JOURNAL OF EDUCATION, SCIENCE AND HEALTH – JESH
Revista de Educação, Ciência e Saúde
DOI: https://www.doi.org/10.52832/jesh.v6i4.716
Home page: https://bio10publicacao.com.br/jesh
e-ISSN: 2763-6119

DINÂMICA TEMPORAL DA RESPIRAÇÃO DO SOLO EM VARIEDADES DE *Pinus caribaea*

TEMPORAL DYNAMICS OF SOIL RESPIRATION IN VARIETIES OF *Pinus caribaea*

DINÁMICA TEMPORAL DE LA RESPIRACIÓN DEL SUELO EN VARIEDADES DE *Pinus caribaea*

Wanderson Benerval de Lucena[1]*; Maria Elisa Vicentini[2]; Daniel Carlos Machado[3]; Deysieli Oliveira Alves[4]; Polyana Pereira[5]; Kalil Nunes Candido[6]

[1]Doutor em Agronomia (Ciência do Solo) - Unesp. Professor Adjunto - UNIMT - Água Boa, Mato Grosso, Brasil. [2]Doutora em Agronomia (Ciência do Solo) – Unesp. Pós-Doutoranda em Ciências Agrárias (Agronomia)- IF Goiano – Rio Verde, Goiás, Brasil; [3]Mestre em Agronomia (Sustentabilidade na Agricultura) – UEMS. Doutorando em Agronomia (Ciência do Solo) – Unesp – Jaboticabal, São Paulo, Brasil; [4]Mestre em Geografia (Ambiente e Sociedade) – UFMA. Doutoranda em Agronomia (Ciência do Solo) – Unesp – Jaboticabal, São Paulo, Brasil; [5]Mestre em Agronomia (Ciência do Solo) – Unesp. Doutoranda em Agronomia (Ciência do Solo) – Unesp – Jaboticabal, São Paulo, Brasil; [6]Graduando em Engenharia Agronômica – UNIMT – Água Boa, Mato Grosso, Brasil;
*Autor correspondente: wandersondelucena@gmail.com.

Recebido: 07/07/2026 | **Aprovado**: 20/09/2026 | **Publicado**: 16/10/2026

Resumo: Este estudo analisou a variabilidade de curto prazo na emissão de CO_2 e no influxo de O_2 em Oxisol (Haplic Acrustox) sob duas variedades de *Pinus caribaea* (*Pinus caribaea var. hondurensis* - PCH e *Pinus caribaea var. caribaea* - PCC), localizado em Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil. Foram realizadas medidas repetidas ao longo do tempo, acompanhando a emissão de CO_2 do solo (FCO_2), o influxo de oxigênio (iO_2), a temperatura do solo (ST) e a umidade do solo (SM), usando o sistema EGM-5. As coletas ocorreram em 13, 14, 15, 18, 19 e 20 de julho de 2022, numeradas de 1 a 6, indicando os dias de respiração do solo. Os resultados indicaram que a emissão média de CO_2 não apresentou diferenças significativas entre as variedades, embora tenha havido variação ao longo do tempo, com maior FCO_2 na PCH no primeiro dia. O influxo de O_2 foi significativamente maior na área de PCC, que também apresentou valores superiores em quatro dos seis dias de medição. A umidade do solo foi consistentemente maior na PCC, com média de 2,7% (vol/vol), enquanto a temperatura do solo foi significativamente mais alta na PCH, atingindo 30,5 ºC ($p < 0,05$), em comparação a 29,5 ºC na PCC. Conclui-se que, embora as variedades de *Pinus* não afetem a emissão média de CO_2, elas modulam de forma distinta os padrões temporais de emissão e influxo de O_2, sugerindo que a escolha da variedade pode influenciar os processos microbianos e a dinâmica gasosa no solo a curto prazo.

Palavras-chave: Emissão de CO_2, Captura de O_2, Reflorestamento.

Abstract: This study analyzed the short-term variability in CO_2 emission and O_2 influx in a Oxisol (Haplic Acrustox) under two varieties of *Pinus caribaea* (Pinus caribaea var. hondurensis - PCH and *Pinus caribaea var. caribaea* - PCC) located in Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brazil. Repeated measures were taken over time, monitoring soil CO_2 emission (FCO_2), oxygen influx (iO_2), soil temperature (ST), and soil moisture (SM) using the EGM-5 system. Collections took place on July 13, 14, 15, 18, 19, and 20, 2022, numbered from 1 to 6, indicating the soil respiration days. The results indicated that the average CO_2 emission showed no significant differences between the varieties, although there was variation over time, with higher FCO_2 in PCH on the first day. The O_2 influx was significantly higher in the PCC area, which also showed superior values on four of the six measurement days. Soil moisture was consistently higher in PCC, while soil temperature was significantly higher in PCH, reaching 30.5 ºC ($p < 0.05$) compared to 29.5 ºC in PCC. It is concluded that although the *Pinus* varieties do not affect the average CO_2 emission, they distinctly modulate the temporal patterns of emission and O_2 influx, suggesting that the choice of variety can influence microbial processes and soil gas dynamics in the short term.

