |
| G3       | 25,15 bC | 21,00 eD | 28,75 bB | 30,10 cA |
| G4       | 26,01 aC | 22,42 cD | 27,94 cB | 31,40 bA |
| G5       | 26,06 aC | 22,77 bD | 26,95 dB | 31,86 aA |

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

Para G2 apresentou a maior temperatura do solo também em Amb4, e a menor em Amb2. O G3 apresentou a maior temperatura do solo em Amb4 e a menor em Amb2. O G4 também apresentou a maior temperatura em Amb4, e a menor em Amb2. Para G5 apresentou a maior temperatura do solo em Amb4, e a menor em Amb2. Em Amb1 e Amb3, as temperaturas foram mais baixas.

Na Tabela 8, o G1 apresentou uma maior umidade do solo em Amb1, Amb2 e Amb4, indicando uma resposta estável e alta umidade nesses ambientes. Em Amb3, a umidade foi significativamente menor, sugerindo uma redução significativa da umidade do solo.

O G2 apresentou a maior umidade do solo em Amb2 e Amb1. Em Amb3 e Amb4, as umidades foram menores. O G3 apresentou a maior umidade do solo em Amb1 e uma umidade significativamente menor em Amb2. Em Amb3 e Amb4, a umidade foi relativamente baixa, mas sem diferença estatística de Amb2. Para G4 apresentou uma umidade do solo significativamente alta em Amb2, a maior umidade registrada entre todos os genótipos e ambientes. No entanto, em Amb1, Amb3, e Amb4, as umidades foram muito menores. O G5 teve sua maior umidade em Amb2 e umidade significativamente menor em Amb1. Em Amb3 e Amb4, a umidade também foi reduzida.

Tabela 8. Desdobramento para a interação significativa entre genótipo e ambiente para a variável umidade do solo (%) na segunda época de avaliação.

| Genótipo | Amb1     | Amb2     | Amb3    | Amb4     |
|----------|----------|----------|---------|----------|
| G1       | 12,67 aA | 11,87 aA | 7,47 aB | 11,34 aA |
| G2       | 11,23 aA | 13,41 aA | 8,96 aB | 9,31 aB  |
| G3       | 12,84 aA | 9,30 bB  | 8,73 aB | 9,08 aB  |
| G4       | 6,18 bB  | 14,72 aA | 2,24 bC | 8,89 aB  |
| G5       | 6,53 bB  | 13,37 aA | 8,46 aB | 7,90 aB  |

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

O G2 apresentou a maior umidade do solo em Amb2 e Amb1. Em Amb3 e Amb4, as umidades foram menores. O G3 apresentou a maior umidade do solo em Amb1 e uma umidade significativamente menor em Amb2. Em Amb3 e Amb4, a umidade foi relativamente baixa, mas sem diferença estatística de Amb2. Para G4 apresentou uma umidade do solo significativamente alta em Amb2, a maior umidade registrada entre todos os genótipos e ambientes. No entanto, em Amb1, Amb3, e Amb4, as umidades foram muito menores. O G5 teve sua maior umidade em Amb2 e umidade significativamente menor em Amb1. Em Amb3 e Amb4, a umidade também foi reduzida.

Na Tabela 9, o G1 apresentou a maior emissão de CO<sub>2</sub> em Amb3, indicando um aumento significativo da respiração do solo nesse ambiente. Em Amb1, Amb4, e Amb2, as emissões foram menores. Para G2 apresentou emissões mais estáveis, com valores relativamente baixos em todos os ambientes, sendo a maior emissão em Amb1, Amb4 e Amb3. Em Amb2, a emissão foi a menor entre todos os ambientes e genótipos.

O G3 apresentou a maior emissão de CO<sub>2</sub> em Amb3, sendo a maior emissão de toda a tabela. Com Amb1 e Amb4 sem diferença estatística e Amb2, as emissões foram menores. G4 apresentou a maior emissão de CO<sub>2</sub> em Amb4 e Amb3. Em Amb1 e Amb2, as emissões foram menores. G5 apresentou a maior emissão de CO<sub>2</sub> em Amb3, seguida por Amb4. Em Amb1 e Amb2, as emissões foram menores. Em Amb1, Amb4, e Amb2, as emissões foram menores. Para G2 apresentou emissões mais estáveis, com valores relativamente baixos em todos os ambientes, sendo a maior emissão em Amb1, Amb4 e Amb3. Em Amb2, a emissão foi a menor entre todos os ambientes e genótipos.

O G3 apresentou a maior emissão de CO<sub>2</sub> em Amb3, sendo a maior emissão de toda a tabela. Com Amb1 e Amb4 sem diferença estatística e Amb2, as emissões foram menores. G4

apresentou a maior emissão de CO<sub>2</sub> em Amb4 e Amb3. Em Amb1 e Amb2, as emissões foram menores.

