

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

VISCOSIDADE DA SOLUÇÃO E RESPIRAÇÃO SOLO

Arianis Ibeth Santos Nicolella

**Engenheira em Manejo de Bacias
Hidrográficas e Ambiente**

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

VISCOSIDADE DA SOLUÇÃO E RESPIRAÇÃO DO SOLO

Arianis Ibeth Santos Nicolella

**Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala
Júnior**

**Co-orientador: Prof. Dr. Alan Rodrigo
Panosso**

**Dissertação, apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,
Câmpus de Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).**

N642v

Nicolella, Arianis Ibeth Santos

Viscosidade da solução e respiração do solo / Arianis Ibeth Santos Nicolella. -- Jaboticabal, 2023

41 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Newton La Scala Júnior.

Coorientador: Alan Rodrigo Panosso

1. Metabolismo do solo. 2. Mudanças climáticas. 3. Captura de carbono. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

REGISTRO DE IMPACTO

O estudo envolve um novo conhecimento até agora não abordado sobre as saídas de CO₂ do solo microbiano. O que contribui na geração de estratégias mais eficientes de uso e manejo do solo que visem aumentar a captura e armazenamento de carbono orgânico no solo, assim como diminuições das saídas de CO₂, atendendo assim o objetivo 13 de Desenvolvimento sustentável, sobre adaptação e mitigação das mudanças climáticas.

IMPACT RECORD

The study involves new knowledge that so far was not addressed about the CO₂ outputs of the microbial soil. This contributes to the generation of more efficient strategies for soil use and management aimed at increasing the capture and storage of organic carbon in the soil, as well as decreases in CO₂ outputs, thus meeting the objective 13 of Sustainable Development, on adaptation and mitigation of climate change.

REGISTRO DE IMPACTO

El estudio involucra un nuevo conocimiento hasta ahora no abordado sobre las salidas de CO₂ del suelo microbiano. Contribuyendo a la generación de estrategias más eficientes de uso y manejo de suelo dirigidas a aumentar la captura y almacenamiento de carbono orgánico y la disminución de emisiones de CO₂, atendiendo el objetivo 13 de Desarrollo Sostenible, sobre adaptación y mitigación del cambio climático.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: VISCOSIDADE DA SOLUÇÃO E RESPIRAÇÃO DO SOLO

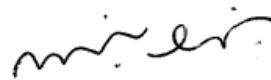
AUTORA: ARIANIS IBETH SANTOS NICOLELLA

ORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR

COORIENTADOR: ALAN RODRIGO PANOSSO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas DECEEx / FCAV UNESP Jaboticabal

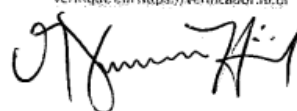


Prof. Dr. EDUARDO BARRETTO DE FIGUEIREDO (Participação Virtual)
Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR / São Carlos/SP

gov.br

Documento assinado digitalmente
EDUARDO BARRETTO DE FIGUEIREDO
Data: 28/02/2023 08:52:32-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal



Jaboticabal, 27 de fevereiro de 2023

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

Arianis Ibeth Santos Nicolella, Filha de Amilcar Santos e Vielka Nicolella, nasceu em 23 de setembro de 1994, na cidade de David, província de Chiriquí, Panamá. Todos os seus estudos foram realizados na educação pública de seu país, começando na “*Escuela Bilingue José María Roy*” desde os cinco até os doze anos e no “*Colegio Instituto David*” desde os 13 até 18 anos. No ano de 2018 formou-se em Engenharia em manejo de bacias hidrográficas e ambiente na “*Facultad de Ciencias Agropecuarias*” da “*Universidad de Panamá*”. Durante seus estudos universitários fez parte de grupos, como “*Reforestando Centroamérica*” e a “*Red de Jóvenes por el agua de Centroamérica*”. No ano de 2018, integrou parte da “*Primera academia de jóvenes sobre cambio climático en Panamá*”. No ano de 2019, atuou como coordenadora chefe no estabelecimento de café orgânico no Distrito de “*Tierras Altas*” na empresa TRONCOGRIS INC. No mesmo ano, prestou a convocatória de bolsas para Doutorado em Ciências Agrárias da “*Secretaria Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación*” (SENACYT) de Panamá, para cursar estudos no exterior. Posteriormente, no ano de 2020, foi contemplada com a bolsa e em 2021 ingressou no Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista, em Jaboticabal, São Paulo.

DEDICO

Á meus pais, Amilcar Santos Rivera e Vielka Iris Nicolella, minha irmã Daneth Cristina Santos Nicolella, minha amada sobrinha Alice Rangel Santos e meu avô Marcel Gaitan, vocês são minha principal inspiração e motivação.

OFEREÇO

Aos futuros leitores, jovens pesquisadores. Cujo esforço é de grande importância para o desenvolvimento da ciência, assim como também um meio ambiente e setor agrícola mais sustentável. É possível!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que tem sido minha fortaleza a cada dia neste processo de formação acadêmico e profissional.

Aos meus pais, Amilcar Santos e Vielka Nicolella; minha irmã e sobrinha Daneth Santos e Alice Rangel, que tem sido meus pilares e principal motivação.

Ao Joseph Kaled Grajales Cedeño, meu noivo, cujo apoio abrangeu o emocional, prático e intelectual.

Ao meu orientador, professor Dr. Newton La Scala Júnior, por sua paciência em todos os momentos e pelo apoio acadêmico e ensinamentos. Sua orientação e apoio, que superaram as diferentes distâncias, culturas e idiomas.

Ao meu co-orientador, professor Dr. Alan Rodrigo Panosso, pelo seu carisma, paciência e contribuições no desenvolvimento deste estudo.

Ao professor Dr. Glauco de Souza Rolim pela disponibilidade da área do experimento.

Aos professores e membros da banca de defesa, Dr. Marcilio Vieira Martins Filho e Dr. Eduardo Barretto de Figueiredo que disponibilizaram seu tempo para contribuir com esta pesquisa.

Aos funcionários da Estação agrometeorológica da FCAV, Carlos Alberto Santa Capita e Vanessa Sayury Nakata Corrêa Santa Capita, pelo apoio, carinho e cuidado durante todo o período do estudo, tanto para mim como para os colegas que contribuíram dia a dia nos trabalhos de campo.

À professora Dra. Luciana Maria Saran do Departamento de Biotecnologia Agropecuária e Ambiental da FCAV, pôr o fornecimento de equipamentos de laboratório para o teste de viscosidade.

Aos colegas e pessoas que contribuíram para o levantamento deste projeto: Kleve Canteral por seu importante apoio em todos os trabalhos de campo e sua contribuição intelectual em cada fase do estudo, assim como seu acolhimento e carinho que fizeram meu caminho no mestrado mais alegres. A Wanderson Benerval de Lucena por sua contribuição na formulação do projeto apesar da distância e contribuição nas análises estatísticas. Também agradeço a Maria Elisa Vicentini cujo apoio intelectual no funcionamento dos equipamentos e análises estatísticas neste estudo superou as barreiras da distância.

Aos demais funcionários do departamento de Engenharia e Ciências Exatas da FCAV, professores e colegas do programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo) que direta ou indiretamente contribuem com a nossa formação, obrigada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Jaboticabal, SP pelos conhecimentos transmitidos ao longo da minha formação no programa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP pelo fornecimento dos equipamentos utilizados neste estudo.

À “Secretaria de Ciencia, Tecnologia e Innovación” (SENACYT), pela concessão da bolsa de estudos.

SUMARIO

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
RESUMEN	v
LISTA DE FIGURAS	vi
1.INTRODUÇÃO	1
2.REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. O papel dos microrganismos no CO ₂ do solo	3
2.1.1. Umidade e temperatura do solo	4
2.1.2. Captura de O ₂ no solo	4
2.2. A viscosidade da solução do solo e seu papel na respiração do solo	5
2.2.1. Biopolímeros de cadeia longa e seus efeitos na viscosidade da solução do solo	6
3.MATERIAL E MÉTODOS	7
3.1. Localização e caracterização da área de estudo	7
3.2. Delineamento experimental	9
3.3. Efluxo de CO ₂ , temperatura e umidade do solo	12
3.4. Influxo de O ₂	13
3.5. Quociente respiratório	15
3.6. Lei de Stokes	15
3.7. Modificação e determinação da viscosidade da solução aplicada e lixiviada pelo solo	16
3.8. Processamento e análise dos dados	17
4.RESULTADOS	20
4.1. Variação temporal da emissão de CO ₂ , captura de O ₂ , temperatura e umidade do solo	20
4.2. Quociente respiratório	26
4.3. Viscosidade	26
4.4. Matriz de correlação de Spearman	29
5. DISCUSSÃO	31
5.1. Variabilidade temporal do FCO ₂ , U _{solo} , T _{solo} e FO ₂	31
5.2. Biopolímeros de cadeia longa e estresse hídrico	34

5.3. Quociente respiratório.....	34
5.4. Teste de viscosidade	35
6.CONCLUSÃO	36
REFERENCIAS	36

VISCOSIDADE DA SOLUÇÃO E RESPIRAÇÃO DO SOLO

RESUMO – As perdas de carbono do solo via dióxido de carbono (CO_2) são produto principalmente da respiração microbiana; no entanto, a viscosidade da solução do solo influencia na locomoção dos microrganismos. Neste estudo se propõe que a alteração da viscosidade da solução do solo interfere na respiração microbiana e conseqüentemente nos efluxos de CO_2 do solo (FCO_2). O objetivo do estudo foi avaliar o efeito da aplicação de diferentes concentrações de Polietilenoglicol 6000 (PEG6000) na FCO_2 e sua relação com variáveis climáticas e propriedades do solo. Foram aplicados quatro tratamentos a concentrações de 0, 50, 75 e 100 gramas PEG6000 por litro de água em lisímetros diferentes. Um ajuste quadrático entre tratamentos e FCO_2 mostrou que os FCO_2 dos tratamentos C_{50} , C_{75} e C_{100} foram 20,8%, 25,6% e 12,27% menores em comparação com C_0 . O ajuste quadrático nos FO_2 mostrou aumentos de 20% no tratamento C_{100} em comparação com C_0 . A umidade do solo (U_{solo}) mostrou grande influência na variabilidade da FCO_2 , C_{75} reportou a menor U_{solo} ($4,84 \pm 0,43\%$) e C_0 a maior U_{solo} ($6,23 \pm 0,56\%$). De acordo com as matrizes de correlação de Spearman, U_{solo} , temperatura do solo (T_{solo}), FO_2 e a viscosidade da solução lixiviada do solo são as propriedades do solo que contribuíram na caracterização da variabilidade dos FCO_2 nas condições deste estudo. Portanto, são variáveis importantes nos estudos de respiração do solo. Em conclusão, a modificação da viscosidade da solução do solo diminuiu os FCO_2 em doses de 50 e 75 g de PEG6000 por litro de água. A incorporação da viscosidade da solução do solo em estudos de respiração do solo pode contribuir no melhor entendimento dos processos e fatores que participam na respiração do solo, permitindo a geração de estratégias mais eficientes de uso e manejo do solo que procuram aumentar a captura de carbono orgânico.

Palavras chaves: metabolismo do solo, mudanças climáticas, captura de carbono.

SOLUTION VISCOSITY AND SOIL RESPIRATION

ABSTRACT – Soil carbon losses by the way of carbon dioxide (CO₂) are mainly a product of microbial respiration; however, the viscosity of the soil solution influences the locomotion of microorganisms. It is proposed that the change in soil solution viscosity interferes with microbial respiration and consequently in soil CO₂ (FCO₂) efflows. The aim of this study was to evaluate the effect of the application of different concentrations of Polyethylene glycol 6000 (PEG6000) in soil FCO₂ and its relationship with climatic variables and soil properties. Four treatments were applied at concentrations of 0, 50, 75 and 100 grams PEG6000 per liter of water in different lysimeters. A quadratic adjustment between treatments and FCO₂ showed that the FCO₂ of treatments C₅₀, C₇₅ and C₁₀₀ were 20.8%, 25.6% and 12.27% lower compared to C₀. Quadratic adjustment in FO₂ showed increases of 20% only in C₁₀₀ treatment compared to C₀. Usolo showed great influence on the variability of FCO₂, C₇₅ reported the lowest Usolo ($4.84 \pm 0.43\%$) and C₀ the highest Usolo ($6.23 \pm 0.56\%$). According to the correlation matrices of Spearman, Usolo, Tsolo, FO₂ and the viscosity of the soil leached solution are the soil properties that contributed to the characterization of the variability of FCO₂ in the conditions of our study, so they are important variables in soil respiration studies. In conclusion, the modification of the viscosity of the soil solution decreased the FCO₂ at doses of 50 and 75 g of PEG6000 per liter of water. The incorporation of soil solution viscosity in soil respiration studies can contribute to a better understanding of the processes and factors that participate in soil respiration, allowing the generation of more efficient soil use and management strategies that seek to increase organic carbon capture.

Keywords: soil metabolism, climate changes, carbon capture.

VISCOSIDAD DE LA SOLUCIÓN Y RESPIRACIÓN DEL SUELO

RESUMEN – Las pérdidas de carbono del suelo a través del dióxido de carbono (CO_2) son el producto principalmente de la respiración microbiana; sin embargo, la viscosidad de la solución del suelo influye en la locomoción de los microorganismos. En este estudio se propone que la alteración de la viscosidad de la solución del suelo interfiere con la respiración microbiana y, en consecuencia, con la salida de CO_2 del suelo (FCO_2). El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de diferentes concentraciones de Polietilenglicol 6000 (PEG6000) sobre el FCO_2 y su relación con variables climáticas y propiedades del suelo. Se aplicaron cuatro tratamientos a concentraciones de 0, 50, 75 y 100 gramos de PEG6000 por litro de agua en diferentes lisímetros. Un ajuste cuadrático entre tratamientos y FCO_2 mostró que el FCO_2 de los tratamientos C_{50} , C_{75} y C_{100} fue 20.8%, 25.6% y 12.27% respectivamente menor en comparación con C_0 . El ajuste cuadrático en la FO_2 mostró incrementos del 20% en el tratamiento C_{100} respecto a C_0 . La humedad del suelo (U_{solo}) mostró una gran influencia en la variabilidad del FCO_2 , C_{75} reportó el U_{solo} más bajo ($4.84 \pm 0.43\%$) y C_0 el U_{solo} más alto ($6.23 \pm 0.56\%$). Según las matrices de correlación de Spearman, U_{solo} , la temperatura del suelo (T_{solo}), la FO_2 y la viscosidad de la solución lixiviada del suelo son las propiedades del suelo que contribuyeron a la caracterización de la variabilidad del FCO_2 en las condiciones de este estudio. Por lo tanto, son variables importantes en los estudios de respiración del suelo. En conclusión, la modificación de la viscosidad de la solución del suelo disminuyó los FCO_2 a dosis de 50 y 75 g de PEG6000 por litro de agua. La incorporación de la viscosidad de la solución del suelo en los estudios de respiración del suelo puede contribuir a una mejor comprensión de los procesos y factores que participan en la respiración del suelo, permitiendo la generación de estrategias más eficientes de uso y manejo del suelo que buscan aumentar la captura de carbono orgánico.