Keywords: CO_2 emission, O_2 capture, reforestation.

Resumen: Este estudio analizó la variabilidad a corto plazo en la emisión de CO_2 y el influjo de O_2 en un Oxisol (Haplic Acrustox) bajo dos variedades de *Pinus caribaea* (*Pinus caribaea var. hondurensis* - PCH y *Pinus caribaea var. caribaea* - PCC), ubicado

en Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil. Se realizaron mediciones repetidas en el tiempo, monitoreando la emisión de CO_2 del suelo (FCO_2), el influjo de oxígeno (iO_2), la temperatura del suelo (ST) y la humedad del suelo (SM), utilizando el sistema EGM-5. Las recolecciones ocurrieron el 13, 14, 15, 18, 19 y 20 de julio de 2022, numeradas del 1 al 6, indicando los días de respiración del suelo. Los resultados indicaron que la emisión promedio de CO_2 no presentó diferencias significativas entre las variedades, aunque hubo variación a lo largo del tiempo, con mayor FCO_2 en PCH el primer día. El influjo de O_2 fue significativamente mayor en el área de PCC, que también presentó valores superiores en cuatro de los seis días de medición. La humedad del suelo fue consistentemente mayor en PCC, mientras que la temperatura del suelo fue significativamente más altas en PCH, alcanzando 30,5 ºC ($p < 0,05$) en comparación con 29,5 ºC en PCC. Se concluye que, aunque las variedades de *Pinus* no afectan la emisión media de CO_2, modulan de forma distinta los patrones temporales de emisión e influjo de O_2, lo que sugiere que la elección de la variedad puede influir en los procesos microbianos y la dinámica de gases en el suelo a corto plazo.

Palabras clave: Emisión de CO_2, Captura de O_2, Reforestación.

1 INTRODUÇÃO

A respiração do solo (RS) é um processo natural de liberação de CO_2 e desempenha um papel importante na regulação do ciclo do carbono. É o principal mecanismo pelo qual os ecossistemas terrestres devolvem CO_2 à atmosfera, conforme descrito por Schlesinger e Andrews (2000). Esse processo envolve o CO_2 gerado na decomposição da matéria orgânica do solo, conhecido como respiração heterotrófica, bem como o CO_2 emitido pela atividade das raízes e da rizosfera, conhecida como respiração autotrófica (Yang *et al.*, 2024; De Lucena *et al.*, 2026).

A Respiração do Solo pode variar de acordo com os diferentes tipos e estágios de biomas florestais, devido às condições externas como temperatura, umidade, pH, matéria orgânica, entre outros fatores (Karhu *et al.*, 2014; Rodtassana *et al.*, 2021). Dessa forma, alterações no uso da terra de florestas e outros biomas levam a mudanças significativas na Respiração do Solo (Fujii *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2024). Assim, entender os fatores que influenciam essas emissões de CO_2 é crucial para avaliar os possíveis impactos das alterações no ciclo do carbono no ecossistema florestal (Pandey *et al.*, 2023).

Apesar de sua importância, a atividade respiratória do solo em áreas florestais muitas vezes recebe atenção insuficiente, já que o foco costuma estar na produção de madeira e celulose. Contudo, as florestas globais, que representam o maior bioma terrestre e cobrem cerca de um terço da superfície do planeta, são as principais responsáveis pela respiração do solo globalmente (Zhao *et al.*, 2024).

Entre as principais dificuldades para o entendimento da dinâmica temporal nesses sistemas estão a alta densidade de raízes e o acúmulo de serrapilheira, como os plantios de *Pinus*, onde a dinâmica temporal da respiração do solo é complexa (Vicentini *et al.*, 2019; De Lucena *et al.*, 2026).

Dentro desse contexto, observa-se uma falta de informação acerca da dinâmica respiratória de solos com espécies florestais, em especial, sob diferentes variedades de *Pinus*, que possui grande relevância econômica para a silvicultura brasileira. O *Pinus caribaea* var. *caribaea* formam um conjunto de 14 variedades que se diferenciam pelo número de estômatos além de espessura e número de bandas da hipoderme (Saul, 2025). Os pinheiros são as principais fontes de madeira para a indústria da construção e do mobiliário. Apresentam uma estrutura considerada grosseira dispostas verticalmente, coloração que varia entre marrom amarelada e marrom avermelhada, presença de lenho outonal e anéis de crescimento largos. Além disso, os pinheiros são relevantes para produzir terebintina,

breu, celulose e papel (Dias *et al.*, 2022; Saul, 2025).