Tabela 9. Desdobramento para a interação significativa entre genótipo e ambiente para a variável fluxo de CO<sub>2</sub> (g m<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), na terceira época de avaliação.

| Genótipo | Amb1    | Amb2    | Amb3    | Amb4    |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| G1       | 0,96 aB | 0,62 aB | 1,22 bA | 0,87 bB |
| G2       | 0,91 aA | 0,47 aB | 0,90 cA | 0,87 bA |
| G3       | 1,05 aB | 0,52 aC | 1,77 aA | 1,05 bB |
| G4       | 0,84 aB | 0,57 aB | 1,22 bA | 1,32 aA |
| G5       | 0,75 aC | 0,62 aC | 1,35 bA | 1,00 bB |

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

G5 apresentou a maior emissão de CO<sub>2</sub> em Amb3, seguida por Amb4. Em Amb1 e Amb2, as emissões foram menores. Em Amb2, a emissão foi a menor entre todos os ambientes e genótipos. O G3 apresentou a maior emissão de CO<sub>2</sub> em Amb3, sendo a maior emissão de toda a tabela. Com Amb1 e Amb4 sem diferença estatística e Amb2, as emissões foram menores. G4 apresentou a maior emissão de CO<sub>2</sub> em Amb4 e Amb3. Em Amb1 e Amb2, as emissões foram menores. G5 apresentou a maior emissão de CO<sub>2</sub> em Amb3, seguida por Amb4. Em Amb1 e Amb2, as emissões foram menores.

Na Tabela 10, o G1 apresentou a maior temperatura em Amb4, indicando uma resposta mais forte a esse ambiente. Em Amb1 e Amb3, a temperatura foi significativamente mais baixa. Para G2 teve temperaturas mais consistentes entre os ambientes, com a maior temperatura em Amb4 sem diferença estatística entre Amb2 e Amb1 e a menor em Amb3.

O G3 apresentou sua maior temperatura em Amb4 e a menor em Amb3. O G4 teve a maior temperatura do solo em Amb4, a mais alta da tabela. Em Amb1 e Amb2, as temperaturas foram intermediárias, enquanto em Amb3, a temperatura foi mais baixa. O G5 apresentou uma alta temperatura em Amb4 e uma baixa temperatura em Amb3.

Tabela 10. Desdobramento para a interação significativa entre genótipo e ambiente para a variável temperatura do solo (°C) na terceira época de avaliação

| Genótipo | Amb1     | Amb2     | Amb3     | Amb4     |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| G1       | 17,20 cC | 25,10 aB | 20,43 aC | 33,13 aA |
| G2       | 20,78 bA | 21,10 aA | 16,56 aB | 24,01 bA |
| G3       | 21,76 bB | 21,10 aB | 11,73 bC | 28,30 bA |
| G4       | 22,99 bB | 22,40 aB | 14,02 bC | 35,54 aA |
| G5       | 26,83 aB | 23,00 aB | 13,20 bC | 30,86 aA |

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

Na Tabela 11, o G1 apresentou a maior umidade em Amb2, indicando um ambiente mais úmido. Em Amb3 e Amb4, a umidade foi significativamente mais baixa. O G2 apresentou a maior umidade também em Amb2, enquanto em Amb1 a umidade foi significativamente menor.

Tabela 11. Desdobramento para a interação significativa entre genótipo e ambiente para a variável umidade do solo (%) na terceira época de avaliação