Palavras chaves: metabolismo del suelo, cambio climático, captura de carbono.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudo. Fonte: FieldsArea Measure® (2022).....	8
Figura 2. Representação gráfica dos lisímetros utilizados no estudo.	10
Figura 3. Dados meteorológicos durante o tempo de estudo. (a) Temperatura máxima, mínima e média (°C) e a precipitação (mm). (b) Pressão atmosférica (hPa). (c) Radiação solar global (MJ m ⁻²).	11
Figura 4. Equipamento utilizado no experimento. (a) Sistema LI-8100 para medição do Efluxo de CO ₂ do solo. (b) Termômetro digital para estimação da temperatura do solo (T _{solo}). (c) TDR para avaliação da umidade do solo (U _{solo}).....	13
Figura 5. Equipamento utilizado para a medição da captura de oxigênio no solo: (a) Sensor de oxigênio UV Flux 25%. (b) Sensor acoplado no anel do solo e ao computador. (c) Software Gaslab mostrando o influxo de O ₂ em tempo real.....	14
Figura 6. Teste da viscosidade de acordo com a Lei de Stokes. (1) Monitoramento da temperatura de cada amostra a 20 °C. (2) Determinação do peso da amostra para cálculo de densidade. (3) Lanço da esfera na solução para medir o tempo em que tarda em percorrer a altura da pipeta..	17
Figura 7. Variáveis medidas no solo: Efluxo de CO ₂ (a, b), Influxo de O ₂ (c, d), Temperatura do solo (e, f) e Umidade do solo v/v (g, h) de acordo com os tratamentos (C ₀ , C ₅₀ , C ₇₅ e C ₁₀₀). A esquerda, variação temporal (média ± erro padrão da média) para cada variável estudada. A direita média dos tratamentos (média ± máximo e mínimo) para cada variável estudada.	21
Figura 8. Estimações totais no final do estudo nos quatro lisímetros aplicados de acordo com os tratamentos (0, 50, 75 e 100 gramas de PEG6000 por litro de água). (a) Emissão total de CO ₂ (ton ha ⁻¹). (b) Captura total de O ₂ (ton ha ⁻¹).....	25
Figura 9. Quociente respiratório (QR) mol mol ⁻¹ para os tratamentos C ₀ , C ₅₀ , C ₇₅ e C ₁₀₀ : (a) Variabilidade temporal do QR ao longo do estudo. (b) QR total até o final do estudo.....	26
Figura 10. Viscosidade da solução aplicada (Pa s): (a) Análise de regressão linear simples da viscosidade da solução aplicada em função dos tratamentos (média ± máximo e mínimo). (b) Análise de regressão linear simples e correlação linear de	

Pearson com nível de confiança de 95% ($p < 0,05$) para o tempo de queda (s) da esfera em função da viscosidade da solução aplicada para cada tratamento.27

Figura 11. Viscosidade da solução lixiviada por cada lisímetro: (a) Variabilidade temporal da viscosidade lixiviada para cada tratamento ao longo do estudo (média \pm erro padrão da média). (b) Análise de médias da viscosidade da solução lixiviada em função dos tratamentos (média \pm máximo e mínimo).....28

Figura 12. Matriz de correlação de Spearman com nível de confiança de 90% ($p < 0,10$) entre variáveis climáticas e propriedades do solo nos tratamentos (a) C₀, (b) C₅₀, (c) C₇₅ e (d) C₁₀₀. Efluxo de CO₂ (FCO₂ em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$), influxo de O₂ (FO₂ em $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), umidade do solo (Usolo em %), temperatura do solo (Tsolo em °C), viscosidade da solução lixiviada (Viscosidade em Pa s), pressão atmosférica (Pressão em hPa), radiação solar global (RSG em MJ m^{-2})..30

1. INTRODUÇÃO

Na última década, as emissões mundiais de dióxido de carbono (CO₂) foram aproximadamente 10,9 petagramas de carbono por ano; 144% superior as emissões desde a época pré-industrial. Este gás junto com o metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), cujas emissões entre 2010 e 2019 foram 335 - 383 teragramas de CH₄ por ano e 4,2-11,4 teragramas de N₂O por ano são considerados os principais gases de efeito estufa (GEE), responsáveis pelas mudanças climáticas antropogênicas (Canadell et al., 2021). Tais mudanças são produto principalmente de duas atividades: 1) a exploração dos combustíveis fósseis; 2) as mudanças no uso e gestão da terra, o que engloba emissões por parte da agricultura, silvicultura e outros usos da terra (AFOLU) (IPCC, 2022).

AFOLU por sua vez foi responsável de 13% a 21% das emissões mundiais de GEE no período entre 2010 e 2019; o que equivale a 5,9 giga toneladas de CO₂ por ano, 157 Mega toneladas de CH₄ por ano e 6,6 Mega toneladas de N₂O por ano (IPCC, 2022). No Brasil, as emissões de CO₂ equivalente, produto da agropecuária e mudanças no uso da terra, compreenderam 477.670 Gg CO₂ equivalente (25,8%) e 637.039 Gg CO₂ equivalente (38,0%) das emissões nacionais em 2020, respectivamente (MCTI, 2022).

Com o intuito de gerar medidas de mitigação e adaptação para as mudanças climáticas, surgem iniciativas como: 1) os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), especificamente o objetivo 13 sobre a ação climática, que prevê a adoção de medidas para combater as mudanças climáticas e seus efeitos (ONU, s. d.); 2) medidas como a recarbonização dos solos agrícolas em nível mundial (RECSOIL), cuja finalidade é promover o manejo sustentável do solo com enfoque no carbono orgânico do solo (COS), sendo uma de suas prioridades a prevenção das perdas e o aumento dos estoques de COS (FAO, s. d.).

No Brasil, as emissões de CO₂ equivalente projetadas para o ano 2020 (3.236 milhões de Toneladas de CO₂ equivalente) foram reduzidas em 48,2%, o que atingiu o compromisso da Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC) de reduzir as emissões de CO₂ equivalente entre 36% e 39% das emissões projetadas para esse ano (MCTI, 2022). Além disso, Brasil comprometeu-se em reduzir as emissões de GEE para o ano 2025 e 2030 em 37% e 50% respectivamente, em comparação com

as emissões do ano 2005, em função de sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) ante o Secretariado da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) adotado pelas Partes da UNFCCC e seu Acordo de Paris durante a Conferência das Partes número vinte seis (COP26) (Nationally Determined Contributions, 2022).

Apesar das emissões por parte de AFOLU, estas atividades, também são consideradas um sumidouro importante de carbono (C), porque possuem um grande potencial para a mitigação das mudanças climáticas por meio da melhoria na captura e redução de emissões de GEE, e é o único setor econômico capaz de promover a remoção de dióxido de carbono (RDC) em grande escala e em curto prazo por meio de medidas como o manejo COS (IPCC, 2022). Isto é atribuído ao fato de que o solo é o principal reservatório terrestre de carbono, com uma magnitude global de 677 Pg de C nos 30 centímetros de profundidade do solo, e com uma capacidade técnica global de sequestro média de 2,45 Pg de C por ano (Lal, 2018).

Para gerar medidas de mitigação eficientes sobre as perdas de carbono do solo é importante levar em consideração que independentemente da capacidade natural do solo para armazenar carbono, uma das principais causas de suas perdas é através da respiração microbiana, a qual consiste em um subproduto da decomposição da matéria orgânica (MO) (Zhang et al., 2022). No solo, os microrganismos acessam a matéria orgânica através dos poros inter e intra-agregados (Six, et al., 2002; Kravchenko, et al., 2015) devido sua mobilidade no meio da solução do solo (Yang e Van Elsas, 2018).

Em solos tropicais a mineralização da matéria orgânica é maior em função das condições climáticas mais acentuadas como a temperatura e a umidade, que contribuem na atividade microbiana e sua decomposição de MO (Silva et al., 2019; Xavier, et al., 2020; Moitinho et al., 2021 e La Scala et al., 2022). No entanto, os esforços para compreender os mecanismos que influenciam a eficiência dos microrganismos, para acessar e mineralizar o COS, continuam a ser de interesse para garantir de forma eficiente a fixação do C no solo e diminuir suas perdas via CO₂.

A solução com a qual os microrganismos são transportados no solo (Yang e Van Elsas, 2018) possui propriedades reológicas como a viscosidade, a qual determina a capacidade de um fluido para fluir com determinada facilidade (Holthusen

et al., 2012). Em outros fluidos diferentes da solução do solo, como a água do mar, o suco gástrico de animais e soluções de laboratórios verificou-se que a viscosidade de destas soluções influenciava na velocidade de locomoção dos microrganismos (Schneider e Doetsch, 1974; Bolton e Havenhand, 1997; Larsen et al., 2008; Sohn et al., 2013; Mirbagheri e Fu, 2016; Joiner et al., 2019). Assim, La Scala et al. (2022) propuseram que a viscosidade poderia ter influência na taxa de FCO₂ microbiana associada com a difusão pela lei de Difusão de Einstein-Stokes. No entanto não se tem relatos ou dados práticos que permitam corroborar esta teoria que relacionem a viscosidade da solução do solo com os efluxos de CO₂, produto da atividade microbiana.

A aplicação de produtos modificadores da viscosidade como gelatina, alginato de sódio, goma xantana e poliacrilamida, tem sido utilizada em solos para estudos de evapotranspiração, porém ao final do estudo era reportada a baixa infiltração destes produtos no solo (Adhikari, et al., 2019). No entanto, o Polietilenoglicol 6000 (PEG6000), que também é um modificador de viscosidade das soluções tem a capacidade de infiltrar na matriz do solo, por sua solubilidade em água (Castanho et al., 2010), sem prejudicar a saúde das plantas por sua baixa ou nula toxicidade (Aliniaiefard et al., 2020).

A hipótese deste estudo é que a modificação da viscosidade da solução do solo tem influência na respiração microbiana e consequentemente, nos efluxos de CO₂. Nesse sentido o objetivo foi avaliar o efeito da aplicação de diferentes concentrações de PEG6000 nos efluxos de CO₂ do solo e sua relação com variáveis climáticas e propriedades do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O papel dos microrganismos no CO₂ do solo

A saída de CO₂ do solo é um subproduto, principalmente da respiração heterótrofa e autótrofa; a primeira é referente aos microrganismos por decomposição bioquímica de substratos e a segunda por parte das raízes das plantas (Zhang et al., 2022). A produção de CO₂ do solo resulta então destes organismos vivos do solo que

produzem energia, assim como produtos intermediários de carbono (C) para manutenção, desenvolvimento e absorção de íons e reprodução (Luo e Zhou, 2006).

As respirações autótrofa e heterótrofa foram avaliadas por Zhang et al. (2022), em uma região de oásis no noroeste da China durante dois anos. Os autores reportaram que a respiração heterótrofa (por parte dos microrganismos) representou 67,9% da respiração do solo nesse período. Além disso, os autores observaram a importante influência da umidade do solo e da temperatura nos processos de respiração do solo.

2.1.1. Umidade e temperatura do solo

A umidade é um dos principais fatores que determinam os fluxos de CO₂ do solo (Santos et al., 2019; Xavier et al., 2020; Lucena et al., 2023). Por exemplo, em um estudo sobre variabilidade temporal dos fluxos de CO₂ baixo resíduos de culturas em um solo Latossolo Vermelho, em São Paulo, Brasil, Xavier et al. (2020), comprovaram que a umidade do solo influenciou em 60% os efluxos de CO₂ no período de avaliação.

Os níveis de umidade do solo e sua distribuição podem influenciar na difusão de gases de duas formas: 1) reduzir a difusão desde o solo para a atmosfera ou 2) aumentar os fluxos superficiais por produção de CO₂ (Delsarte et al., 2021). Em níveis de umidade do solo que alcançam a porcentagem de poros livres de água perto de 60%, a entrada de oxigênio é limitada (Linn e Doran, 1948), o que também afeta a atividade microbiana que precisa de oxigênio para sua respiração (Moitinho et al., 2021). No entanto, níveis adequados de umidade permitem a locomoção dos microrganismos e sua acessibilidade aos nutrientes e matéria orgânica contribuindo na produção de CO₂ (Yang e Van Elsas, 2018).

A temperatura do solo, também é um fator importante para os fluxos de CO₂ do solo. Tem influência na viscosidade da água e soluções o que interfere no transporte de nutrientes e no metabolismo dos microrganismos (Larsen et al., 2008; La Scala et al., 2022) podendo afetar a produção de CO₂ do solo.

2.1.2. Captura de O₂ no solo

A respiração do solo é um processo metabólico dos organismos vivos que consomem O₂ e produzem CO₂ (Luo e Zhou, 2006). Por conseguinte, é outro fator

determinante nos processos de produção de CO₂ do solo (Almeida et al., 2018; Vicentini et al., 2019).

A disponibilidade do O₂ no solo pode influenciar nos fluxos de CO₂ do solo já que os microrganismos precisam deste para sua respiração (Xavier et al., 2020). Também é importante na respiração radicular das plantas (Verslues et al., 1998). Deste modo, as associações entre CO₂ e O₂ do solo têm sido consideradas para estimar os tipos de respiração que dominam em diferentes tipos de solos ecossistemas e condições climáticas. Por exemplo, quando a respiração heterótrofa prevalece da autótrofa ou quando a respiração aeróbica prevalece da anaeróbica (Angert et al., 2015; Almeida et al., 2018; Hilman et al., 2022).

Entre os fatores que mais influenciam na captura de O₂ no solo se tem a temperatura, que afeta a difusão de gases no solo (Almeida et al., 2018), e o consumo de oxigênio por parte dos microrganismos e raízes das plantas (Neira et al., 2015); a umidade do solo e a pressão atmosférica também são fatores importantes na captura de O₂ do solo (De Lucena et al., 2023) porque tem influência na difusão do O₂ pelo espaço poroso do solo (Neira et al., 2015).

2.2. A viscosidade da solução do solo e seu papel na respiração do solo

A facilidade com que um fluido pode ser transportado é determinada por sua viscosidade. Na física a viscosidade é considerada como uma constante a partir da viscosidade da água a uma temperatura de 20 °C, o que leva a erros nas estimações de modelos, dos quais a viscosidade faz parte (Holthusen et al., 2012).

A viscosidade de uma solução também influencia na locomoção dos microrganismos que se movimentam para acessar nutrientes e MOS (Yang e Van Elsas, 2018) ou para fugir de predadores (Joiner et al., 2019). No entanto, na viscosidade participam alguns fatores como a temperatura (Bolton e Havenhand, 1997; Larsen et al., 2008; La Scala et al., 2022) e forças hidrodinâmicas como o arrasto da Lei de Stokes (Schneider e Doetsch, 1974; Larsen et al., 2008).

Larsen et al. (2008), estudaram as mudanças na velocidade de natação de três organismos marinhos; *Artemia salina nauplius*, *Brachionus plicatilis* e *Acartia tonsa*, pelo efeito das mudanças da temperatura de água do mar e da viscosidade da água de mar com adição de pirrolidona polivinila, um polímero de alto peso molecular. Os autores reportaram que diminuições de 10 °C de temperatura resultaram em aumentos

da viscosidade da solução da água de mar e em reduções na velocidade de locomoção dos organismos; em 37% para *Artemia salina nauplius*, 26% *Brachionus plicatilis* e em 4% para *Acartia tonsa*.

Segundo La Scala et al. (2022) a viscosidade poderia ter influência na taxa de FCO₂ microbiana associada com a difusão pela lei de Difusão de Einstein-Stokes:

$$D = \frac{k_B T}{\eta(T)} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde D é a difusão, k_B é a constante de Boltzmann, T é a temperatura do solo em kelvin e $\eta(T)$ é a viscosidade da água do solo a temperatura T .

Na teoria de La Scala et al. (2022) a taxa de produção de CO₂ pelos microrganismos é associada a difusão, pela constante de decaimento da matéria orgânica do solo (MOS) (k), onde $k = cD$, sendo D o coeficiente de difusão e c uma constante de proporcionalidade.

2.2.1. Biopolímeros de cadeia longa e seus efeitos na viscosidade da solução do solo

Formulações de polímeros a base de água foram aplicadas no solo por Adhikari et al. (2019), misturados com produtos modificadores da viscosidade (gelatina, alginato de sódio, goma xantana e poliacrilamida), com o objetivo de criar uma membrana com baixa absorção no solo, para diminuir a evapotranspiração do solo. O polímero a base de água mostrou uma viscosidade entre 7 e 8 mPa s. No entanto, quando foi misturado com modificadores da viscosidade, a absorção dos produtos no solo diminuiu entre 10 e 90% e a viscosidade das soluções foi aumentada significativamente. Reduções da evapotranspiração em 60% foram obtidas com o polímero a base de água misturado com goma xantana.

Existem outros produtos modificadores da viscosidade como o Polietileno glicol 6000 (PEG6000), o qual pertence ao grupo dos polietilenos glicóis miscíveis em água, cuja aparência pode variar desde líquidos claros viscosos até sólidos de cera branca, dependendo de seu peso molecular (Fruijtier-Pölloth, 2005). A presença e durabilidade do PEG no solo, foi avaliada por Castanho et al. (2010), que estudaram o destino do PEG 4000 no ambiente por meio da mobilidade, degradação e sorção no solo, em dois tipos de solos cultivados com cana de açúcar no estado de

São Paulo (Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho distroférico). No estudo, o PEG4000 foi aplicado em concentrações baixas (de 0,1 até 1,6 mg mL⁻¹) e altas (de 3 até 48 mg mL⁻¹); os resultados mostraram que a sorção do PEG foi baixa (< 22% do PEG aplicado) e mobilidade alta (> 43% do PEG aplicado).