Considerando que cerca de 50% do carbono incorporado via fotossíntese é liberado via respiração radicular (Atkin et al., 2001), componente integrante da Respiração do Solo (Luo e Zhuo, 2006). Nesse sentido, avaliar variedades vegetais dentro de uma mesma espécie florestal, surge como estratégia para auxiliar no entendimento da variabilidade temporal da Respiração do Solo nas áreas de *Pinus* (Vicentini *et al.*, 2023).

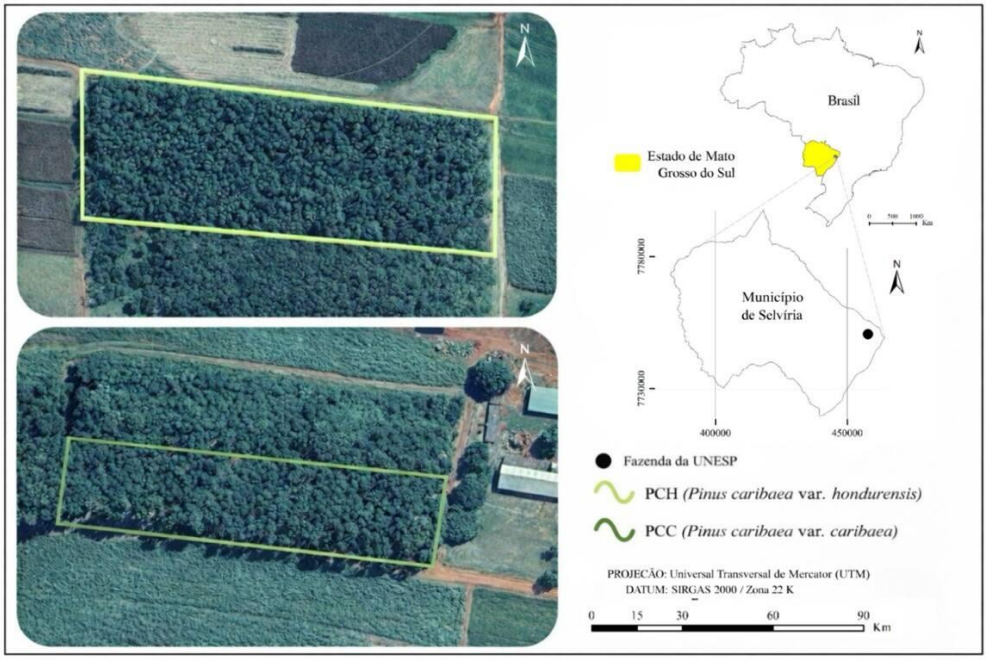
Diante do exposto, a hipótese testada é a existência de variabilidade temporal da Respiração do Solo sob variedades distintas de *Pinus caribaea*. Assim, o objetivo foi avaliar a variabilidade temporal de curto prazo da emissão de CO_2 e do influxo de O_2 em Latossolo Vermelho distrófico típico (*Oxisol - Haplic Acrustox*) sob o plantio de *Pinus caribaea var. hondurensis* e *Pinus caribaea var. caribaea* simultaneamente com atributos do solo e condições ambientais no Cerrado brasileiro.

2 METODOLOGIA

2.1 Descrição da área de estudo

As áreas de estudo estão situadas na cidade de Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil, com coordenadas geográficas: 20° 20' 53.41" S e 51° 23' 55.50" W, a 354 m de altitude (Figura 1). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Típico (Santos *et al.*, 2018), também conhecido como *Oxisol* (*Haplic Acrustox*) segundo a *Soil Taxonomy* (IUSS, 2022).

Figura 1. Localização geográfica e áreas de estudo.