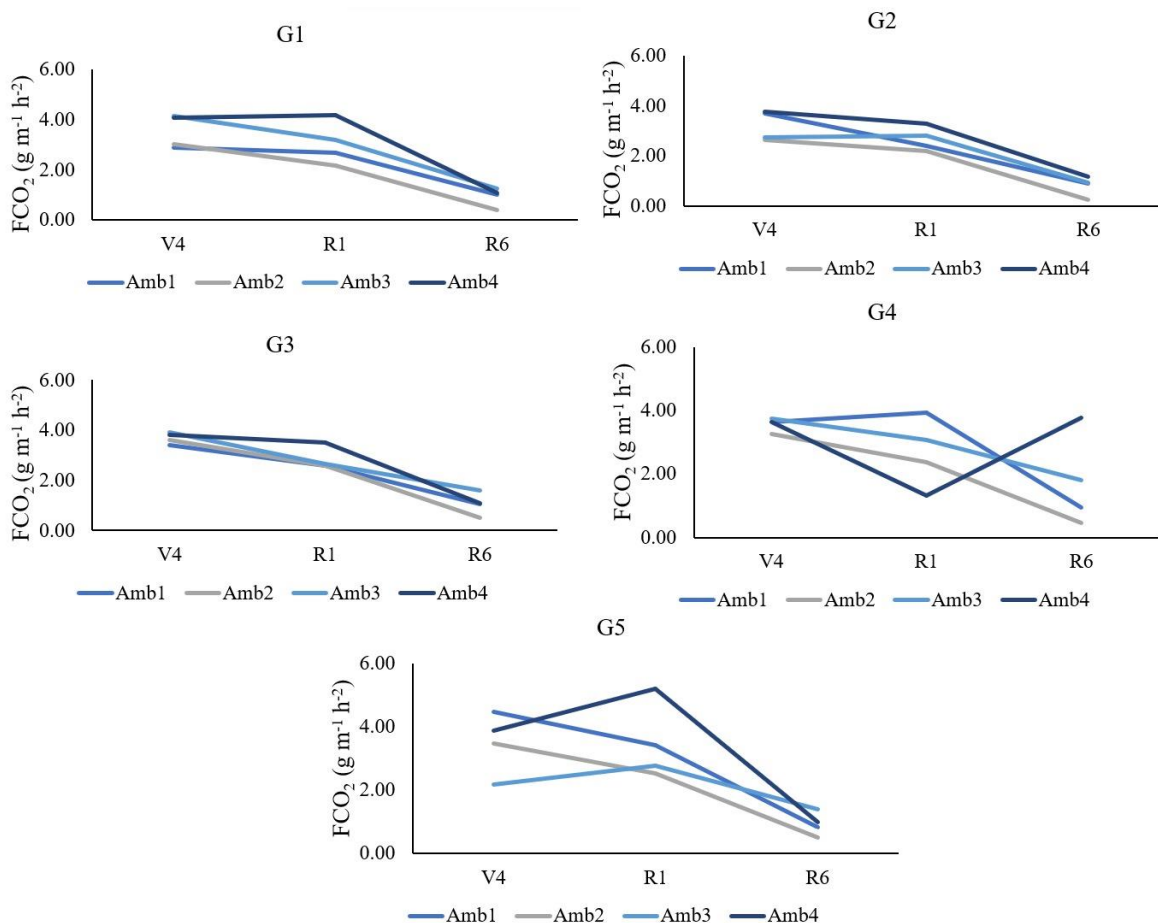
| Genótipo | Amb1    | Amb2     | Amb3    | Amb4    |
|----------|---------|----------|---------|---------|
| G1       | 1,63 aB | 11,13 cA | 0,17 cC | 0,48 cC |
| G2       | 1,03 aC | 8,59 dA  | 2,67 aB | 2,82 aB |
| G3       | 1,47 aB | 10,96 cA | 0,25 cC | 0,35 cC |
| G4       | 1,27 aC | 17,35 bA | 0,64 bD | 2,46 aB |
| G5       | 1,47 aB | 19,20 aA | 0,77 bC | 1,30 bB |

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

Para G3 teve uma alta umidade em Amb2, enquanto em Amb3 e Amb4, os valores foram baixos. O G4 apresentou a maior umidade em Amb2 e a menor em Amb4 e Amb3. G5 apresentou a maior umidade em Amb2, a maior registrada na tabela. Em Amb4, a umidade mais baixa.

A variação na resposta dos genótipos ao ambiente (Figura 1), indica que genótipos como G1 e G3 tem um desempenho melhor em situações em que os recursos e fatores necessários para o pleno desenvolvimento da planta são oferecidos, enquanto outros (como G2 e G4) têm um comportamento mais estável, com variações menores nas emissões. Na segunda época de

avaliação, percebe-se uma redução geral nas emissões de CO<sub>2</sub> em comparação com a primeira época, com exceções pontuais: G1 manteve emissões mais altas no ambiente 4, enquanto a emissão foi menor nos ambientes 1 e 2. G2, G3 e G4 mostraram comportamentos mais consistentes entre os ambientes, com variações menores em relação à primeira época. G2, por exemplo, apresentou emissões relativamente semelhantes em todos os ambientes, com ligeira queda no ambiente 1.