O PEG é amplamente utilizado na indústria agrícola, comumente em estudos de estresse hídrico das plantas. Em sementes de *Vigna unguiculata*, Tavares et al. (2021) avaliaram a resposta germinativa das sementes, baixo estresse osmótico de PEG6000 a concentrações de 0; 87,89; 134,42; 170,53 e 200,94 g L⁻¹. Eles observaram danos oxidativos em sementes expostas ao produto. No entanto, a quantidade de PEG poderia ter um efeito no desenvolvimento e adaptabilidade das plantas sob estresse osmótico induzido pelo produto. Nesse sentido, Manokari et al. (2022) avaliaram os efeitos de concentrações de PEG de 100 a 500 mg L⁻¹ no desenvolvimento e melhorias morfo-anatômicas *ex vitro* de *Spathoglottis plicata*. As plantas mostraram maior desenvolvimento em concentrações de 300 mg L⁻¹, no entanto com concentrações superiores dessa houve desmelhoras no desenvolvimento da planta. Em relação, Verslues et al. (1998) estudaram o efeito do PEG na deficiência de oxigênio (O₂) e sua relação com o alongamento e metabolismo das raízes primárias de *Zea mays L.* Os autores determinaram que as plantas cultivadas em soluções de PEG sofreram hipoxia e para evitar este efeito foi preciso a suplementação com oxigênio.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido no período de setembro a novembro de 2021 na Estação Experimental Agroclimatológica, da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Jaboticabal, São Paulo, Brasil (21°14’S e 48°17’ W a 615 m acima do nível do mar) (Figura 1). O clima regional é B1rB’4a’ (Thorntwaite, 1948; Rolim et al., 2007), úmido mesotérmico, com precipitação média anual de 1.430 mm e temperatura média anual de 22,2 °C (Santos et al., 2019). O solo do local foi caracterizado como Latossolo Vermelho Eutrófico (Centurion, 1998; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária -

EMBRAPA Solos, 2018) cujas características físico-químicas (Quadro 1) foram determinadas mediante amostras extraídas a profundidades de 0-0,20 m e analisadas seguindo as técnicas recomendadas no Manual de Métodos de Análises do Solo da EMBRAPA (Teixeira et al., 2017).

Foram implementados 4 lisímetros com dimensões de 1 m² de área e 1 m de profundidade localizados adjacentes uns dos outros em uma área de 9 m². Os lisímetros utilizados foram estruturas constituídas de caixas de cimento enterradas no solo, preenchidas com o mesmo solo do local, respeitando a compactação e a ordem dos horizontes e cobertura vegetal (grama) com a finalidade principal de medir a evapotranspiração do local. No presente estudo os lisímetros foram utilizados com a finalidade de coletar a água lixiviada ao longo do estudo para análise da viscosidade. Além disso, no fundo dos lisímetros foram colocados 0,10 m de pedra brita, 0,10 m de areia e uma manta bidim para facilitar a filtragem e drenagem. No fundo da estrutura sai um cano via subsolo, que conduz a água drenada até um recipiente (Figura 1).

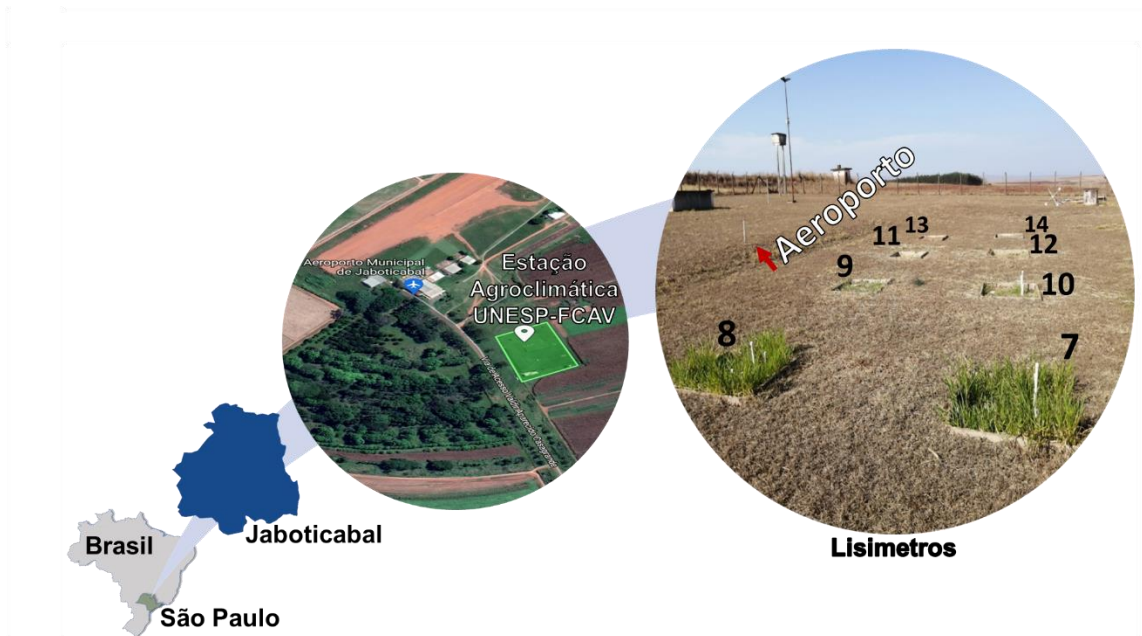


Figura 1. Área de estudo. Ressaltado em verde, a Estação Agroclimatológica da Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, São Paulo. Os números indicam a identificação de cada lisímetro. Fonte: FieldsArea Measure®.

Quadro 1. Caracterização química e física para cada tratamento C₀ (0 g de PEG6000 L⁻¹ de água), C₅₀ (50 g de PEG6000 L⁻¹ de água), C₇₅ (75 g de PEG6000 L⁻¹ de água) e C₁₀₀ (100 g de PEG6000 L⁻¹ de água). O análise foi feito para o solo na camada de 0.0-0.2 m para os tratamentos.

Atributo	Unidade	Tratamento			
		C ₀	C ₅₀	C ₇₅	C ₁₀₀
Potencial hidrogeniônico (pH)	CaCl ₂	5.0	5.2	5.0	5.4
Materia orgânica (MO)	g dm ⁻³	30.0	28.0	25.0	28.0
Fósforo (P)	mg dm ⁻³	37.0	52.0	47.0	52.0
Enxofre (S)	mg dm ⁻³	5.0	6.0	7.0	6.0
Cálcio (Ca)	mmolc dm ⁻³	21.0	19.0	15.0	18.0
Magnésio (Mg)	mmolc dm ⁻³	13.0	10.0	9.0	11.0
Potássio (K)	mmolc dm ⁻³	2.4	3.3	2.3	3.1
Acidez Potencial (H + Al)	mmolc dm ⁻³	21.0	14.0	19.0	13.0
Soma de Bases (SB)	mmolc dm ⁻³	35.9	32.8	26.8	32.0
Capacidade de Troca de Cátions (CTC)	mmolc dm ⁻³	56.6	46.4	45.8	45.0
Saturação por Bases (V)	%	63.0	71.0	59.0	71.0
Areia	%	66.0	64.0	64.0	66.0
Silte	%	7.0	8.0	8.0	7.0
Argila	%	27.0	27.0	27.0	27.0

3.2. Delineamento experimental

O estudo constou de um delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial com medidas repetidas no tempo, com efeito fixo para tratamentos e aleatório para o tempo. Foram implementados 4 lisímetros dos quais cada um deles compõe um tratamento a concentrações aplicadas de 0, 50, 75 e 100 gramas de Polietilenoglicol 6000 (PEG6000) por litro de água, que foram denominados como tratamentos C₀, C₅₀, C₇₅ e C₁₀₀, respectivamente. Em cada lisímetro foram estabelecidos 5 pontos amostrais, totalizando assim 20 pontos por tratamento, os quais foram definidos com colares de Policloreto de Vinila (PVC) de 0,10 m de diâmetro e 0,04 m de altura, inseridos a 0,01 m de profundidade do solo (Figura 2).

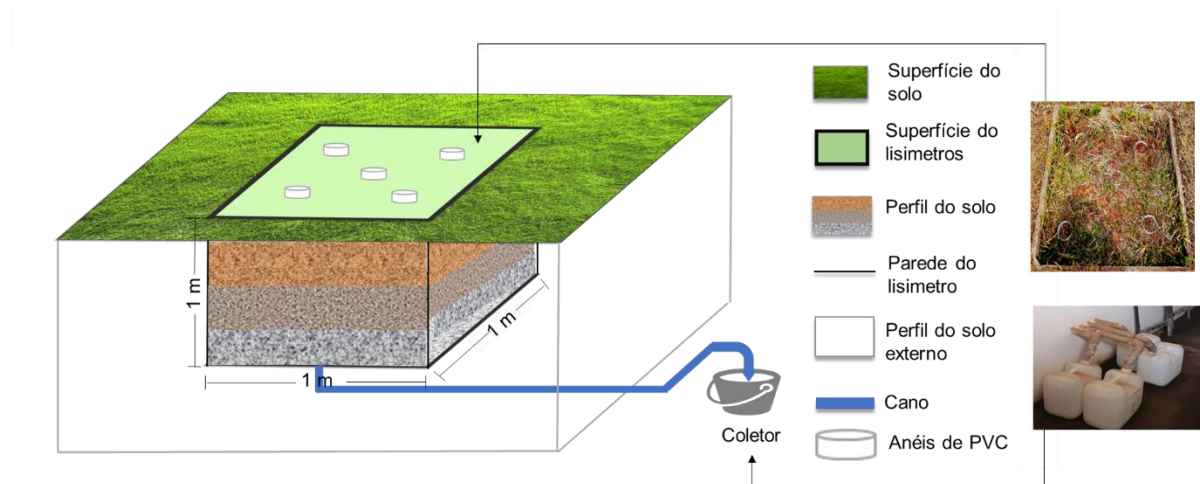


Figura 2. Representação gráfica dos lisímetros utilizados no estudo.

O estudo teve início no dia 27 de setembro de 2021, com a aplicação de 2 litros das diferentes concentrações de PEG6000 e a inserção dos anéis. A finalização ocorreu no dia 25 de novembro do mesmo ano. Durante este período de 60 dias foram conduzidas avaliações em 25 dias do efluxo de CO_2 do solo (FCO_2), temperatura do solo (T_{solo}), umidade do solo (U_{solo}) e influxo de O_2 do solo (FO_2). As variáveis foram avaliadas sequencialmente, no horário entre 7 e 9 h da manhã. A solução lixiviada dos lisímetros para a análise da viscosidade foi coletada diariamente durante todo o período experimental e escolhida uma amostra representativa a cada 4 dias. Os dias 29 e 30 de setembro; 1, 2, 4, 6, 8, 13, 14, 18, 20, 21, 28, 29 e 30 de outubro; 1, 2, 3, 4, 7, 10, 14, 20, 22 e 25 de novembro, foram denominados como dias de avaliação e são reportados como dias julianos. Os dados climáticos para o período de avaliação deste estudo foram obtidos a partir da estação agroclimatológica localizada no mesmo local onde o estudo foi conduzido (Figura 3).

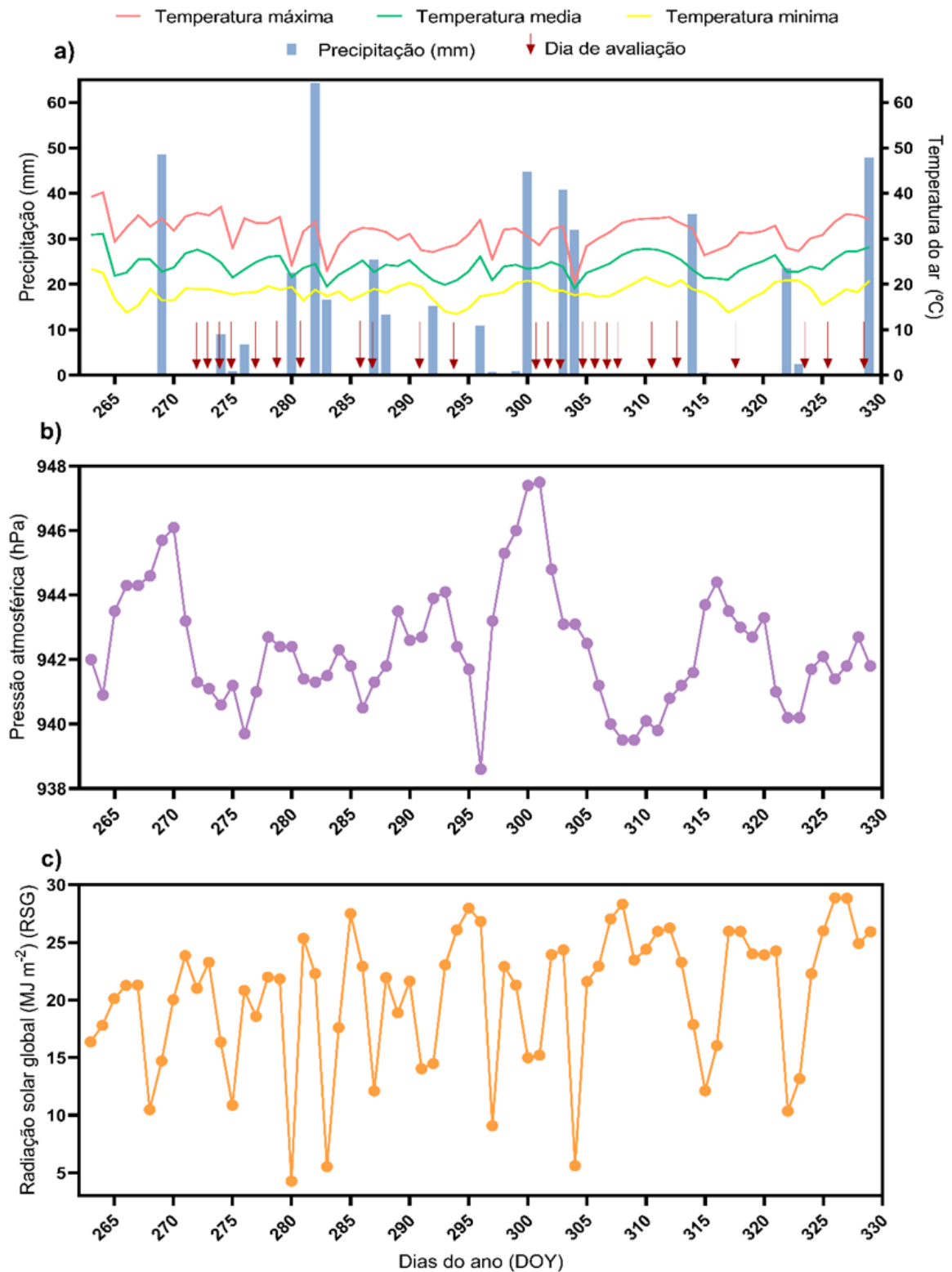


Figura 3. Dados meteorológicos durante o tempo de estudo. (a) Temperatura máxima, mínima e média do ar (°C), precipitação (mm) e dias de avaliação. (b) Pressão atmosférica (hPa). (c) Radiação solar global (MJ m⁻²).

3.3. Efluxo de CO₂, temperatura e umidade do solo

As avaliações do efluxo de CO₂ do solo (FCO₂) foram realizadas em cada um dos pontos amostrais, por meio de um sistema automatizado e portátil (Sistema de fluxo de gás no solo); da série LI-COR Environmental (LI-8100), da companhia LI-COR, Nebraska, EUA (Figura 4a). Este sistema mede as mudanças das concentrações de CO₂ do solo dentro de uma câmara fechada por meio de espectroscopia de absorção óptica na região espectral do infravermelho. A câmara de coleta possui um volume interno de 854,20 cm³ e uma área de contato com o solo de 83,70 cm², a qual é acoplada nos anéis previamente inseridos no solo e no sistema que monitora o fluxo de gases (IRGA- Infrared gas analyser) (LI-COR INC., 2007). No modo de medição o tempo em que o LI-8100 determina o efluxo de CO₂ do solo (FCO₂) em μmol de CO₂ m⁻² s⁻¹ é dado na (Eq. 2), com 90 s para cada ponto amostral deste estudo. Finalmente, os dados de FCO₂ foram computados e examinados no software SoilFluxPro®.

$$FCO_2 = \frac{10VP_0 \left(1 - \frac{W_0}{1000}\right) \partial C'}{RS(T_0 + 273,15) \partial t} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que FCO₂ é a taxa de efluxo de CO₂ do solo (μmol m⁻² s⁻¹), V é o volume da câmara (cm³), P₀ é a pressão inicial (kPa), W₀ é a fração molar de vapor de água inicial (mmol mol⁻¹), R é a constante dos gases que é igual a 8,314 Pa m³ (K⁻¹ mol⁻¹), S é a área de superfície do solo (cm²), T₀ é a temperatura do ar inicial (°C) e ∂C'/∂t é a taxa de mudança inicial na fração molar de CO₂ corrigida em água (μmol⁻¹ mol s⁻¹) (LI-COR INC., 2007).