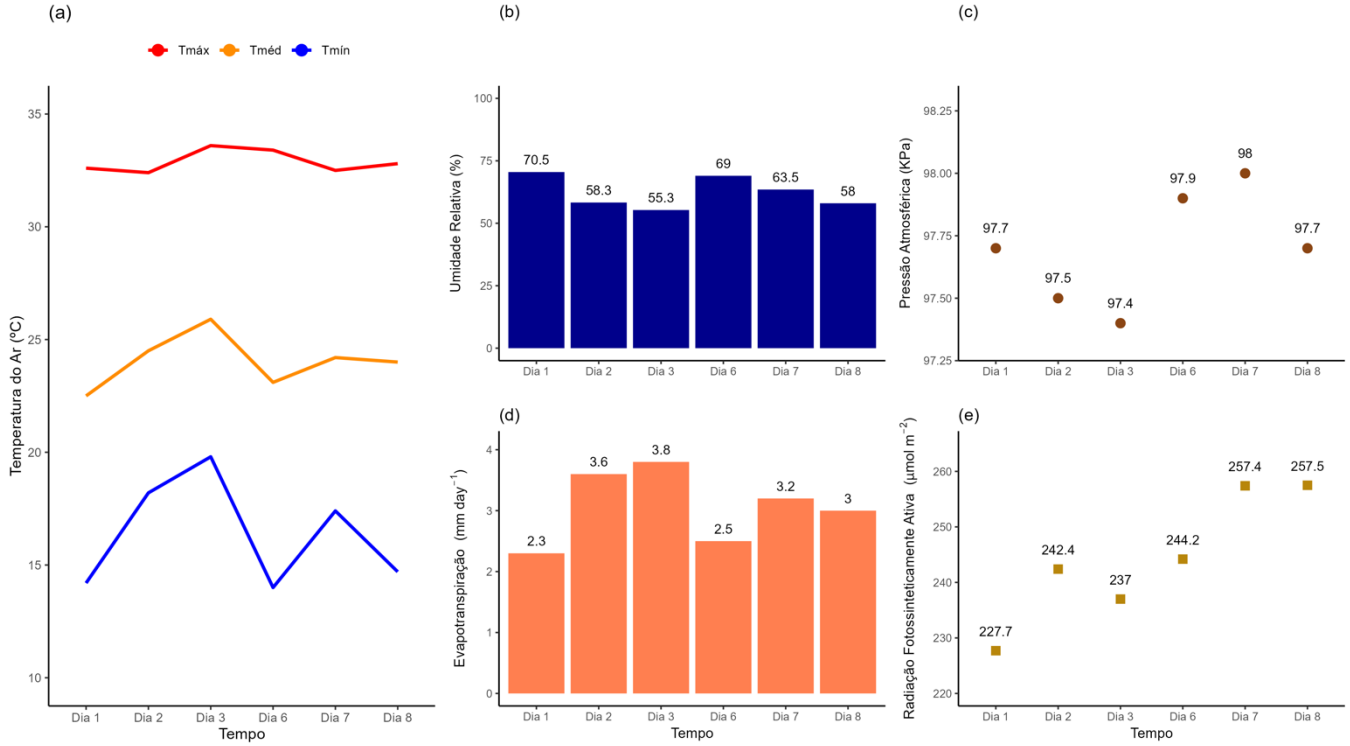
Fonte: Autores.

O clima da região é classificado como C1dAa' pelo sistema *Thornthwaite* (Thornthaite, 1948);Rolim *et al.* 2007), indicando uma área subúmida seca sem excedente hídrico. Possui uma temperatura média anual de

aproximadamente 23,5 °C e um ciclo anual de 1300 mm. A vegetação predominante é a da Savana Brasileira, ou seja, o bioma Cerrado.

Durante os experimentos, foram coletados dados diários de temperaturas (mínimas, médias e máximas, respectivamente Tmín, Tméd, Tmáx, em ºC)(Figura 2a), umidade relativa do ar (RH em %) (Figura 2b), pressão atmosférica (P_Atm) em KPa (Figura 2c), Evapotranspiração (ETo) (Figura 2d) e Fotossintética Ativa (PAR em µmol m^{-2}) (Figura 2e). Esses dados meteorológicos foram fornecidos pela Estação Agrometeorológica da Unesp, campus Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.

Figura 2. Caracterização meteorológica da área de estudo: a) Temperatura do Ar em (ºC); b) Umidade relativa () em (%); c) Pressão Atmosférica (P_Atm) em KPa; d) Evapotranspiração (ETo) pelo método de Penman-Monteith (mm dia^{-1}) e e) Radiação Fotossintética Ativa (PAR) em (µmol m^{-2}). Dados obtidos da Estação Climática de Ilha Solteira – UNESP.



Fonte: Autores.

2.2 Histórico de uso do solo

Neste estudo, duas áreas com diferentes variedades de *Pinus caribaea* foram avaliadas. Ambas as áreas cultivavam milho, soja e algodão no momento da conversão, ocorrida entre março e abril de 1986, e o uso foi mantido com reflorestamentos usando variedades de *Pinus* (Silva *et al.*, 2011; Vicentini *et al.*, 2019):

1- *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PCH): Uma população formada por três hectares de *P. caribaea* var. *hondurensis* com espaçamento de 3 x 3 metros (Vicentini *et al.* 2019).

2- *Pinus caribaea* var. *caribaea* (PCC): Formada por uma população de *P. caribaea* var. *caribaea* alocada em uma área de três hectares com espaçamento de 3 x 3 metros. Essa espécie de *Pinus* tropical é conhecida por ser a única que cresce de forma natural em baixas altitudes (Silva *et al.* 2011).