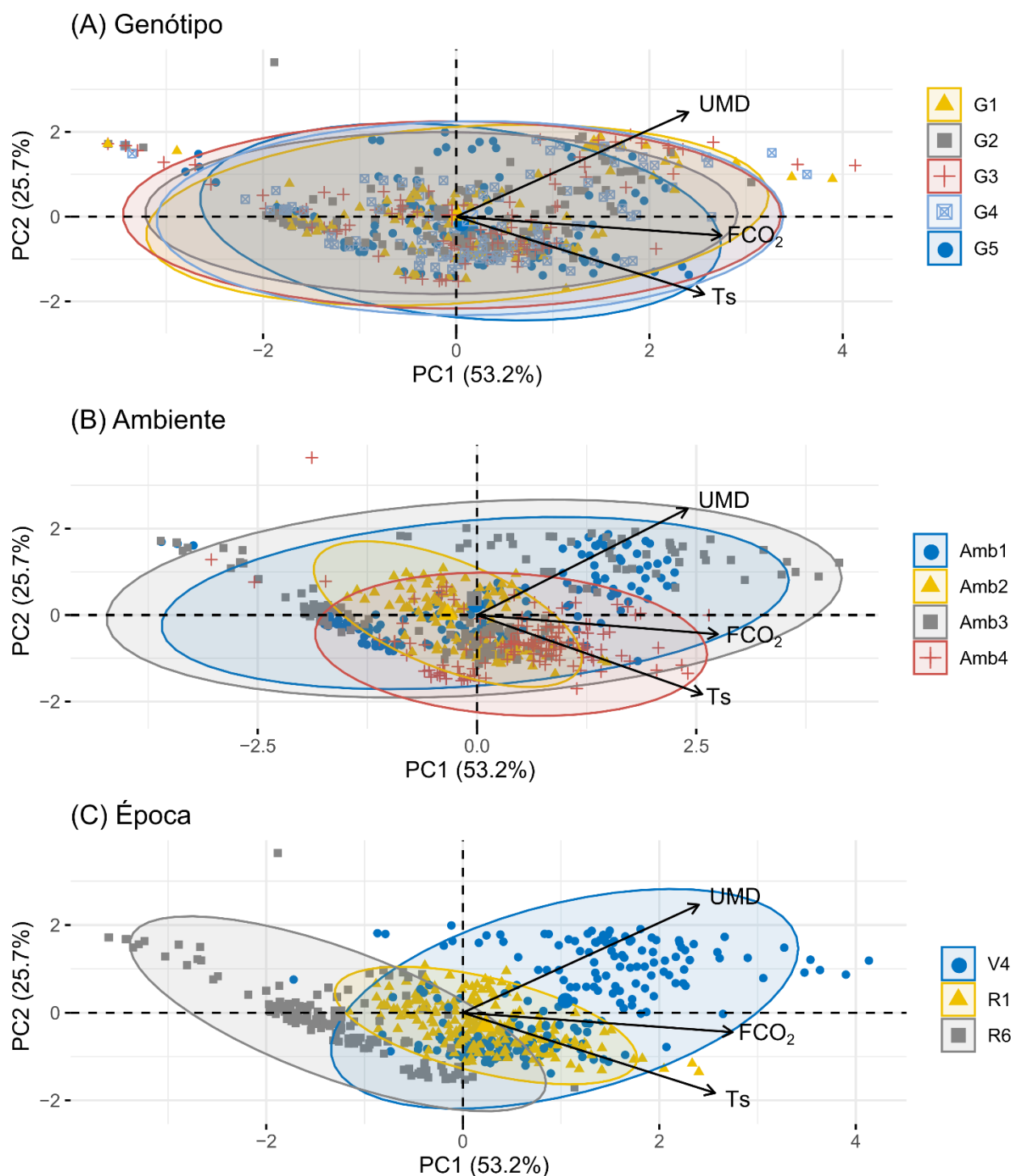


**Figura 2.** Emissão *in situ* de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>) para cada genótipo de milho em função dos ambientes avaliados ao longo do ciclo de cada genótipo.

G5 destacou-se no ambiente 4 com um valor significativamente mais alto, mostrando uma tendência de aumento em ambientes mais favoráveis. G1, G2, G3 e G4 apresentam emissões relativamente baixas, dependendo do ambiente. Indicando uma desaceleração na atividade biológica do solo ou uma resposta dos genótipos a condições ambientais menos favoráveis. G5 manteve-se com emissões um pouco mais elevadas no ambiente 3 em comparação aos outros genótipos, mas também apresentou uma diminuição geral.

Na Figura 2A, observa-se que a variável FCO<sub>2</sub> é representada por uma seta que aponta para a direita, indicando que as amostras distribuídas nessa direção apresentam

maior correlação com a emissão de CO<sub>2</sub>. O genótipo G5 apresenta forte associação com a variável UMD, característica é predominante nesse grupo. O genótipo G1 apresenta uma influência mais equilibrada das variáveis, enquanto o G2 demonstra leve proximidade com FCO<sub>2</sub>, sugerindo relação positiva com essa variável.



**Figura 3.** Análise de componentes principais variáveis emissão *in situ* de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>), temperatura do solo (Ts) e umidade do solo (UMD) para os genótipos avaliados, ambientes e época.