A temperatura do solo (T_{solo}) foi avaliada com um termômetro digital, na camada de 0 - 0,10 m do solo, o qual foi inserido ao lado de cada anel de medição em direção perpendicular ao solo (Figura 4b). A umidade do solo (U_{solo}) foi determinada por meio de um sistema portátil de reflectometria no domínio do tempo (TDR) (Campbell Scientific, 2011). O TDR é composto por uma sonda de detecção do conteúdo de água do solo, sendo formado por duas hastes de 0,12 m de comprimento e 5 mm de diâmetro (Figura 4c).

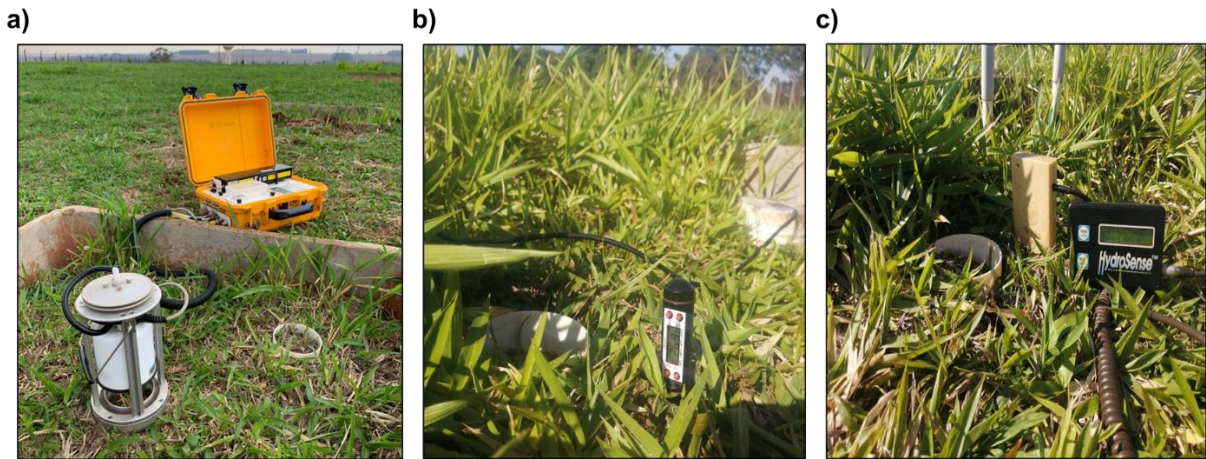


Figura 4. Equipamento utilizado no experimento. (a) Sistema LI-8100 para medição do Efluxo de CO_2 do solo. (b) Termômetro digital para estimativa da temperatura do solo (T_{solo}). (c) TDR para avaliação da umidade do solo (U_{solo}).

3.4. Influxo de O_2

A avaliação do influxo de O_2 (FO_2) foi conduzida em 3 pontos amostrais por tratamento durante 300 s, totalizando 12 pontos amostrais para esta variável em todos os tratamentos ao longo dos dias estudados, sendo conduzido nos mesmos dias em que FCO_2 foi avaliado. A aferição foi feita utilizando-se um sensor de oxigênio UV Flux 25% que mede os níveis de O_2 , com base no princípio de extinção da fluorescência com luz ultravioleta (UV) para determinar as concentrações de oxigênio no ambiente (Figura 5a). O sensor foi adaptado num tampão de PVC de 5,5 cm de altura que permitiu ser acoplado nos anéis de cada tratamento de 3 cm de altura dos quais 1 cm fica inserido no solo, funcionando como uma câmara de 8,5 cm de altura com volume de $667,6 \text{ cm}^3$ e área de contacto ao solo $83,70 \text{ cm}^2$. O sensor foi conectado a um computador e por meio do software Gaslab® foi configurado e calibrado para armazenar os dados concomitantemente às medições em campo (Figura 5b, 5c). A taxa de absorção de O_2 do solo ($d\text{O}_2/dt$) foi calculada por interpolação linear dos valores de concentração do gás dentro da câmara ao longo do tempo (Figura 5c) (Eq. 3) levando em consideração a pressão atmosférica do ar e o volume da câmara:

$$FO_2 = \frac{dO_2}{dtA} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que FO_2 é a concentração de O_2 calculada no tempo; dO_2 é a mudança da concentração com relação no tempo (dt) e A é a área da superfície do colar. A concentração de O_2 é dada pelo sensor em partes por milhões (ppm), por conseguinte os valores foram transformados em mol por meio da Eq. 4 e a partir da Eq. 5 foram convertidos para mg de O_2 m^2 s^{-1} e obtido o influxo de O_2 .

$$P(\Delta V) = (\Delta n)RT \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que P é a pressão atmosférica (Pa); ΔV é a variação do O_2 capturado (ppm), vezes o volume da câmara, vezes 1×10^{-6} (m^3 s^{-1}); R é a constante dos gases perfeitos ($8,314462$ J mol^{-1} K^{-1}); T é a temperatura do ar (K). Os resultados são expressos em termos de variação de O_2 (Δn) (mol s^{-1}).

$$FO_2 = \frac{dO_2 \cdot 10^{-6} PM}{dtRT} H \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que FO_2 é o fluxo de oxigênio (mg m^{-2} s^{-1}); dO_2/dt é a quantidade de O_2 (ppm) medido no tempo t (s); P é a pressão atmosférica (Pa); M é a massa molar do O_2 (g m^{-3}); R é a constante universal dos gases perfeitos, T é a temperatura absoluta (K) e H é a razão do volume da camera (V_c) para a área da câmara colocada na superfície do solo.



Figura 5. Equipamento utilizado para a medição da captura de oxigênio no solo: (a) Sensor de oxigênio UV Flux 25%. (b) Sensor acoplado no anel do solo e ao computador. (c) Software Gaslab mostrando o influxo de O_2 em tempo real (gráfico com coloração azul).

3.5. Quociente respiratório

O quociente respiratório (QR) é a razão em mol mol⁻¹ entre o efluxo de CO₂ (mol de CO₂ m⁻² s⁻¹) e o influxo de O₂ (mol de O₂ m⁻² s⁻¹) observado em cada um dos dias em que o experimento foi conduzido. O valor do QR varia entre zero até superior a 1 e pode ser expresso pela seguinte equação (Eq. 6).

$$QR = \frac{FCO_2}{FO_2} \quad (\text{Eq. 6})$$

3.6. Lei de Stokes

Neste estudo, foram feitos dois testes de viscosidade: 1) a viscosidade da solução aplicada; 2) a viscosidade da solução lixiviada de cada lissímetro. Ambos os testes foram feitos segundo a Lei de Stokes (Eq. 7). De acordo esta lei, a queda de um corpo esférico em um meio viscoso é afetada pelo peso do corpo, o empuxo provocado pelo deslocamento do fluido na queda do corpo e a força de arrasto exercida por o fluido (Darvell e Wong, 1989):

$$R = 6\pi r \eta v \quad (\text{Eq. 7})$$

Em que, R é a força de arrasto, r é o raio da esfera (m), η é a viscosidade do fluido (Stokes) e v é velocidade limite de queda do corpo (m s⁻¹). Seguindo a segunda Lei de Newton tomando em consideração as forças exercidas sobre o corpo se tem que (Eq. 8):

$$ma = P - E - R \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que a é a aceleração; P é o peso do corpo (kg); E é o empuxo e R a força de arrasto (Eq. 9, 10).

$$P = mg = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho_c g \quad (\text{Eq. 9})$$

$$E = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho_f g \quad (\text{Eq. 10})$$

Nas equações 9 e 10, $(4/3)\pi r^3$ é igual a volume do corpo; r é o raio do corpo (m); ρ_c e ρ_f são as densidades do corpo e do fluido respectivamente, g é a constante gravitacional.

No limite onde a aceleração (a) se faz nula, a velocidade (v) se faz constante alcançando seu valor limite, onde tem-se em consideração a (Eq. 11) o que faz possível substituir nela as equações 7, 9 e 10 para obter a viscosidade do fluido (Eq. 12):

$$R = E - P \quad (\text{Eq. 11})$$

$$\eta = \frac{V_c g(\rho_c - \rho_f)}{6\pi r V_t} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde, η é a viscosidade do fluido ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$); V_c é o volume do corpo; ρ_c e ρ_f correspondem as densidades do corpo e do fluido respectivamente; r é o raio do corpo e V_t é a velocidade terminal de queda do corpo.

3.7. Modificação e determinação da viscosidade da solução aplicada e lixiviada pelo solo

A viscosidade da solução coletada da lixiviação no solo em cada lisímetro foi modificada a partir da aplicação de 2 L das soluções de PEG6000 por cada tratamento (C_0 , C_{50} , C_{75} e C_{100}). Amostras diárias contendo 250 mL de solução foram coletadas em cada lisímetro e em seguida foi escolhida uma amostra representativa de intervalos a cada 4 dias para cada tratamento, das quais se estabeleceram 13 períodos de avaliação. Também foi avaliada a viscosidade da solução aplicada mediante 1L de solução para cada tratamento.

O teste da viscosidade das amostras da solução aplicada, foi realizado a diferentes temperaturas, por sua vez as amostras lixiviadas foram mantidas em ambiente controlado (20 °C) e monitoradas durante todo o experimento. O teste foi feito para cada amostra e replicado 5 vezes. Foi pesado o fluido de cada amostra num balão volumétrico de 250 mL previamente pesado, para obter a densidade do fluido. Posteriormente, o fluido foi disposto em uma pipeta de 200 mL, na qual foram feitas duas marcações com uma longitude de 0,52 m que determinou a distância que percorreria uma esfera de aço de 305 mm de diâmetro, e com peso 0,112 gramas. O lance desta na pipeta, foi feito com o auxílio de uma pinça e o tempo de queda foi determinado com a utilização de um cronômetro digital com precisão de 1×10^{-2} s,

levando em consideração o momento em que a bola de aço passa pela primeira marca da pipeta até que cruze a segunda marca, indicando o final do percurso da esfera (Figura 6).

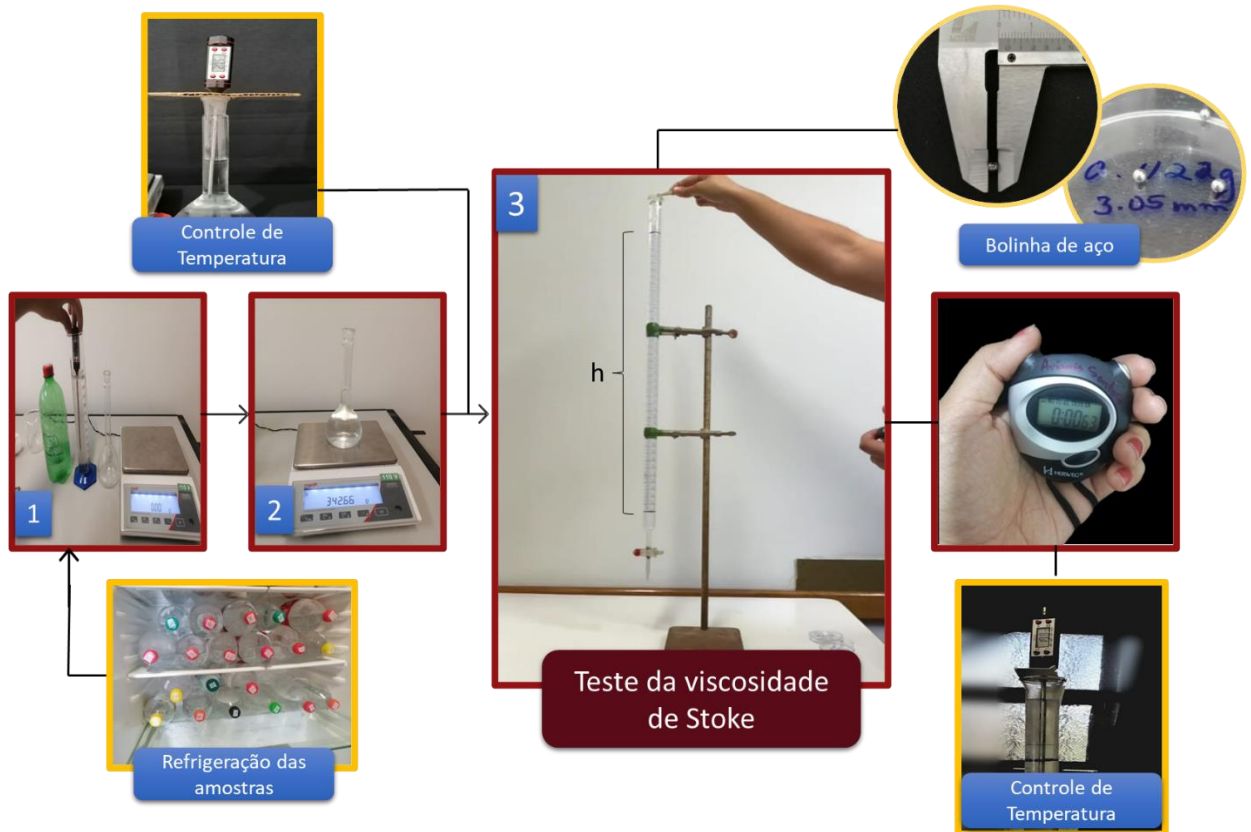


Figura 6. Teste da viscosidade de acordo com a Lei de Stokes. (1) Monitoramento da temperatura de cada amostra a 20 °C. (2) Determinação do peso da amostra para cálculo de densidade. (3) Lanço da esfera na solução para medir o tempo em que tarda em percorrer a altura da pipeta. Depois de cada passo, a temperatura da solução foi monitorada.

3.8. Processamento e análise dos dados

As variáveis foram analisadas primeiramente mediante estatística descritiva (média, desvio padrão, mediana, IQR, mínimo, máximo, erro padrão da média e coeficiente de variação) (Quadro 2). Posteriormente, foi realizado o teste de normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e de homocedasticidade da variância (teste de Bartlett), ambos ao nível de 5% de significância para contemplar as pressuposições da análise de variância. Os dados das variáveis de estudo, com exceção da

viscosidade do solo, não cumpriram com estes pressupostos e, portanto, as variáveis efluxo CO₂ e influxo O₂ foram transformadas pelo método logarítmico, T_{solo} pelo valor de lambda e U_{solo} pela raiz quadrada dos dados. Contudo, nas figuras e tabelas os dados são apresentados na escala original.

Foi feita uma análise de variabilidade temporal por meio do teste de análise de variância de médias repetidas no tempo a 5% de significância e análises de regressão para as variáveis FCO₂, FO₂, T_{solo}, U_{solo} e viscosidade aplicada. Além disso, foi feita uma matriz de correlação de Spearman para cada tratamento individual, com nível de confiança de 90% ($p < 0,10$) para correlacionar as variáveis FCO₂, FO₂, viscosidade da solução lixiviada, T_{solo}, U_{solo}, pressão atmosférica e radiação solar global (RSG). Também foi realizada uma análise de regressão linear simples para a viscosidade da solução aplicada assim como uma correlação de Spearman com nível de confiança 95% ($p < 0,05$) para o tempo de queda da esfera em função da viscosidade da solução aplicada. Todas as análises estatísticas foram realizadas em ambiente R (R Core Team, 2022) e os gráficos foram construídos com o software GraphPad Prism V.9.0 (San Diego, CA, USA).

Quadro 2. Estatística descritiva do efluxo de CO₂ (efluxo CO₂) do solo, influxo de O₂ absorção (influxo O₂), Temperatura do solo (T_{solo}), Umidade do solo (U_{solo}), em solo de quatro lisímetros aplicados com quatro doses de Polietileno glicol 6000 (PEG6000) em gramas por litro de água; controle (C₀), 50g L⁻¹ (C₅₀), 75g L⁻¹ (C₇₅) e 100g L⁻¹ (C₁₀₀).