2.3 Desenho experimental

O experimento utilizou medidas repetidas ao longo do tempo (Littel *et al.,* 1998; De Lucena *et al*., 2023). As coletas de dados ocorreram nos dias 13, 14, 15, 18, 19 e 20 de julho de 2022. Essas datas foram numeradas de Dia 1 a Dia 6 e representam as leituras de respiração do solo nessas datas. Cada área de Pinus teve 12 colares de PVC, que têm 5 cm de comprimento, 10 cm de diâmetro e foram enterrados a 3 cm de profundidade no solo. As médias temporais consideram os 12 pontos de amostragem por área por dia, enquanto as médias globais levam em conta todos os pontos de amostragem multiplicados pelo número de dias de coleta.

2.4 Determinação da emissão de Co_2, influxo de O_2, umidade do solo e temperatura

Avaliações da emissão de CO_2 do solo (FCO_2), do influxo de oxigênio no solo (iO_2), da temperatura do solo (Ts) e da umidade do solo (Us) foram registradas usando o sistema de fabricação EGM-5 (Monitor de Gases Ambientais) da *PP Systems*, MA, EUA (Figura 3a). Para determinar a emissão de CO_2 e o influxo de O_2 do solo, o sistema foi acoplado à câmara de respiração do solo (Figuras 3b, c, d). Essa câmara possui um volume interno de 1.171 cm³ e uma área de contato circular de 78 cm². Esse sistema permite monitorar variações nas concentrações de CO_2 e O_2 simultaneamente. Vale mencionar que o sistema também monitora a temperatura do ar e a pressão atmosférica dentro da câmara. O tempo de monitoramento em cada ponto foi de 180 segundos (3 minutos).

Figura 3. Equipamentos. a) Analisador de gás portátil EGM-5, da *PP Systems*, b) Câmara de respiração do solo modelo SRC-2, c) Sensor de umidade do solo *HydraProbeII-Stevens*, d) Colar de PVC.



Fonte: Autores.

A partir da variação do CO_2 dentro da câmara em função do tempo, obtém-se a emissão de CO_2 do solo, expressa em µmol m^{-2} s^{-1} (Equação 1), conforme proposto por Parkinson (1981).

$$FCO2 = \frac{dC}{dT}\frac{\mu mol}{mol\ s} \times \frac{P}{1013} \times \frac{273}{273+T_{ar}} \times \frac{1\ mol}{22{,}414\ L} \times \frac{V\ m^3}{A\ m^2} \times \frac{10^3 L}{m^3} \qquad (1)$$

onde:

dC/dT = é a variação de CO_2 dentro da câmara em função do tempo;

P/1013 = é a correção de pressão barométrica com P medida em mbar pelo EGM-5;

T_{ar} = correção de temperatura do ar com T_{ar} medida em ºC;

1 mol/22,414 L = é o volume molar e a constante dos gases ideais;

V/A = é o volume da câmara e a área da superfície do solo.

O influxo de oxigênio do solo (iO_2) foi obtido por interpolação linear da variação na concentração de oxigênio dentro da câmara EGM-5 durante 180 segundos, considerando a pressão atmosférica, a temperatura absoluta do ar em Kelvin e o volume da câmara. Assim, a depleção da concentração de O_2 é obtida em função do tempo amostrado. O influxo de O_2 do solo foi calculado pela equação 2 e apresentado em mg O_2 m^{-2} s^{-1}, conforme descrito por Jassal *et al.* (2012), Giacomo *et al.* (2014) e De Lucena et al. (2023).

$$iO2 = \frac{dO_2\ PM}{dt\ RT} H \qquad (2)$$

onde:

dO_2/dt = é a quantidade de O_2 (ppm) medida em função do tempo t (s);

P = é a pressão atmosférica corrigida (Pa);

M = é a massa molar do O_2 (g mol^{-1});

R = é a constante universal dos gases (8,314462 J mol^{-1} K^{-1});

T = é a temperatura absoluta (K);

H = V/A, sendo V o volume (m^3) = 6,6 x 10^{-6} m^3 e A a área do colar (m^2) acima do solo.

Enquanto isso, a variação na umidade e na temperatura do solo também foi monitorada pelo EGM-5 usando o sensor *HydraProbe*, que acompanha as mudanças na umidade e na temperatura do solo durante a medição da respiração do solo. A faixa de leitura permitida para a umidade do solo é de 0 a 100% (de seco a saturado), enquanto a faixa de temperatura do solo é de -10 a 55 °C. Assim, a umidade do solo é expressa em porcentagem (volume/volume), enquanto a temperatura do solo é dada em graus Celsius.

2.5 Processamento e análise de dados

Primeiramente, as hipóteses de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias foram avaliadas, ambas ao nível de 5%, conforme os testes de Shapiro-Wilk (1965) e Bartlett (1937), respectivamente. Os resíduos analisados apresentaram distribuição normal de acordo com o teste de Shapiro-Wilk (estatística W = 0,932, p = 0,40). Além disso, constatou-se homocedasticidade pelos resultados do teste de Bartlett (estatística K^2 = 0,117, p = 0,75).