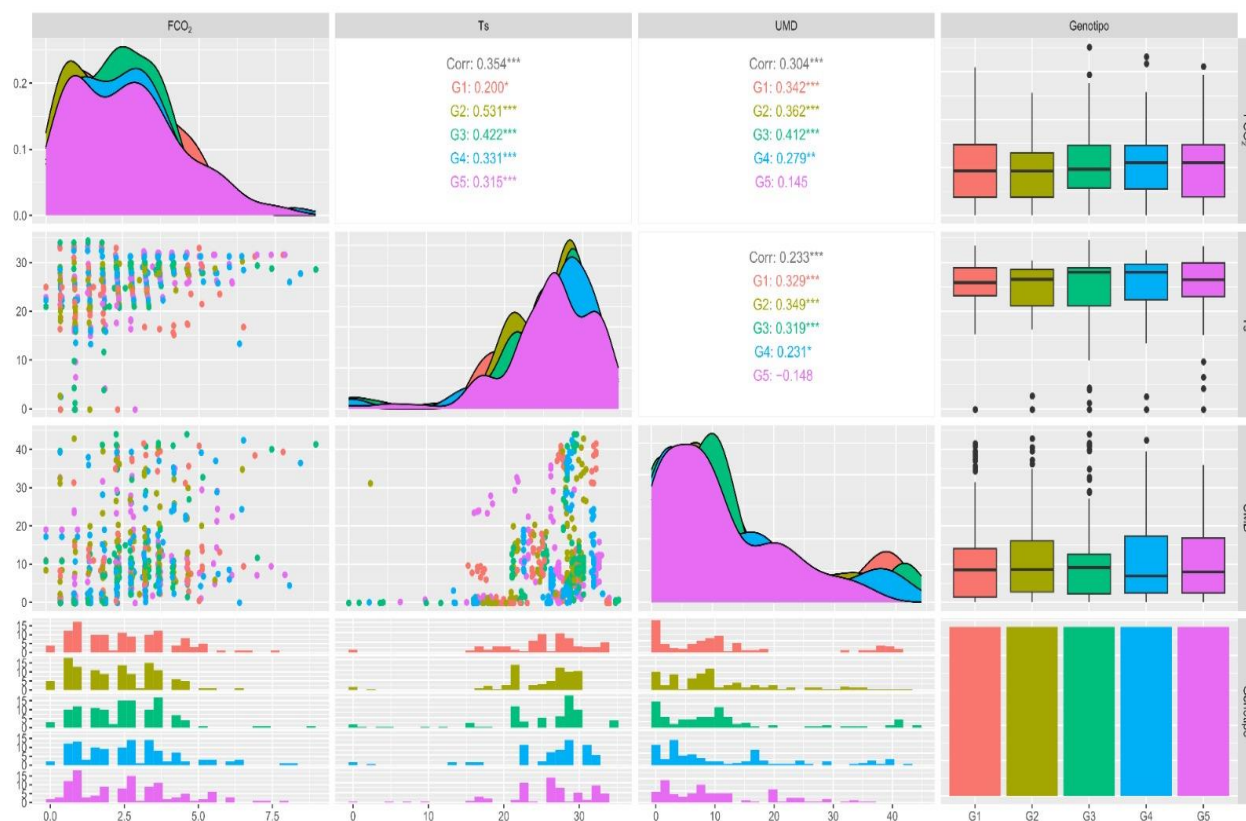
O genótipo G3 apresenta maior variabilidade interna, com uma tendência de associação tanto com  $\text{FCO}_2$  quanto com  $T_s$ . O G4 se destaca por sua maior dispersão e menor associação às variáveis analisadas, indicando características distintas.

O gráfico presente na (Figura 3B) mostram que Amb1 e Amb3 tem maiores dispersões em relação aos demais, tendo mais influência na umidade do solo, o Amb4 apresenta uma proximidade com a temperatura do solo. Amb2 tem uma dispersão menor dos dados, apresentando maior proximidade de temperatura do solo. Para épocas de avaliação, V4 e R6 apresentam maior dispersão dos dados, com V4 apresentando maior correlação com a umidade do solo. Os diferentes grupos de pontos, representados por formas e cores distintas presentes nos gráficos da (Figura 3), correspondem a diferentes genótipos e épocas. As elipses ao redor dos pontos indicam a dispersão dos dados, com uma maior variação entre alguns genótipos. A direção da seta de  $\text{FCO}_2$  sugere que os genótipos posicionados mais à direita apresentam maiores valores de emissão de  $\text{CO}_2$ .

A Figura 4 mostra as relações entre fluxo de  $\text{CO}_2$  ( $\text{FCO}_2$ ), temperatura do solo ( $T_s$ ), umidade do solo (UMD) e genótipo de milho. A temperatura e a umidade do solo têm correlações positivas com  $\text{FCO}_2$ , indicando que aumentos nesses fatores estão associados a maiores emissões de  $\text{CO}_2$ . A correlação de Pearson indicou que a emissão de  $\text{CO}_2$  possui uma relação positiva com a temperatura do solo, genótipos como G5 apresentaram uma correlação mais baixa, sugerindo menor dependência da temperatura para a liberação de  $\text{CO}_2$ . A relação entre  $\text{FCO}_2$  e UMD foi menos expressiva. No entanto, genótipos como G3 e G2 indicaram maior sensibilidade à umidade do solo, enquanto G5 apresentou um comportamento inverso, sugerindo que, neste caso, a umidade elevada pode reduzir a emissão de  $\text{CO}_2$ . Esses resultados indicam que a influência da umidade nas emissões é mais complexa e pode depender de condições específicas ou do nível de adaptação de cada genótipo.