		N	Média	Desvio Padrão	Mediana	IQR	Min	Max	EPM	CV%	Curtose
Efluxo CO₂ (μmol m⁻² s⁻¹)	C0	125	5.38	0.96	5.37	1.31	2.65	7.39	±0.08	17.88	-0.24
	C50	125	4.26	1.07	4.14	1.42	2.24	7.19	±0.09	25.23	0.13
	C75	125	4.00	0.87	3.95	1.14	1.90	6.47	±0.08	21.81	0.03
	C100	125	4.72	1.24	4.51	1.87	1.90	8.38	±0.11	26.21	-0.02
Influxo O₂ (mg m⁻² s⁻¹)	C0	75	0.79	0.51	0.70	0.51	0.003	2.38	±0.06	64.30	1.38
	C50	75	0.65	0.43	0.49	0.57	0.15	2.01	±0.06	66.92	0.91
	C75	75	0.77	0.43	0.70	0.56	0.16	2.15	±0.05	55.99	1.18
	C100	75	0.95	0.48	0.86	0.71	0.13	2.40	±0.05	50.79	-0.31
T_{solo} (°C)	C0	125	24.10	1.20	24.0	1.40	22.20	27.00	±0.11	4.98	-0.16
	C50	125	23.90	1.20	23.9	1.40	21.60	26.80	±0.11	5.02	-0.03
	C75	125	24.20	1.13	24.2	1.30	22.20	27.20	±0.10	4.67	0.31
	C100	125	24.30	1.11	24.2	1.30	22.30	27.30	±0.10	4.57	0.44
U_{solo} (v/v) (%)	C0	125	14.10	6.23	14.0	9.00	3.00	27.50	±0.56	44.18	-0.79
	C50	125	13.70	5.84	13.5	8.50	3.50	27.50	±0.52	42.63	-0.57
	C75	125	12.20	4.84	12.5	7.50	3.00	23.00	±0.43	39.67	-0.89
	C100	125	13.60	5.63	14.0	8.50	3.00	27.00	±0.50	41.39	-0.77
RQ (mol mol⁻¹)	C0	-	0.34	0.34	0.23	0.24	0.06	2.07	0.04	100.09	12.92
	C50	-	0.32	0.19	0.31	0.27	0.07	1.11	0.02	61.59	2.50
	C75	-	0.24	0.17	0.19	0.19	0.04	0.94	0.02	71.13	3.33
	C100	-	0.22	0.14	0.17	0.18	0.06	0.72	0.02	62.79	1.82
Viscosidade (SWV) (Pa s)	C0	55	0.04	0.00	0.04	0.00	0.03	0.04	0.00	8.33	-0.21
	C50	55	0.04	0.00	0.04	0.00	0.03	0.04	0.00	10.81	0.23
	C75	55	0.04	0.00	0.04	0.00	0.03	0.05	0.00	8.33	0.21
	C100	55	0.04	0.00	0.04	0.00	0.03	0.05	0.00	8.33	-0.76

4. RESULTADOS

4.1. Variação temporal da emissão de CO₂, captura de O₂, temperatura e umidade do solo

A análise de variância para o FCO₂ mostrou efeito significativo no fator tratamento ($F = 5,04$; $p < 0,01$), na variação temporal (dias) ($F = 51,84$; $p < 0,01$) e na interação entre estes fatores ($F = 2,77$; $p < 0,01$). As variações em FCO₂ estiveram relacionadas com os eventos de precipitação; foram observados 5 aumentos no FCO₂ durante o período de avaliação logo após ocorrência de precipitação na região. O primeiro aumento em FCO₂ para todos os tratamentos foi observado no dia 275 depois de eventos de precipitação acumulada de 10 mm, sendo tais emissões de 47 a 85% superiores em média às registradas no dia 273. O maior aumento em FCO₂ induzido por precipitações foi observado no dia 301 após 44,8 mm de precipitação acumulada, sendo o maior FCO₂ em C₀ ($6,86 \pm 0,23 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e o menor em C₅₀ ($4,80 \pm 0,63 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), o que representou 30% menos nos FCO₂ comparado com C₀ nesse dia (Figura 7a). As menores FCO₂ ocorreram no dia 273 em todos os tratamentos depois de 3 dias sem precipitação, sendo C₇₅ a menor FCO₂ ($2,60 \pm 0,20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), equivalente também a 30% menos FCO₂ que C₀ ($3,69 \pm 0,33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) nesse dia.

Observou-se uma diminuição de FCO₂ em todos os tratamentos junto com o comportamento crescente na umidade do solo entre os dias 277 e 280 e entre os dias 293 e 294 coincidentes com períodos sem precipitação. Entre os dias 302 e 307 os FCO₂ também diminuíram em todos os tratamentos, porém além dos períodos antes mencionados, foram registrados eventos de precipitação (73 mm). No entanto, entre os dias 311 e 314, houve queda nos FCO₂ em todos os tratamentos concordante com uma diminuição abrupta da umidade do solo, junto com ausência de precipitações e aumento na temperatura.

Em geral, os maiores FCO₂ foram reportados no tratamento C₀ ($p < 0,05$) em 20 dias dos 25 avaliados, ditas diferenças foram observadas em sua maioria após dos primeiros 9 dias de avaliação, por sua vez o tratamento que mais deferiu ($p < 0,05$) com C₀ foi C₇₅ durante 10 dias ao longo do estudo sendo também o tratamento com menores FCO₂ durante esses dias (Figura 7a).

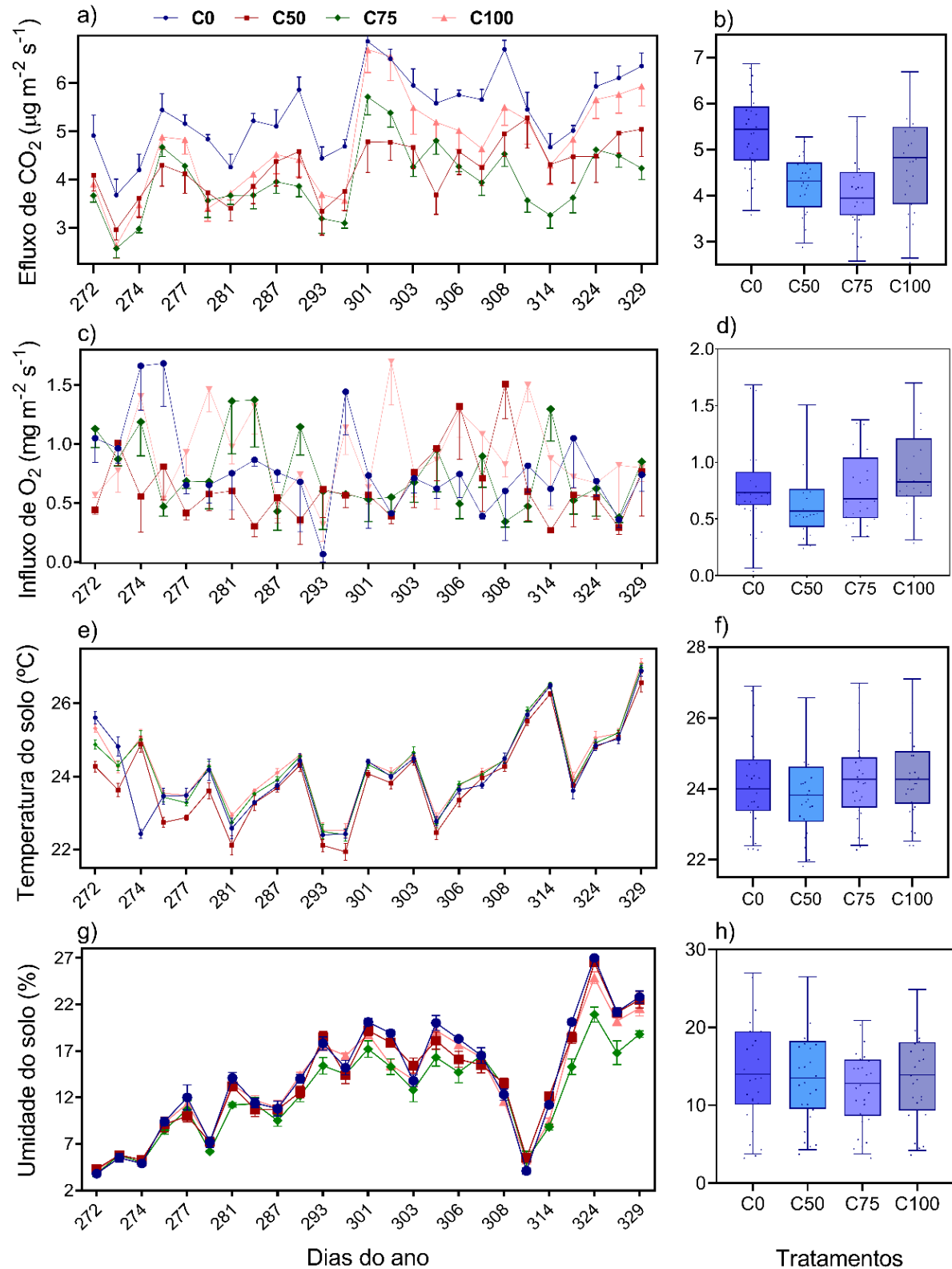


Figura 7. Variáveis medidas no solo: Efluxo de CO₂ (a, b), Influxo de O₂ (c, d), Temperatura do solo (e, f) e Umidade do solo v/v (g, h) de acordo com os tratamentos (C₀, C₅₀, C₇₅ e C₁₀₀). A esquerda, variação temporal (média ± erro padrão da média) para cada variável estudada. A direita média dos tratamentos (média ± máximo e mínimo) para cada variável estudada.

O ajuste de uma função quadrática entre as concentrações de PEG6000 e FCO_2 mostrou que os tratamentos determinaram as mudanças nos FCO_2 , com um coeficiente de determinação de 0,86 (Quadro 3). Os parâmetros estimados foram considerados significativos a despeito dos valores de probabilidade (P) associados, maiores que 5%. O comportamento quadrático dos FCO_2 em função das concentrações de PEG6000 mostraram uma diminuição dos FCO_2 em C_{50} ($4,26 \pm 0,09 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), C_{75} ($4,00 \pm 0,08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e C_{100} ($4,72 \pm 0,11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) comparados com C_0 ($5,38 \pm 0,08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Figura 7b) o que representa diminuição no efluxo de 20,8%, 25,6% e 12,3% respectivamente em comparação de C_0 . O FCO_2 mínimo obtido pela regressão quadrática foi 4,22 a uma concentração de $54,12 \text{ gL}^{-1}$ de PEG6000.

Para o influxo de O_2 a análise de variância mostrou diferenças significativas entre tratamentos ($F = 2,96$; $p < 0,1$), na variação temporal ($F = 2,35$; $p < 0,01$) e na interação dos fatores ($F = 2,36$; $p < 0,01$) (Figura 7c). O maior FO_2 foi observado no dia 275 no tratamento C_0 ($1,70 \pm 0,36 \text{ mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e o menor FO_2 ocorreu no dia 293 também no tratamento C_0 ($0,07 \pm 0,07 \text{ mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) mostrando um comportamento decrescente nesse período. A partir do dia 297, o influxo de O_2 apresentou pouca variação até o final do estudo em C_0 . Nos demais tratamentos foi observada uma maior variabilidade dos influxos de O_2 ao longo do estudo; em C_{50} ($1,50 \pm 0,30$ a $0,30 \pm 0,00 \text{ mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ entre os dias 308 e 314, respectivamente) e C_{75} ($1,37 \pm 0,40$ a $0,34 \pm 0,05 \text{ mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 286 e 308, respectivamente) os valores máximos e mínimos de influxo de O_2 nestes tratamentos ocorreram em curto tempo, no entanto C_{100} teve tendência para aumentos nos FO_2 ($0,32 \pm 0,14$ a $1,70 \pm 0,37 \text{ mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ entre os dias 293 e 392, respectivamente).

A análise de regressão quadrática (Quadro 3), mostrou uma tendência a diminuir os influxos de O_2 no C_{50} ($0,65 \text{ mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em 17, 72% com relação a C_0 ($0,79 \text{ mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), o influxo de C_{75} ($0,77 \text{ mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foi similar de C_0 , e finalmente houve um aumento no influxo no tratamento C_{100} ($0,95 \text{ mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de 20% quando comparado a C_0 (Figura 7d). Este comportamento mostrou um coeficiente de determinação de 0,99 e os parâmetros foram considerados significativos a despeito dos valores de probabilidade (P) associados, maiores que 5%.

Quadro 3. Parâmetros de regressão quadrática e linear entre variáveis de estudo e tratamentos a concentrações (C) de 0, 50, 75 e 100 gramas de PEG6000 (C₀, C₅₀, C₇₅ e C₁₀₀).

Variavel	Regressão quadrática Variavel = $b_0 + b_1 C + b_2 C^2$			R ²
	b ₀	b ₁	b ₂	
FCO ₂ ⁽¹⁾	5,3958 ± 0,2217 (p = 0,026)	-0,0433 ± 0,0101 (p=0,14)	0,0004 ± 0,0001 (p=0,17)	0,86
FO ₂ ⁽²⁾	0,7882 ± 0,0190 (p = 0,015)	-0,0067 ± 0,0008 (p= 0,08)	0,0001 ± 0,000008 (p= 0,06)	0,99
Tsolo ⁽³⁾	24,0873 ± 0,023 (p = 0,003)	-0,0069 ± 0,0061 (p= 0,46)	0,0001 ± 0,0001 (p= 0,36)	0,79
Usolo ⁽⁴⁾	14,2027 ± 1,0725 (p = 0,05)	-0,0356 ± 0,0491 (p= 0,60)	0,0003 ± 0,0005 (p= 0,68)	0,44
Viscosidade lixiviada ⁽⁵⁾	0,036 ± 0,00008 (p = 0,001)	0,00004 ± 0,000004 (p= 0,0533)	-0,0000004 ± 0,00000004 (p= 0,0545)	0,99
TFCO ₂ ⁽⁶⁾	3,199 ± 0,1562 (p = 0,0311)	-0,0256 ± 0,0072 (p=0,1733)	0,0002 ± 0,0001 (p=0,20)	0,93
TFO ₂ ⁽⁶⁾	39,225 ± 2,3491 (p = 0,0381)	-0,4133 ± 0,1075 (p=0,1620)	0,0049 ± 0,0011 (p=0,1358)	0,96
Regressão linear simples Viscosidade aplicada = $b_0 + b_1 C$				
Viscosidde aplicada ⁽⁷⁾	0,036 ± 0,0009 (p<0,01)	0,0001 ± 0,00001 (p<0,05)		0,92

FCO₂: efluxos de CO₂. FO₂: influxos de O₂. Tsolo: temperatura do solo. Usolo: umidade do solo. TFCO₂: emissão total de CO₂. Fo₂: influxo total de O₂.

(1) b₀: μmol m⁻² s⁻¹. b₁: μmol m⁻² s⁻¹ (g L⁻¹)⁻¹. b₂: μmol m⁻² s⁻¹ (g L⁻¹)⁻².

(2) b₀: mg m⁻² s⁻¹. b₁: mg m⁻² s⁻¹ (g L⁻¹)⁻¹. b₂: mg m⁻² s⁻¹ (g L⁻¹)⁻².

(3) b₀: °C. b₁: °C (g L⁻¹)⁻¹. b₂: °C (g L⁻¹)⁻².

(4) b₀: Vol %. b₁: Vol% (g L⁻¹)⁻¹. b₂: Vol% (g L⁻¹)⁻².

(5) b₀: Pa s. b₁: Pa s (g L⁻¹)⁻¹. b₂: Pa s (g L⁻¹)⁻².

(6) b₀: ton ha⁻¹. b₁: ton ha⁻¹ (g L⁻¹)⁻¹. b₂: ton ha⁻¹ (g L⁻¹)⁻².

(7) b₀: Pa s. b₁: Pa s (g L⁻¹)⁻¹.