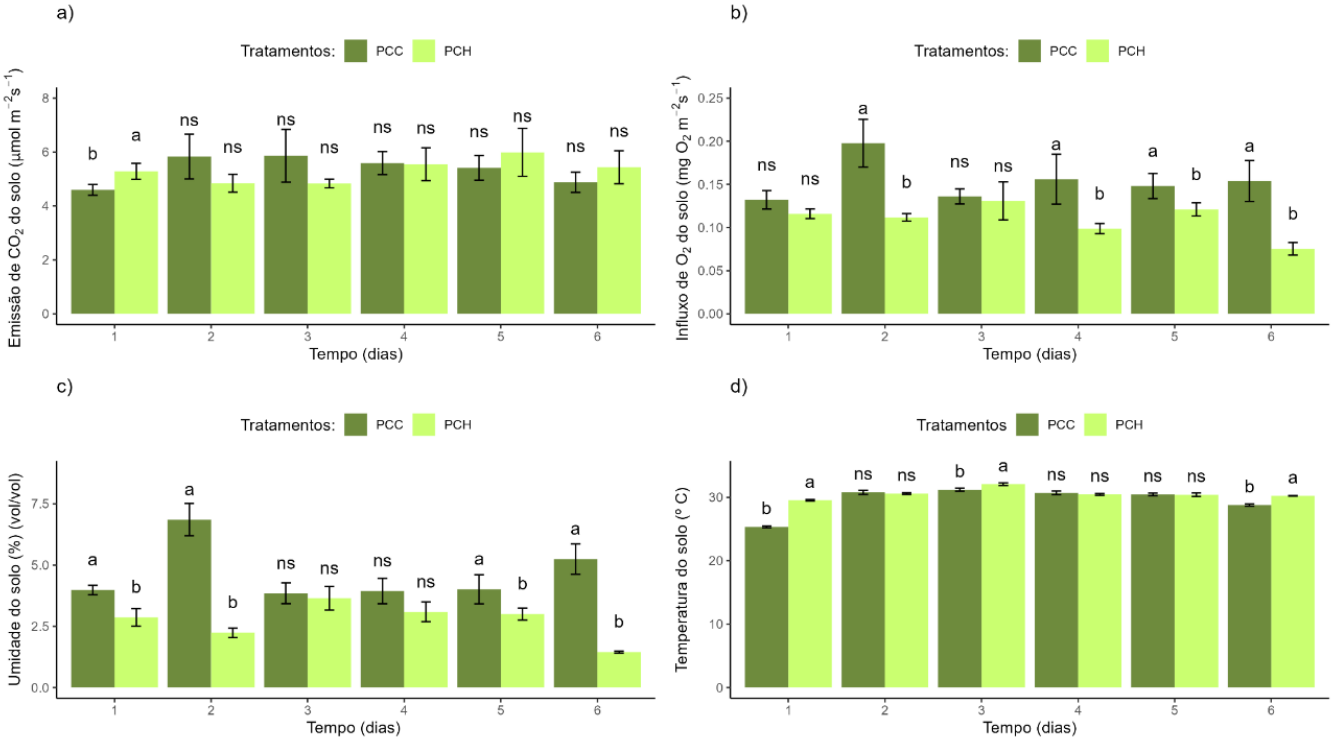
A variabilidade ao longo do tempo foi avaliada por análise de variância para experimentos com medidas repetidas ao longo do período. Assim, as médias temporais foram calculadas conforme a orientação de Littell *et al.* (1998), e as médias gerais de cada variedade também foram determinadas usando esse método. Para comparações múltiplas entre médias, foi utilizado o teste de Tukey (Tukey, 1949).

3 RESULTADOS

3.1 Valores médios e dinâmica temporal para emissão de Co_2, influxo de O_2, temperatura e umidade do solo

Não houve diferença significativa na emissão média de CO_2 do solo entre as variedades de *Pinus caribaea* estudadas (Figura 4a); no entanto, foi observada uma variação significativa no padrão temporal dessa emissão no primeiro dia de avaliação, com maior emissão na área de *P. caribaea* var. *hondurensis* (PCH) (5,28 µmol m^{-2} s^{-1}), de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Do segundo ao sexto dia de avaliação, não foram detectadas diferenças nos padrões temporais de emissão de CO_2 do solo entre as variedades *hondurensis* e *caribaea* ($p > 0,05$).

Figura 4. Variabilidade temporal em: a) emissão de CO_2 do solo (µmol m^{-2} s^{-1}), b) influxo de O_2 do solo (mg O_2 m^{-2} s^{-1}), c) umidade do solo (%) (volume/volume), d) temperatura do solo (ºC). Médias seguidas de letras iguais não diferiram entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Nota: ns é não significativo. PCH é *Pinus caribaea var. hondurensis*. PCC é *Pinus caribaea var. caribaea*. N = 12.