A análise dos boxplots reforçou as diferenças entre os genótipos. G2 se destacou por apresentar maior mediana de emissão de  $\text{CO}_2$ , enquanto G5 teve os valores mais baixos, refletindo uma possível menor atividade metabólica ou maior eficiência no uso dos recursos ambientais. A variação na temperatura do solo foi menos pronunciada entre os genótipos, mas G3 apresentou maior dispersão, indicando maior variabilidade térmica. Em relação à umidade, G5 apresentou os menores valores médios, enquanto G3 mostrou os maiores, evidenciando respostas distintas às condições de umidade.





**Figura 4.** Correlação de Pearson para as variáveis emissão in situ de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>), temperatura do solo (TS) e umidade do solo (UMD) para os genótipos avaliados

## DISCUSSÃO

A produtividade do milho varia significativamente com mudanças ambientais, como regime de irrigação e condições de solo, o que faz com que diferentes genótipos apresentem desempenhos variados dependendo do ambiente de cultivo (MA et al., 2024). Para a segunda e terceira época de avaliação os ambientes, genótipos e interação foram significativas reforçando a ideia que o uso do solo está ligado a emissão de CO<sub>2</sub> (ROSSI et al., 2023).

A temperatura do solo mostrou que tanto o ambiente quanto o Genótipo foram fatores altamente significativos em todas as três épocas de avaliação (V4, R1 e R6). Segundo Guilherme et al. (2020) a cobertura do solo tem uma relação de forte impacto substancial na variação da temperatura. A interação entre genótipo e ambiente também foi significativa nas três épocas de avaliação o que reforça que a combinação dos dois fatores influenciou fortemente as temperaturas observadas. A temperatura do solo é afetada pelas características específicas de cada ambiente e pela estrutura do solo em várias profundidades, com implicações diretas para práticas agrícolas, destacando a importância de monitorar essas interações para prever mudanças climáticas regionais e otimizar o manejo ambiental (ZEYNODDIN et al., 2023).

A umidade do solo é diretamente influenciada pelas condições climáticas, que variam ao

longo das estações e épocas do ano. Em V4, tanto o ambiente quanto o genótipo influenciaram significativamente esta variável, com a interação entre ambos também sendo relevante. Em R1, esses fatores mantiveram significância, mas em menor magnitude. Em R6, ambiente novamente demonstrou uma influência significativa, enquanto o genótipo teve um efeito reduzido, mas a interação continuou a ser importante. Isso confirma a influência combinada de ambiente e genótipo nas diferentes camadas de umidade do solo devido ao uso agrícola (YAN, X. et al. 2023).

Os genótipos como G1 e G3 tem uma interação com ambiente enquanto genótipos como G2, G4 e G5 são mais estáveis onde, a estabilidade indica a capacidade dos genótipos apresentarem comportamento previsível, em função do estímulo do ambiente (CARGNELUTTI FILHO; GUADAGNIN, 2018). Fator explicado devido a interação genótipo\*ambiente, onde há distintas respostas dos genótipos cultivados em diferentes condições de cultivo. Na segunda época de avaliação em R1 foi observada uma diminuição geral na emissão de CO<sub>2</sub> fator explicado devido a umidade e temperatura do solo afetados por índices pluviométricos, que são fatores limitantes para a emissão de CO<sub>2</sub> (LÓPEZ-SANTIAGO et al., 2023). As exceções pontuais podem ser explicadas devido as características físicas e químicas do solo influenciarem a emissão de CO<sub>2</sub> dependendo do seu uso e manejo (SINGH et al., 2018).

Outro fator que pode influenciar o fluxo de CO<sub>2</sub> no solo é o desenvolvimento das raízes de cada genótipo, principalmente daquelas que penetram mais no solo contribuindo para estabilizar o teor de umidade no solo por mais tempo e reduzir sua temperatura (HINSINGER et al. 2009; VILLANUEVA-LÓPEZ et al. 2016; MANAYE et al. 2021). A penetração das raízes no solo expande os poros existentes e forma novos, que podem regular o fluxo de água (SIX et al. 2004, BRONICK e LAL 2005). Além disso, as raízes contêm certos níveis de água e produzem exsudatos, consequentemente aumentando a umidade do solo (HINSINGER et al. 2009). Os genótipos respondem de formas distintas às mudanças que acontecem nos ambientes (RAMALHO; SANTOS; PINTO, 2008), exemplificado na figura 1 com G5 no ambiente 4 onde se destacou com um valor mais alto de FCO<sub>2</sub>. A variação na emissão de CO<sub>2</sub> pode ser explicada também devido ao regime de chuva de cada ambiente pois a temperatura e umidade do solo influenciam as emissões de CO<sub>2</sub>, especialmente após a chuva. A água expulsa o CO<sub>2</sub> dos poros, aumentando momentaneamente as emissões, que depois diminuem devido à barreira de água que impede a troca gasosa. Quando a água evapora ou desce para camadas mais profundas, os poros ficam livres, e as emissões aumentam novamente (ZANCHI et al., 2003; PANOSSO et al., 2007).