Tsolo variou ao longo do estudo ($F = 1854,98$; $p < 0,01$) e mostrou diferenças entre tratamentos ($F = 22,69$; $p < 0,01$), assim como na interação dos fatores ($F = 34,31$; $p < 0,01$) (Figura 7e), sendo a menor temperatura observada no dia 294 para o tratamento C_{50} ($21,94 \pm 0,10$ °C; $p < 0,05$). Em contraste, a maior temperatura foi registrada no dia 329 para o tratamento C_{100} ($27,1 \pm 0,05$ °C) e a maior temperatura de todos os tratamentos também aconteceu nesse dia ($26,89 \pm 0,07$ °C; $26,57 \pm 0,12$ °C; $26,98 \pm 0,05$ °C e, de C_0 até C_{75} respectivamente), onde C_{50} foi menor ($p < 0,05$). Houve um comportamento decrescente da temperatura do solo desde o início até a metade das avaliações (dia 294) que pode estar relacionado com o início dos eventos de precipitação e consequente aumento na umidade do solo; posteriormente, Tsolo permaneceu elevada até o final do estudo. A análise de regressão quadrática mostrou que não houve variação da Tsolo entre os tratamentos C_0 ($24,1 \pm 11$ °C) C_{50} ($23,9 \pm 0,11$ °C), C_{75} ($24,2 \pm 0,10$ °C) e C_{100} ($24,3 \pm 0,10$ °C) (Figura 7f). O coeficiente de determinação para esta análise foi moderado (79%) e os parâmetros não foram considerados significativos (Quadro 3).

Usolo mostrou variação temporal ao longo dos 59 dias de avaliação ($F = 448,29$; $p < 0,01$), nos tratamentos ($F = 4,49$; $p < 0,01$) e na interação dos fatores ($F = 2,80$; $p < 0,01$); no dia 272 foram registrados os menores valores médios de Usolo para todos os tratamentos ($3,8 \pm 0,12\%$; $4,3 \pm 0,34\%$; $3,8 \pm 0,34\%$ e $4,2 \pm 0,20\%$ de C_0 até C_{100}) (Figura 7g). As maiores Usolo foram reportadas no dia 324 em todos os tratamentos, porém C_{75} indicou a menor Usolo desse dia ($27,00 \pm 0,27\%$, $26,50\% \pm 0,35$; $20,90\% \pm 0,81\%$ e $24,87 \pm 0,64\%$ de C_0 até C_{100} , respectivamente). O conteúdo de água no solo apresentou uma redução considerável de 80%, 69%, 68% e 72% desde o tratamento C_0 até C_{100} respectivamente, entre o intervalo dos dias 305 até 311, que foi caracterizado pela ausência de precipitação e com maiores temperaturas.

Segundo o ajuste de uma análise de regressão quadrática, a Usolo dos tratamentos C_{50} , C_{75} e C_{100} ($5,84 \pm 0,52\%$; $4,84 \pm 0,43\%$ e $5,63 \pm 0,50\%$, respectivamente) mostraram uma tendência a diminuir com relação a Usolo de C_0 ($6,23 \pm 0,56\%$). O coeficiente de determinação para esta análise foi de 0,44 e os parâmetros não foram considerados normais (Quadro 3). No entanto, pode-se observar (Figura 7h) que a menor Usolo média foi reportada no tratamento C_{75} e a maior Usolo média em C_0 .

A emissão total de CO₂ em até o dia 60 do estudo foi calculado por meio da integral FCO₂ pelo tempo (Whittaker e Robinson, 1967) e as médias totais foram 3,185; 2,544; 2,365 e 2,825 ton de CO₂ ha⁻¹ de C₀ até C₁₀₀, respectivamente. O efeito dos tratamentos sobre os efluxos totais foi avaliado também mediante regressão quadrática, a qual mostrou diminuições dos efluxos de CO₂ nos tratamentos C₅₀, C₇₅ e C₁₀₀ com relação a C₀, com um coeficiente de determinação de 93% (Quadro 3). Os efluxos de CO₂ totais nos tratamentos C₇₅, C₅₀ e C₁₀₀ equivalem a uma diminuição de 25,7%, 20,1% e 11,3% respectivamente, em comparação com o efluxo de CO₂ no tratamento C₀ (Figura 8a).

O influxo total de O₂ durante o período do experimento, também foi calculado por meio da integral de FO₂ ao longo do tempo (Whittaker e Robinson, 1967) e as médias totais do influxo foram: C₀ (39,45 ton ha⁻¹), C₅₀ (29,5 ton ha⁻¹), C₇₅ (37,7 ton ha⁻¹) e C₁₀₀ (46,40 ton ha⁻¹). O influxo total de O₂ em C₁₀₀ foi 17,57% maior que em C₀, no entanto a captura em C₅₀ e C₇₅ foi menor em 25,22% e 4,23% quando comparado com C₀ (Figura 8b). Este comportamento foi corroborado também mediante regressão quadrática com um coeficiente de determinação de 96% e efeito significativo dos parâmetros a despeitos dos valores de probabilidade (P) associados, maiores que 5% (Quadro 3).

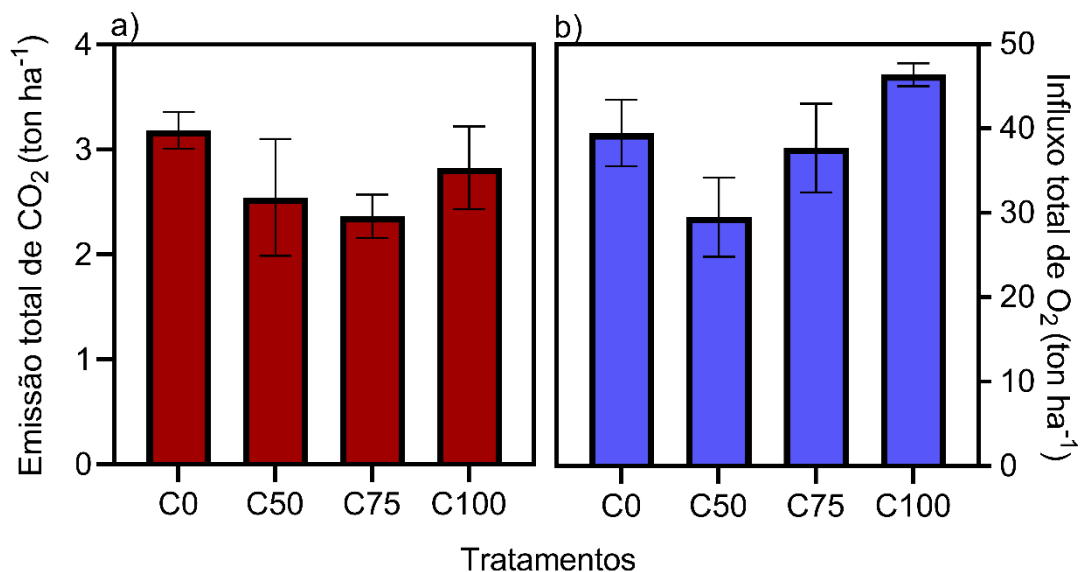


Figura 8. Estimacões totais no final do estudo nos quatro lisímetros aplicados de acordo com os tratamentos (0, 50, 75 e 100 gramas de PEG6000 por litro de água). (a) Emissão total de CO₂ (ton ha⁻¹). (b) Influxo total de O₂ (ton ha⁻¹). Os dados são apresentados com a média ± o erro padrão da média.

4.2. Quociente respiratório

Para a variável QR houve diferenças no tempo ($F = 4,44$; $p < 0,01$) e na interação do tempo (dias) com os tratamentos ($F = 2,01$; $p < 0,01$). Os valores médios mais baixos de QR foram observados entre o dia 274 no tratamento C_{100} ($0,08 \text{ mol mol}^{-1}$), o que coincide com o período de menor FCO_2 do experimento. Os valores médios mais altos de QR foram observados no tratamento C_0 ($0,88 \text{ mol mol}^{-1}$) no dia 308. Em geral o QR foi inferior a 1 durante todo o experimento (Figura 9a). O quociente respiratório total no final do experimento também mostrou QR inferiores a 1 (Figura 9b).

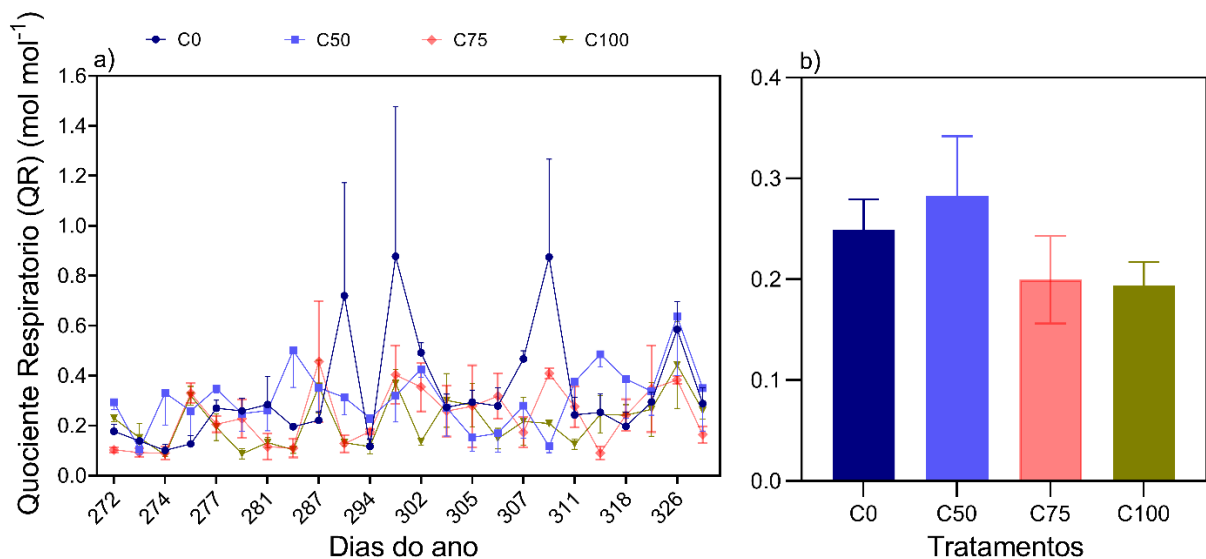


Figura 9. Quociente respiratório (QR) mol mol^{-1} para os tratamentos C_0 , C_{50} , C_{75} e C_{100} : (a) Variabilidade temporal do QR ao longo do estudo. (b) QR total até o final do estudo. Os gráficos são mostrados com a média \pm erro padrão da média.

4.3. Viscosidade

Uma análise de regressão linear simples mostrou aumentos na viscosidade da solução aplicada de PEG6000 nos tratamentos C_{50} , C_{75} e C_{100} quando comparado com C_0 . Este efeito é corroborado por um coeficiente de determinação de 0,92 assim como o efeito significativo dos parâmetros estimados ($p < 0,05$) (Quadro 3; Figura 10a). Análises de correlação de Spearman a 95% de significância, mostrou correlações positivas significativas entre o tempo de queda da esfera em função da viscosidade da solução aplicada e as análises de regressão linear simples corroboraram este

efeito mediante um coeficiente de determinação de 1,00 para C₀, C₅₀ e C₁₀₀ e de 0,72 para C₇₅ (Figura 10b).

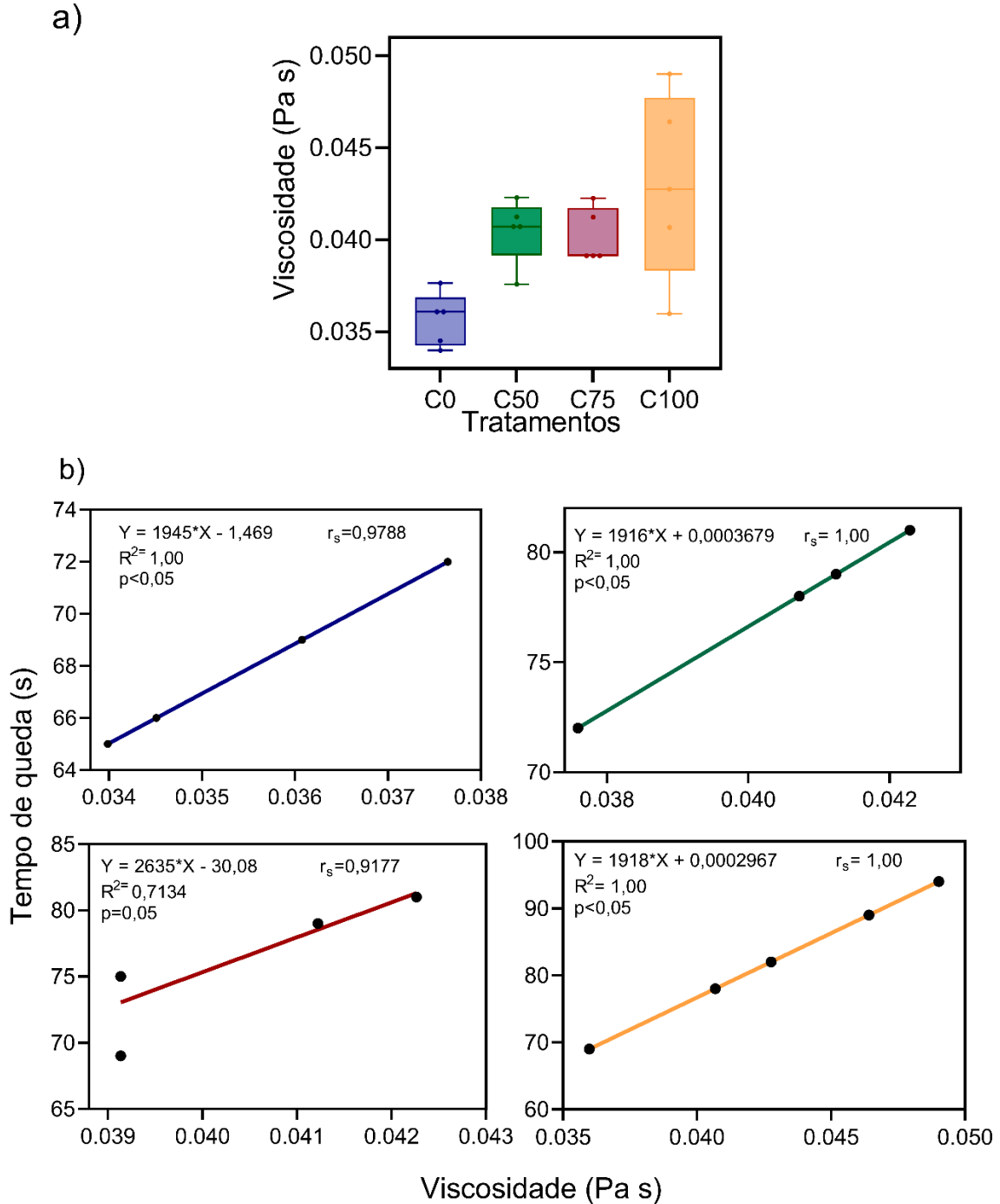


Figura 10. Viscosidade da solução aplicada (Pa s): (a) Análise de regressão linear simples da viscosidade da solução aplicada em função dos tratamentos (média \pm máximo e mínimo). (b) Análise de regressão linear simples e correlação linear de Pearson com nível de confiança de 95% ($p < 0,05$) para o tempo de queda (s) da esfera em função da viscosidade da solução aplicada para cada tratamento.

Na viscosidade da solução lixiviada houve variação temporal ($F = 13,32$; $p < 0,01$) e na interação do tempo com os tratamentos ($F = 3,53$; $p < 0,01$). A viscosidade da solução lixiviada em C_0 permaneceu inferior que os demais tratamentos só durante os primeiros 3 períodos (Figura 11a), dos quais nos dois primeiros não foram observadas diferenças entre tratamentos ($p > 0,05$), só no período 3 observou-se diferenças na viscosidade, donde C_{100} foi maior (0,038 Pa s; $p < 0,05$) que C_0 (0,034 Pa s), no entanto C_{50} e C_{75} (0,035 e 0,036 Pa s respectivamente) não mostraram diferenças. Nos seguintes períodos a tendência da viscosidade em todos os tratamentos foi altamente variável entre tratamentos (Figura 11a). A análise de regressão quadrática por sua vez, mostrou que a viscosidade média por tratamento não teve variação entre tratamentos C_0 (0,036 Pa s), C_{50} (0,037 Pa s), C_{75} (0,036 Pa s) e C_{100} (0,036 Pa s). Um coeficiente de determinação de 99% corrobora este comportamento assim como o efeito significativo dos parâmetros da equação quadrática da análise (Quadro 3). A maior viscosidade da solução lixiviada calculada pelo máximo da regressão foi observada na concentração de C_{50} e coincide com o valor mais alto da viscosidade lixiviada de 0,037 Pa s.