Fonte: Autores.

O influxo médio de oxigênio do solo foi superior e significativo na área PCC (0,14 mg O_2 m^{-2} s^{-1}) ($p < 0,05$) (Figura 4b). Foram notadas variações nos padrões temporais do influxo de O_2 entre as variedades de *Pinus*. Os valores da área PCC foram superiores aos da PCH nos dias dois, quatro, cinco e seis (0,20; 0,16; 0,15 e 0,15 mg O_2 m^{-2} s^{-1}, respectivamente) ($p < 0,05$).

A umidade média do solo variou entre as variedades de *Pinus* ($p < 0,05$) (Figura 4c). A área de PCC apresentou uma umidade média de 4,6 % (vol/vol), sendo significativamente maior ($p < 0,05$) do que na área PCH, que teve uma média de 2,7 % (vol/vol). A umidade do solo mostrou variação temporal significativa nos

dias um, dois, cinco e seis, estando sempre maior na área de PCC em comparação com PCH, com valores de 4,0; 6,9; 4,0 e 5,2 % (vol/vol), respectivamente ($p < 0,05$).

A temperatura média do solo variou entre as variedades de *Pinus* (Figura 4d), mas, ao contrário do que foi observado na umidade do solo, ela foi maior na área PCH, sendo estatisticamente significativa (30,5 ºC) ($p < 0,05$) em comparação à área PCC (29,5 ºC). Na área PCC, a temperatura do solo variou de 25,3 a 30,8 ºC, enquanto na área PCH, oscilou de 29,5 a 32,1 ºC. Ao longo do tempo, a temperatura do solo na área PCH foi maior nos dias um, três e seis. Todas as diferenças entre médias apresentadas foram analisadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4 DISCUSSÃO

A Respiração do Solo está relacionada a fatores como temperatura e umidade do ar, que podem influenciar positivamente ou negativamente a temperatura e umidade do solo, impactando as emissões. Como mostrado na Figura 2a, as temperaturas máximas e médias variaram entre 22 e 35°C, enquanto a umidade relativa (Figura 2b) oscilou entre 50 e 70%, favorecendo o aumento da temperatura e umidade do solo (Figura 4a e 4d). Essas condições podem estimular a atividade de bactérias, fungos e raízes no solo, contribuindo para a melhoria da respiração do solo (Zhao et al., 2022; Qin et al., 2024; Li et al., 2025).

Como ilustrado na Figura 4 a, houve uma diferença significativa na emissão de CO_2 no primeiro dia, com a PCH apresentando valores superiores aos da PCC devido à relação com a temperatura do solo (Figura 4 d). No sexto dia, apesar de não apresentar diferença significativa, a PCH apresentou uma temperatura mais elevada, assim obtendo uma maior emissão de CO_2. Isso ocorre porque a temperatura influencia as emissões de CO_2 (Beckstoffer *et al.*, 2024). Com isso, a taxa de respiração do solo aumenta exponencialmente com cada aumento de 10 °C na temperatura, conhecida como sensibilidade à temperatura (Mundim *et al.*, 2020; Qin et al., 2024), que é um fenômeno de respiração do solo em resposta às mudanças climáticas (Wang *et al.*, 2024).

A variabilidade temporal da temperatura do solo está relacionada às condições climáticas (La Scala Jr *et al.*, 2000; Canteral *et al.*, 2023; De Lucena *et al.*, 2023; Vicentini *et al.*, 2023). A temperatura e umidade do solo desempenham um papel vital na estimulação da respiração microbiana do solo e da respiração autotrófica (Xu *et al.*, 2024). Há um consenso de que a Respiração do Solo aumenta com o aumento da temperatura (Kirschbaum, 1995), e também foi estabelecido que a respiração do solo diminui quando os solos estão excessivamente secos ou úmidos (Orchard e Cook, 1983; Moyano *et al.*, 2012; Meyer *et al.*, 2018).

O tipo de vegetação influencia significativamente a atividade microbiana e a respiração do solo, alterando sua temperatura e umidade na camada superficial (Xu *et al.*, 2024). Como mostrado nas Figuras (4a, b, c, d), embora as diferenças não sejam muito acentuadas, a espécie PCC destacou-se por apresentar valores superiores aos de PCH. Isso pode estar relacionado às características das espécies. A PCH apresenta crescimento mais rápido, com tendência à formação de ramificações laterais, resultando em uma copa mais aberta e menos densa, o que pode ter impactado a variável umidade (Figura 4c) (Fritzsons *et al.*, 2013; De Lucena *et al.*, 2025). Além disso, a umidade do solo, frequentemente é um fator limitante da Respiração do Solo (Sass et al., 2020; Rodrigues de Sousa Santos et al., 2024), também pode ter influenciado esses resultados.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que, embora as variedades de *Pinus* não afetem a emissão média de CO_2, elas modulam de forma distinta os padrões temporais de emissão e influxo de O_2, sugerindo que a escolha da variedade pode influenciar os processos microbianos e a dinâmica gasosa no solo a curto prazo.