A ligação positiva entre a TS e a FCO<sub>2</sub> (Figura 3) indica que o aumento da temperatura do solo pode impulsionar as emissões de CO<sub>2</sub>, possivelmente por causa da maior atividade microbiana em temperaturas altas (SHAH et al., 2024). Este efeito pode ser específico do

Genótipo, evidenciando-se na mudança das correlações entre os genótipos. A relação entre a umidade do solo e o  $\text{FCO}_2$  é mais complexa. Em certas situações, elevadas taxas de umidade podem diminuir a difusão de  $\text{CO}_2$  por causa da saturação dos poros do solo. Por outro lado, a umidade pode estimular processos bioquímicos que potencializam a produção de  $\text{CO}_2$ . A diferenciação nas correlações entre genótipos mostra que as características físicas e químicas específicas de cada um têm um papel importante (ALÍRIO et al 2013). A interação entre ambiente e genótipo revelou que certos materiais produzem menores emissões de  $\text{CO}_2$ , sugerindo que a escolha de genótipos específicos pode contribuir para uma agricultura mais sustentável e para a mitigação das mudanças climáticas

## CONCLUSÃO

As emissões de  $\text{CO}_2$  no solo variam significativamente em função dos genótipos de milho e dos diferentes ambientes do cerrado brasileiro. As variáveis temperatura e umidade do solo mostraram-se determinantes para o fluxo de  $\text{CO}_2$ , reforçando a importância de práticas de manejo que levem em consideração as condições ambientais locais. Genótipos como G1 e G3 apresentaram menores reações as variações ambientais, o que indica seu potencial para uso em estratégias de sequestro de carbono no bioma cerrado. Esses resultados apontam para a relevância de selecionar genótipos adaptados às condições do cerrado como parte de uma abordagem integrada para reduzir as emissões de  $\text{CO}_2$  da agricultura brasileira.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G.; ROSSET, J. S.; BERBARA, R. L. L.; GARCÍA, A. C. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. *Science of The Total Environment*, v. 658, p. 901–911, 2019.
- AZEVEDO, A. C.; SANTOS, R. F.; OLIVEIRA, R. F. Genotype-environment interactions and their effects on CO<sub>2</sub> emissions. *Brazilian Journal of Agronomy*, 2021.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, v. 124, p. 3–22, 2005.
- Brito, L. de F., Marques Júnior, J., Pereira, G.T., La Scala Junior, N., 2010. Spatial variability of soil CO<sub>2</sub> emission in different topographic positions. *Bragantia* 69, 19–27. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000500004>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; GUADAGNIN, J. P. Sufficient number of experiments for the adaptability and stability analyses of maize using the Eberhart and Russell method. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 53, n. 6, p. 673–683, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2018000600003>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- FILHO, I. A. P.; BORGHI, E. Cultivares de milho para a safra 2022/2023. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2022. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 272). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1150188/1/Documentos-272-Cultivares-de-milho-para-safra-2022-2023.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2024.
- GAO, Y.; ZHANG, Y.; GAO, H.; et al. Root exudates drive soil carbon dynamics: implications for carbon sequestration and agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, 2020.
- GUILHERME, A. P.; BIUDES, M. S.; MOTA, D. dos S.; MUSIS, C. R. D. Relationship between soil cover type and surface temperature. *Sociedade & Natureza*, v. 32, p. 515–525, 2020.
- HINSINGER, P.; BENGOUGH, A. G.; VETTERLEIN, D.; YOUNG, I. M. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant Soil*, v. 321, p. 117–152, 2009.
- HONG, J.; KIM, H.; LEE, W.; et al. Fault-related basins as carbon reservoirs: soil CO<sub>2</sub> emissions in the SE Korean Peninsula. *CATENA*, v. 231, 107300, 2023.
- LAIRD, D. A.; CHANG, C. W. Impactos de longo prazo da colheita de resíduos na qualidade do solo. v. 134, p. 33–40, 2013.
- LIU, Y.; LIN, J.; YUE, H. Soil respiration estimation in desertified mining areas based on UAV remote sensing and machine learning. *Earth Science Informatics*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01094-5>. Acesso em: 18 nov. 2024.