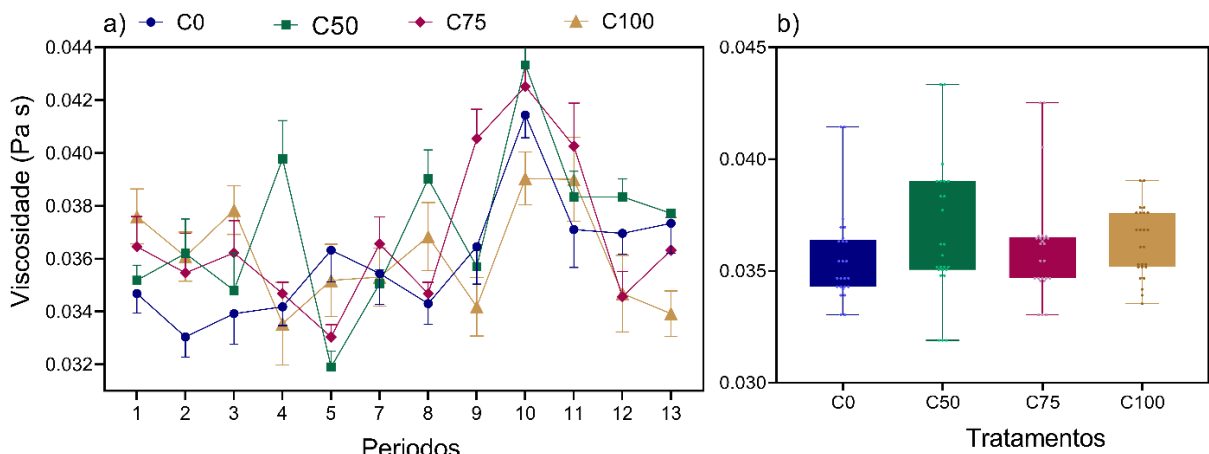


Figura 11. Viscosidade da solução lixiviada por cada lisímetro: (a) Variabilidade temporal da viscosidade lixiviada para cada tratamento ao longo do estudo (média \pm erro padrão da média). (b) Análise de médias da viscosidade da solução lixiviada em função dos tratamentos (média \pm máximo e mínimo).

4.4. Matriz de correlação de Spearman

No tratamento C₀ houve uma correlação positiva entre FCO₂ e Usolo ($r = 0,55$; $p < 0,10$) e uma correlação negativa entre FCO₂ e FO₂ ($r = -0,40$; $p < 0,10$), enquanto FO₂ teve correlação negativa com Usolo ($r = -0,43$; $p < 0,10$) e no caso da Usolo também foi correlacionada positivamente com a pressão atmosférica ($r = 0,53$; $p < 0,10$) (Figura 12a). No tratamento C₅₀ foram correlacionadas positivamente as variáveis FCO₂ e Tsolo ($r = 0,64$; $p < 0,10$), como também Usolo com a pressão atmosférica ($r = 0,55$; $p < 0,10$); para FO₂ houve correlação negativa com Tsolo ($r = -0,26$; $p < 0,10$) assim como também houve correlação negativa entre a viscosidade da solução lixiviada e pressão atmosférica ($r = -0,28$; $p < 0,10$) (Figura 12b). Houve uma correlação negativa entre FCO₂ e FO₂ ($r = -0,39$; $p < 0,10$) no C₇₅ assim como uma correlação positiva entre FCO₂ e Usolo ($r = 0,54$; $p < 0,10$) e a Usolo se correlacionou negativamente com a viscosidade da solução lixiviada ($r = -0,36$; $p < 0,10$) (Figura 12c). No tratamento C₁₀₀, foram reportadas correlações positivas entre FCO₂ e Usolo ($r = 0,57$; $p < 0,10$) e entre Usolo e a pressão atmosférica ($r = 0,51$; $p < 0,10$), no entanto se observaram correlações negativas entre FCO₂ e a viscosidade da solução lixiviada ($r = -0,41$; $p < 0,10$), entre FO₂ e a pressão atmosférica ($r = -0,31$; $p < 0,10$), assim como entre Usolo e a viscosidade da solução lixiviada ($r = -0,36$; $p < 0,10$) (Figura 12d). A RSG não mostrou correlação significativa ($p > 0,01$) com as demais variáveis em nenhum dos tratamentos (Figura 12a-d).

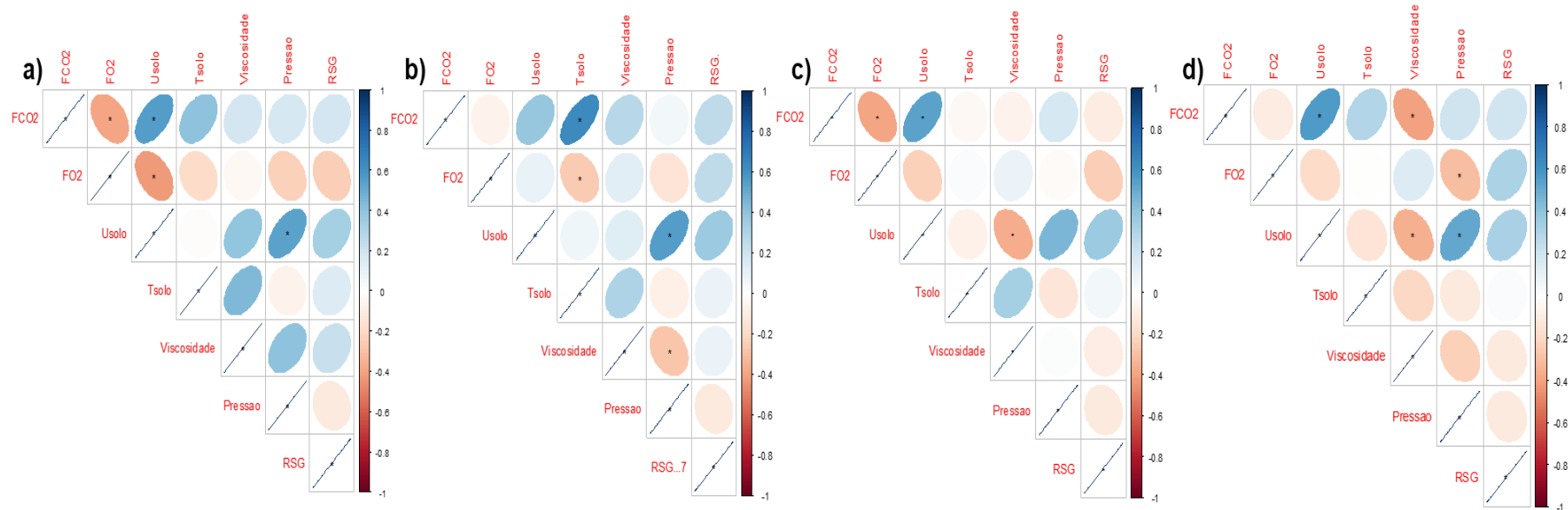


Figura 12. Matriz de correlação de Spearman com nível de confiança de 90% ($p < 0,10$) entre variáveis climáticas e propriedades do solo nos tratamentos (a) C₀, (b) C₅₀, (c) C₇₅ e (d) C₁₀₀. Efluxo de CO₂ (FCO₂ em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$), influxo de O₂ (FO₂ em $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), umidade do solo (Usolo em %), temperatura do solo (Tsolo em °C), viscosidade da solução lixiviada (Viscosidade em Pa s), pressão atmosférica (Pressão em hPa), radiação solar global (RSG em MJ m^{-2}). Cores em escala de azul indicam correlação positiva, entanto que em escala de vermelho indicam correlações negativas; (*) significam diferença significativas com nível de confiança ($p < 0,10$).

5. DISCUSSÃO

5.1. Variabilidade temporal do FCO_2 , U_{solo} , T_{solo} e FO_2

A variabilidade dos FCO_2 foi explicada pela variabilidade na umidade solo, a qual tem um papel preponderante nos processos de FCO_2 , participando de forma direta mediante a difusão e produção de CO_2 (Faimon e Lang, 2018). Os níveis de umidade no solo podem favorecer os referidos processos através da atividade microbiológica e a difusão de gases. Quando o solo se encontra seco e fica novamente úmido em teores adequados, ocorre um rápido aumento na respiração microbiana (Yan et al., 2018), a qual se transporta na solução do solo e passa a acessar a matéria orgânica e nutrientes (Yang e Van Elsas, 2018). No entanto, se os altos níveis de umidade alcançam valores próximos da porosidade total do solo, a difusão de gases pode ser comprometida reduzindo assim a emissão de CO_2 do solo (Panosso et al., 2011). Esse último efeito pode afetar a entrada de O_2 no interior do solo, o que também é fundamental para a atividade metabólicas dos microrganismos aeróbicos (Moitinho et al., 2021).

O efeito da umidade do solo sobre FCO_2 no presente estudo, é mais pronunciado após a época de seca, com o início das chuvas, quando foram observados aumentos significativos em FCO_2 após as precipitações. Outros estudos desenvolvidos em Latossolos Vermelhos, reportaram efeitos similares (Santos et al., 2019; Vicentini et al., 2019; Xavier et al., 2019;). Os resultados também mostraram uma redução de FCO_2 depois de eventos de precipitação, quando a umidade do solo era mais alta no período do dia 277 ao 281, em consonância com o observado por Santos et al. (2019), depois de uma precipitação acumulada de 40 mm em seu estudo.

A diminuição da captura de FO_2 ao longo do experimento foi similar ao comportamento de captura de O_2 no estudo de Vicentini et al. (2019) em florestas tropicais. Além disso, baixos FO_2 depois das precipitações, correlações negativas entre FO_2 e FCO_2 assim como entre FO_2 e U_{solo} , em nosso estudo, também concordam com os reportados por Almeida et al. (2018) em um solo Latossolo Vermelho. Correlações positivas entre FCO_2 e FO_2 podem ser explicadas biologicamente pelo consumo de O_2 dos microrganismos do solo (Almeida et al., 2019). Em nosso caso a redução de FO_2 inversa ao aumento da U_{solo} é associada com a difusão de gases, que é dificultada dentro do solo pelo aumento da umidade do

solo, processo matematicamente descrito por a primeira Lei de Fick, a qual considera que a difusão de gases é associada a outros fatores como temperatura e pressão atmosférica (Neira et al., 2015).

Em nosso estudo foram observadas correlações negativas entre FO_2 e T_{solo} em C_{50} e entre FO_2 e pressão atmosférica em C_{100} . Lucena et al. (2023) observou também correlações negativas entre FO_2 e T_{solo} em Latossolo Vermelho sem cobertura no mesmo local onde o presente estudo foi desenvolvido com gramínea. Independente das condições de cobertura do solo, estas correlações negativas podem ser atribuídas a influência inversa que tem a temperatura do ar com a pressão atmosférica, o que interfere nos FO_2 . Também foram observadas correlações positivas entre U_{solo} e pressão atmosférica em C_0 , C_{50} e C_{100} , o que pode estar relacionado com o anteriormente descrito, ou seja, U_{solo} e pressão atmosférica estão relacionados com a difusão de gases no solo.

As relações entre FCO_2 e U_{solo} com a respiração microbiana são bem conhecidas e explicadas, em estudos e modelos de FCO_2 em Latossolos Vermelhos no Brasil (Silva et al., 2019; Moitinho et al., 2021; Xavier, et al., 2020), porém sem considerar modificações da viscosidade na solução do solo. Nesse sentido, La Scala et al. (2022) propuseram incluir a viscosidade da solução do solo nos modelos de FCO_2 , baseados na Lei de Difusão de Einstein-Stokes, levando em consideração que a taxa de produção de CO_2 pelos microrganismos é associada à difusão, pela constante de decaimento da MOS (k). A viscosidade é uma propriedade hidráulica importante na motilidade microbiana em líquidos ou soluções, e têm sido reportados estudos relacionados em meios líquidos, por exemplo no suco gástrico e na mucosa de animais (Mirbagheri e Fu, 2016; Joiner et al., 2019), na água de mar (Bolton e Havenhand, 1997; Larsen et al., 2008; Sohn et al., 2013) ou meios líquidos preparados em laboratório (Schneider e Doetsch, 1974), mas não se tem relatos na solução do solo. Nesse sentido, Schneider e Doetsch (1974) reportaram que *E. coli*, *Spirillum serpens*, *T. jenense* e *Pseudomonas aeruginosa*, alcançaram sua velocidade máxima com viscosidades modificadas de 1,6 até 2,6 cP, respectivamente. No entanto *B. megaterium* mostrou uma velocidade máxima a 4,7 cP, porém todos estes microrganismos diminuíram a velocidade de natação com viscosidades superiores a qual alcançaram a velocidade máxima. Em água do mar, Sohn et al. (2013) avaliaram

uma diminuição gradual da velocidade dos microrganismos estudados (em 50%) conforme aumentava a viscosidade da solução de 1,2 cP (viscosidade da água do mar a 22°C) até 11,31 cP com aumentos nas concentrações de 0 até 4% de metilcelulosa (3 vezes o aumento da viscosidade).

Em nosso estudo, concordando com a proposta de La Scala et al. (2022), observamos diminuições nos FCO_2 de 20,8%; 25,6% e 12,3% para C_{50} , C_{75} e C_{100} respectivamente comparados com os de C_0 ($5,38 \pm 0,08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) com aumentos na viscosidade da solução aplicada em 13%, 14% e 20% de 0,031 Pa s (solução da água) até 0,043 Pa s, assim como valores superiores de FCO_2 do tratamento C_0 em 20 dos 25 dias avaliados, podendo coincidir com os autores na inclusão da viscosidade nos modelos de FCO_2 produto da respiração microbiana.

A T_{solo} apresentou uma correlação significativa e positiva com FCO_2 somente no tratamento C_{50} que apresentou menor T_{solo} média. Não foi observada correlação de FCO_2 e T_{solo} nos demais tratamentos. A falta de correlação entre estas variáveis pode ser devido à baixa variabilidade de T_{solo} durante o estudo, o que é típico de ambientes tropicais (Moitinho et al., 2021). No entanto, o efeito da baixa variabilidade na temperatura pode favorecer a atividade microbiana, já que os microrganismos em estado de latência no solo podem ser rapidamente ativados com a umidificação (Salazar et al., 2018).

A temperatura do solo em ambientes tropicais pode influenciar na viscosidade da solução do solo. Segundo La Scala et al. (2022) na mudança de temperatura de ambientes temperados para ambientes tropicais (0 °C a 30 °C, respectivamente) espera-se uma redução de próxima a 55% na viscosidade da solução do solo de 1,78 a 0,80 mPa s, já que a viscosidade da solução diminui conforme aumenta a temperatura (Zhang et al., 2022). Em ambientes marinhos, Larsen et al. (2008) relataram o efeito da temperatura e a viscosidade da solução sobre a motilidade de três microrganismos. Os autores encontraram que uma diminuição da temperatura de 10 °C resulta no aumento da viscosidade, e redução de 4 a 37% na velocidade de deslocamento nos microrganismos.

5.2. Biopolímeros de cadeia longa e estresse hídrico

Foram observadas correlações negativas entre a Usolo e viscosidade da solução aplicada tanto no tratamento C₇₅ como no C₁₀₀ o que pode estar associado com as propriedades do PEG6000, um Biopolímero de cadeia longa (Castanho et al., 2010). O polietileno glicol com alto peso molar (> 4000) pode reduzir o potencial osmótico das soluções (Aliniaefard et al., 2020). O PEG6000 tem sido utilizado amplamente para simular estresse hídrico por seca no solo (Jothimani e Arulbalachandran, 2020; Patmi et al., 2020; Tavares et al., 2021) com o objetivo que as células e tecidos vegetais responderem contra mudanças ambientais a doses adequadas. Manokari et al. (2022) reportaram características morfogênicas e anatômicas maiores de *Spathoglottis plicata* em propagação *in vitro* com doses de 300 mg L⁻¹ de PEG6000, no entanto em doses superiores foi dificultada a produção de brotes e biomassa. O PEG6000 aumenta a viscosidade no meio da rizosfera conforme diminui o potencial hídrico (Verslues et al., 1998), isto bloqueia absorção da água pelo sistema radicular por causa do aumento do potencial do soluto (Tátrai et al., 2016) limitando o transporte de oxigênio para a raiz levando as plantas sofrerem hipoxia (Verslues et al., 1998).