- LÓPEZ-SANTIAGO, J. G.; VILLANUEVA-LÓPEZ, G.; CASANOVA-LUGO, F.; et al. Sistemas pecuários com árvores dispersas em piquetes reduzem os fluxos de CO<sub>2</sub> do solo em comparação com a monocultura de gramíneas nos trópicos úmidos. *Agroforest Systems*, v. 97, p. 209–221, 2023.
- MA, C.; LIU, C.; YE, Z. Influence of genotype × environment interaction on yield stability of maize hybrids with AMMI Model and GGE Biplot. *Agronomy*, v. 14, n. 5, p. 1000, 2024.
- NETO, A. T. F.; JUNIOR, M.; TAPAJÓS, R.; et al. Influência da umidade no efluxo de CO<sub>2</sub> do solo para atmosfera em uma área de floresta primária, Belterra. *Revista Ciência e Natura*, Santa Maria, p. 25–27, 2013.
- PANOSSO, A. R.; SCALA, J. N. L.; PEREIRA, G. T.; ZANINI, J. R. Uso de krigagem ordinária e co-krigagem para estimar a emissão de CO<sub>2</sub> do solo após molhamento. In: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2007
- RAMALHO, M. A. P.; SANTOS, J. B.; PINTO, C. A. B. P. Genética na agropecuária. Lavras: Ed. UFLA, 2008. 464 p.
- ROSSET, J. S.; LANA, M. D. C.; PEREIRA, M. G.; et al. Carbon stock, chemical and physical properties of soils under management systems with different deployment times in western region of Paraná, Brazil. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 35, p. 3053, 2014.
- ROSSI, F. S.; LA SCALA, N.; CAPRISTO-SILVA, G. F.; et al. Implications of CO<sub>2</sub> emissions on the main land and forest uses in the Brazilian Amazon. *Environmental Research*, v. 227, 115729, 2023.
- RUTKOWSKA, B.; SZULC, W.; SOSULSKI, T.; et al. Impact of reduced tillage on CO<sub>2</sub> emission from soil under maize cultivation. *Soil & Tillage Research*, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016719871830117X>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- SALES, A.; RESENDE SILVA, A.; ALBERTO COSTA VELOSO, C.; et al. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia legal. *Colloquium Agrariae*, v. 14, p. 1–15, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5747/ca.2018.v14.n1.a185>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- SHAH, A.; HUANG, J.; HAN, T.; et al. Impact of soil moisture regimes on greenhouse gas emissions, soil microbial biomass, and enzymatic activity in long-term fertilized paddy soil. *Environmental Science Europe*, v. 36, 120, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00943-4>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- SINGH, M.; SARKAR, B.; SARKAR, S.; et al. Estabilização do carbono orgânico do solo influenciada pela mineralogia da argila. *Advances in Agronomy*, v. 148, p. 33–84, 2018.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, v. 79, p. 7–31, 2004.

VILLANUEVA-LÓPEZ, G.; CASANOVA-LUGO, F.; MARTÍNEZ-ZURIMENDI, P.; et al. Effect of live fences of *Gliricidia sepium* on CO<sub>2</sub> fluxes in tropical livestock systems. *Soil Use and Management*, v. 32, n. 4, p. 553–564, 2016.

YAN, X.; et al. Characteristics of soil moisture under different vegetation coverage in Horqin Sandy Land, northern China. *PLOS ONE*, 2023.

YANG, X.; MENG, J.; LAN, Y.; et al. Effects of maize stover and its biochar on soil CO<sub>2</sub> emissions and labile organic carbon fractions in Northeast China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880917300646>. Acesso em: 18 nov. 2024.

YERLI, C.; SAHIN, U. Pre-sowing soil carbon dioxide emissions of the following year from the silage maize field irrigated with different levels of wastewater in conventional and direct sowing practices. *Journal of Water and Climate Change*, v. 14, p. 1358–1370, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.012>. Acesso em: 18 nov. 2024.

WITCOMBE, A. M.; TIEMANN, L. K.; CHIKOWO, R.; et al. Diversifying with grain legumes amplifies carbon in management-sensitive soil organic carbon pools on smallholder farms. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 356, 108611, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108611>. Acesso em: 18 nov. 2024.

ZANCHI, F. B.; ROCHA, H. R.; KRUIJT, B.; et al. Medição do efluxo de CO<sub>2</sub> do solo: monitoramento com câmaras automáticas sobre floresta e pastagem em Rondônia. In: VI CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 2003, Fortaleza. Anais... Fortaleza: [s.n.], 2003. p. 631–632.

ZEYNODDIN, M.; BONAKDARI, H.; GUMIERE, S. J.; et al. Previsão multitemporal de dados de temperatura do solo: aplicação em Quebec, Canadá. *Sustentabilidade*, v. 15, p. 9567, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15129567>. Acesso em: 18 nov. 2024.