5.3. Quociente respiratório

A respiração do solo é produto de processos bioquímicos, entre eles respiração autótrofa (raízes das plantas) e heterótrofa (microrganismos) (Zhang et al., 2022). As relações entre a saída de CO₂ e entradas de O₂ (mol por mol) no solo tem sido utilizada para isolar a atividade biológica, por exemplo a respiração autótrofa da heterótrofa ou a respiração aeróbica da anaeróbica e outros fatores responsáveis de tais processos, mediante o Quociente Respiratório (QR) e Quociente respiratório Aparente (QRA) (Angert et al., 2015; Almeida et al., 2018; Vicentini, et al., 2018; Hodges, et al., 2019; Hilman et al., 2022). No presente estudo o QR foi menor que 1 durante todo o experimento, o que indica que o FO₂ foi maior que o FCO₂, coincidente com resultados de Vicentini et al. (2019) em florestas tropicais. De acordo com os resultados de Almeida et al. (2018), valores de QR próximos a 1 indicam um equilíbrio na respiração aeróbica, ou seja, na produção de 1 mol de CO₂ por cada 1 mol de O₂. No caso contrário, um QR superior a 1 seria um indicativo da respiração anaeróbica dos microrganismos (Angert et al., 2015).

Em estudos de respiração radicular, Hilman et al. (2022) mostrou valores de ARQ entre 0,73 e 0,96 mol mol⁻¹, similares aos do presente estudo. Segundo os autores, esses baixos valores de QRA provenientes da respiração radicular podem ser produto da utilização de lipídios, como substrato por parte da planta ou dissolução de CO₂ na água do xilema. Estes resultados permitem no presente estudo compreender que a respiração do solo monitorada em efeito foi aeróbica, logo que o estresse hídrico induzido pelo PEG6000 pode ter contribuído para que o nível de umidade não prejudicasse a respiração microbiana aeróbica e radicular. Assim como também a viscosidade da solução do solo não limitou totalmente a locomoção dos microrganismos no solo e respiração da raiz das plantas do local.

5.4. Teste de viscosidade

Observou-se um aumento contínuo no tempo de queda na esfera do teste de Stokes conforme aumenta a viscosidade das soluções aplicadas C₀, C₅₀, C₇₅ e C₁₀₀. A viscosidade afeta o movimento de um corpo com o aumento da resistência que exercem as forças hidrodinâmicas como se fundamenta na Lei de Stokes (Sohn et al., 2013; Joiner et al., 2019). No caso dos microrganismos como *Acartia tonsa* que possui maior tamanho, se movimenta similarmente a uma esfera em queda, tal que a força de arrasto é tão maior quanto maior os apêndices do organismo (Larsen et al., 2008). Sendo que o arrasto tem uma forte implicação na velocidade de locomoção. Schneider e Doetsch (1974) propuseram que o aumento da viscosidade aumentaria o arrasto translacional da cabeça e esse aumento no arrasto diminuiria a velocidade de deslocamento do microrganismo, o que corroborou quando uma das bactérias estudadas diminuiu o tamanho do raio de seus flagelos e sua velocidade aumentou.

O fato de não termos diferenças entre as medias da viscosidade da solução lixiviada pode ser explicado pelas características do PEG6000. Pertence aos polímeros altamente solúveis em água e não iônicos (Ahmat et al., 2020), o que pode ter contribuído com a solubilidade na água de chuva e mascarado o lixiviado através do lisímetro. Castanho et al. (2010) achou uma sorção baixa (< 22% do PEG4000 aplicado) em solos tropicais do Brasil e uma alta lixiviação (> 43% do PEG 4000 aplicado). Os autores relataram que o produto que ficou na superfície do solo se distribuiu diferentemente de acordo com a profundidade solo, possivelmente pela

movimentação do PEG através do perfil do solo, o que pode explicar porque não houve diferenças para esta variável no presente estudo.

6. CONCLUSÃO

Doses entre 50 e 75 g de PEG6000 por litro de água diminuíram os efluxos de CO₂ nos tratamentos C₅₀ e C₇₅. O que pode ser consequência da afetação da atividade microbiana nos lisímetros aplicados com essas doses. A umidade do solo, a temperatura do solo, o influxo de O₂ e a viscosidade da solução do solo são as propriedades do solo que contribuíram para a caracterização da variabilidade dos efluxos de CO₂ nas condições de nosso estudo. Da mesma forma, a viscosidade como propriedade reológica dos fluidos teve influência na umidade do solo, propriedade determinante nos processos de difusão de CO₂, incluindo na respiração radicular das plantas, assim como na atividade microbiana.

Incluir a viscosidade nos modelos das perdas de carbono do solo via CO₂ produto da respiração microbiana pode contribuir para um melhor entendimento dos processos e fatores envolvidos na respiração do solo, assim como na redução de erros nas estimativas, permitindo a geração de estratégias mais eficientes de uso e manejo do solo que visem aumentar a captura e armazenamento de carbono orgânico no solo.

REFERENCIAS

Adhikari R, Mingtarja H, Freischmidt G, Bristow KL, Casey PS, Johnston P, Sangwan P (2019) Effect of viscosity modifiers on soil wicking and physico-mechanical properties of a polyurethane based sprayable biodegradable polymer membrane. **Agricultural Water Management** 222: 346–353.

Ahmad MA, Javed R, Adeel M, Rizwan M, Yang Y (2020) PEG 6000-Stimulated Drought Stress Improves the Attributes of In Vitro Growth, *Steviol glycosides* Production, and Antioxidant Activities in *Stevia rebaudiana* Bertoni. **Plants** 2020 9: 1552.

AliniaEIFard S, Asayesh ZM, Driver J, Vahdati K (2020) Stomatal features and desiccation responses of *Persian walnut* leaf as caused by in vitro stimuli aimed at stomatal closure. **Trees - Structure and Function** 34:1219–1232.

Almeida RF, Teixeira DB, Montanari R, Bolonhezi AC, Teixeira EB, Moitinho MR, Panosso AR, Spokas KA, La Scala N (2018) Ratio of CO₂ and O₂ as index for categorising soil biological activity in sugarcane areas under contrasting straw management regimes. **Soil Research** 56:373.

Angert A, Yakir D, Rodeghiero M, Preisler Y, Davidson EA, Weiner T (2015) Using O₂ to study the relationships between soil CO₂ efflux and soil respiration. **Biogeosciences** 12:2089.

Bolton TF, Havenhand JN (1997) Physiological versus viscosity-induced effects of water temperature on the swimming and sinking velocity of larvae of the serpulid polychaete *Galeolaria caespitosa*. **Marine Ecology Progress Series** 159: 209–218.

Campbell Scientific (2011) HS2 and HS2P (HydroSense II). Instruction Manual. Logan, Utah.

Canadell JG, Monteiro PMS, et al. (2021) Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In.: Masson-Delmotte V, Zhai A, et al. (Eds.) **Climate Change The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, p. 673–816. doi:10.1017/9781009157896.007

Castanho GM, Regitano JB, Tornisielo VL, Abdalla AL (2010) Sorption and mobility of polyethylene glycol (PEG 4000) in tropical soils. **Toxicological & Environmental Chemistry** 91:1263–1271. doi.org/10.1080/02772240802607386

Centurion JF (1998) **Caracterização e classificação dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal**. Jaboticabal, Universidade Estadual de São Paulo. 272 p. (Tese – Livre Docência).

Darvell BW, Wong NB (1989) Viscosity of dental waxes by use of Stokes' Law. **Dental Materials** 5:176–180.

Lucena WB, Vicentini ME, Santos GADA, Silva BDO, Costa DVMDa, Canteral KFF, Neira Román JÁ, Rolim GDS, Panosso AR, La Scala N (2023) Temporal variability of the CO₂ emission and the O₂ influx in a tropical soil in contrasting coverage conditions. **Journal of South American Earth Sciences** 121:104120.

Delsarte I, Cohen GJV, Momtbrun M, Höhener P, Atteia, O (2021) Soil carbon dioxide fluxes to atmosphere: The role of rainfall to control CO₂ transport. **Applied Geochemistry** 127:104854.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (Solos) (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: 5.ed. Embrapa. 356 p.

Faimon J, Lang M (2018) What actually controls the minute to hour changes in soil carbon dioxide concentrations? **Geoderma** 323:52–64.

Fruijtjer-Pölloth, C (2005) Safety assessment on polyethylene glycols (PEGs) and their derivatives as used in cosmetic products. **Toxicology** 214:1–38.

Hilman B, Weiner T, Haran T, Masiello CA, Gao X, Angert A (2022) The Apparent Respiratory Quotient of Soils and Tree Stems and the Processes That Control It. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences** 127.

Holthusen D, Haas C, Peth S, Horn R (2012) Are standard values the best choice? A critical statement on rheological soil fluid properties viscosity and surface tension. **Soil and Tillage Research** 125:61–71.

IPCC (2022) Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA. Shukla PR, Skea J, et al. (Eds.). Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157926

Joiner KL, Baljon A, Barr J, Rohwer F, Luque A (2019) Impact of bacteria motility in the encounter rates with bacteriophage in mucus. **Scientific Reports** 2019 9:1–12.

Jothimani K, Arulbalachandran D (2020) Physiological and biochemical studies of black gram (*Vigna mungo* (L.) Hepper) under polyethylene glycol induced drought stress. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology** 29:101777.

Kravchenko NA, Negassa WC, Guber AK, Rivers ML (2015) Protection of soil carbon within macro-aggregates depends on intra-aggregate pore characteristics. **Scientific Reports** 5:1–10.

Lal R (2018) Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology** 24:3285–3301.

Larsen OS, Madsen CV, Riisgård HU (2008) Effect of temperature and viscosity on swimming velocity of the copepod *Acartia tonsa*, brine shrimp *Artemia salina* and rotifer *Brachionus plicatilis*. **Aquatic Biology** 4:47–54.

La Scala NJ, Martinez AS, Spokas KA, Gonçalves DRP, Etto RM (2022) Should alterations in water viscosity be addressed in soil carbon models? Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2204.00405v1>. Acesso em: 22 out. 2022.

LI-COR INC. (2007) Automated Soil CO₂ Flux System & LI-8150 Multiplexer Instruction Manual. Lincoln, Nebraska.

Linn DM, Doran JW (1984) Effect of Water-Filled Pore Space on Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Production in Tilled and Nontilled Soils. **Soil Science Society of America Journal** 48:1267–1272.

Luo Y, Zhou X (2006) Processes of CO₂ Production in Soil. **Soil Respiration and the Environment** 35–59.

Manokari M, Priyadharshini S, Cokulraj M, Jayaprakash K, Dey A, Faisal M, Alatar A A, Alok A, Shekhawat M S (2022) Polyethylene glycol mediated improved shoot

proliferation, foliar morpho-anatomy, and rooting of micropropagated shoots of *Spathoglottis plicata* Blume. **South African Journal of Botany** 146:897–904.

MINISTERIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI) (2022) Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 6. ed. Brasília.

Mirbagheri AS, Fu HC (2016) *Helicobacter pylori* Couples Motility and Diffusion to Actively Create a Heterogeneous Complex Medium in Gastric Mucus. **Physical Review Letters** 116:198101.

Moitinho MR, Ferraudo AS, et al. (2021) Effects of burned and unburned sugarcane harvesting systems on soil CO₂ emission and soil physical, chemical, and microbiological attributes. **CATENA** 196:104903.

Nationally Determined Contributions (2022). In: Nationally Determined Contributions Registry. Disponível em: <https://unfccc.int/NDCREG>. Acesso em: 18 abr. 2023.

Neira J, Ortiz M, Morales L, Acevedo E (2015) Oxygen diffusion in soils: Understanding the factors and processes needed for modeling. **Chilean journal of agricultural research** 75:35–44.

OBJETIVOS DE DESARROLLO – ONU (s.d.) Disponível em: <https://onu.org.gt/objetivos-de-desarrollo/>. Acesso em: 14 dez. 2022.

Patmi YS, Pitoyo A, Solichatun S (2020) Effect of drought stress on morphological, anatomical, and physiological characteristics of Cempo Ireng Cultivar Mutant Rice (*Oryza sativa* L.) strain 51 irradiated by gamma-ray. **Journal of Physics: Conf. Series** 1436:12015. doi:10.1088/1742-6596/1436/1/012015

Panosso AR, Marques J, Pereira GT, La Scala, N (2009) Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. **Soil and Tillage Research** 105:275–282.

R DEVELOPMENT CORE TEAM (2011) R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. ISBN 3-900051-07-0.

FAO (s.d.). Recarbonization of global soils | global soil partnership. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Disponível em: <https://www.fao.org/global-soil-partnership/areas-of-work/recarbonization-of-global-soils/en/>. Acesso em: 14 dez. 2022.

Salazar A, Sulman BN, Dukes JS (2018) Microbial dormancy promotes microbial biomass and respiration across pulses of drying-wetting stress. **Soil Biology and Biochemistry** 116:237–244.

Santos GA, Moitinho, MR, De Oliveira Silva B, Xavier CV, Teixeira DDB, Corá JE, La Scala NJ (2019) Effects of long-term no-tillage systems with different succession cropping strategies on the variation of soil CO₂ emission. **Science of The Total Environment** 686:413–424.

- Schneider WR, Doetsch RN (1974) Effect of Viscosity on Bacterial Motility. **Journal of Bacteriology** 117:696–701.
- Silva BO, Moitinho MR, Santos GAA, Teixeira DDB, Fernandes C, La Scala N (2019) Soil CO₂ emission and short-term soil pore class distribution after tillage operations. **Soil and Tillage Research** 186:224–232.
- Six J, Conant RT, Paul EA, Paustian K (2002) Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil** 241:155-176.
- Sohn MH, Lim S, Seo KW, Lee SJ (2013) Effect of ambient medium viscosity on the motility and flagella motion of *Prorocentrum minimum* (Dinophyceae). **Journal of Plankton Research** 35:1294–1304.
- Tátrai ZA, Sanoubar R, Pluhár Z, Mancarella, S, Orsini F, Gianquinto G (2016) Morphological and Physiological Plant Responses to Drought Stress in *Thymus citriodorus*. **International Journal of Agronomy** 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4165750>
- Tavares DS, Fernandes TEK, Rita YL, Rocha DC, Sant'Anna-Santos BF, Gomes MP (2021) Germinative metabolism and seedling growth of cowpea (*Vigna unguiculata*) under salt and osmotic stress. **South African Journal of Botany** 139:399–408.
- Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG (Eds) (2017) Manual de Métodos de Análise de Solo. Brasília, DF: EMBRAPA, 574 p.
- Verslues PE, Ober ES, Sharp RE (1998) Root Growth and Oxygen Relations at Low Water Potentials. Impact of Oxygen Availability in Polyethylene Glycol Solutions. **Plant Physiology** 116:1403–1412.
- Vicentini ME, Pinotti CR, Hirai WY, De Moraes MLT, Montanari R, Teixeira MCM, Milori DMBP, La Scala N, Panosso AR (2019) CO₂ emission and its relation to soil temperature, moisture, and O₂ absorption in the reforested areas of Cerrado biome, Central Brazil. **Plant Soil** 444:193–211. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04262-z>
- Whittaker ET, Robinson G (1967) Trapezoidal and Parabolic rules. A Treatise of Numerical Mathematics, Dover, NY, The Calculus Observation.
- Xavier CV, Moitinho MR, Teixeira DDB, Santos GADA, Corá JE, La Scala N (2020) Crop rotation and sequence effects on temporal variation of CO₂ emissions after long-term no-till application. **Science of The Total Environment** 709:136107.
- Yan Z, Bond-Lamberty B, Todd-Brown KE, Bailey VL, Li S, Liu C, Liu C. A moisture function of soil heterotrophic respiration that incorporates microscale processes. **Nature Communications** 2018 9:1–10.
- Yang P, Van Elsas JD (2008) Mechanisms and ecological implications of the movement of bacteria in soil. **Applied Soil Ecology** 129:112–120.

Zhang S, Pei H, Plötze M, Ying H (2022) Molecular dynamics modeling of hydraulic conductivity of soil considering variable viscosity and adsorbed water. **Applied Clay Science** 228:106598.

Zhang Y, Zhu G, et al. (2022) Optimal soil water content and temperature sensitivity differ among heterotrophic and autotrophic respiration from oasis agroecosystems. **Geoderma** 425:116071. 2022.