Sugere-se que pesquisas futuras explorem os mecanismos subjacentes a essas diferenças, incluindo a qualidade da serapilheira e a estrutura radicular, além de monitorar esses fatores ao longo do tempo para compreender melhor os efeitos ecológicos de longo prazo.

Conflito de interesses

Os autores declaram que não há conflitos de interesse. Todos os autores estão cientes da submissão do artigo.

Contribuições dos autores

W.B. De Lucena - Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Recurso, Redação - rascunho original, Redação - revisão e edição, D.C. Machado - Redação - rascunho original, Redação - revisão e edição, M.E. Vicentini, P. Pereira, D.O. Alves - Investigação, Metodologia, K.N. Candido - Redação - revisão e edição.

REFERÊNCIAS

Atkin, O. K., Edwards, E. J., Loveys, B. R. (2000). Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. *New Phytologist*, 147 (1), 141-154. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2000.00683.x.

Bartlett, M. S. (1937). Properties of Sufficiency and Statistical Tests. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, *Mathematical and Physical Sciences*, 160 (901), 268–282. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/96803. Acesso em 06 oct 2025.

Beckstoffer, C., Hall, J. S., Silver, W. L. (2024). Rapid recovery of soil respiration during tropical forest secondary succession on former pastures. *Forest Ecology and Management*, 572, 122263. DOI:10.1016/j.foreco.122263.

Canteral, K. F. F., Vicentini, M. E., De Lucena, W. B., Moraes, M. L. T., Montanari, R., Ferraudo, A. S., Peruzzi, N. J., La Scala Jr, N., Panosso, A. R. (2023). Machine learning for prediction of soil CO_2 emission in tropical forests in the Brazilian Cerrado. *Environmental Science and Pollution Research*. DOI: 10.1007/s11356-023-26824-6.

De Lucena, W. B., Vicentini, M. E., Santos, G. A. A. D., Silva, B.O., Costa, D. V. M., Canteral, K. F. F., Neira Román, J. A., Rolim, G. S., Panosso, A. R., La Scala Jr, N. (2023). Temporal variability of the CO_2 emission and the O_2 influx in a tropical soil in contrasting coverage conditions. *Journal of South American Earth Sciences,* 123. DOI: 10.1016/j.jsames.2022.104120.

De Lucena, W. B., Canteral, K. F. F., Vicentini, M. E., Zulian, D. F., Lima, R. P., Moraes, M. L. T., Cherubin, M. R.; Cerri, C. E. P., Panosso, A. R., La Scala Jr, N. (2025). assessing short-term temporal variability of CO_2 emission and soil O_2 influx in tropical pastures and regenerating forests. *Applied Sciences*, 15. DOI: 10.3390/app152212302.

De Lucena, W.B., Machado, D.C., Pereira, P., Vicentini, M. E., Neira Román, J. A., Rolim, G. S., Panosso, A. R.; La Scala Jr, N. (2026). Partitioning Soil Respiration: Differentiating Root Contributions and Environmental Factors. *Agricultural Research*. DOI: 10.1007/s40003-025-00930-y.

Dias, M. C., Oliveira, J. M. P. F., Marum, L., Pereira, V., Almeida, T., Nunes, S., Araújo, M., Moutinho-Pereira, J., Correia, C. M., Santos, C. (2022). Pinus elliottii and P. Elliottii x P. Caribaea hybrid differently cope with combined drought and heat episodes. *Industrial Crops and Products*, 176, 114428. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.114428.

Fritzsons, E., Aguiar, A. V. de., Mantovani, L. E., Wrege, M. S., Bognola, I. A. (2013). *Carta de zoneamento de Pinus caribaea para o Estado do Paraná.* Embrapa Florestas, Colombo, PR.

Fujii, K., Funakawa, S., Hayakawa, C., Kosaki, T. (2021). Effects of clearcutting and girdling on soil respiration and fluxes of dissolved organic carbon and nitrogen in a Japanese cedar plantation. *Forest Ecology and Management*, 498, 119520. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119520.

Giacomo, G., Angelo, F., Fabio, B., Stefano, B., Riccardo, M. (2014). Measurements of soil carbon dioxide emissions from two maize agroecosystems at harvest under different tillage conditions. *Scientific World Journal*. DOI: 10.1155/2014/141345.

IUSS WORKING GROUP WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources. *International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.

Jassal, R. S., Black, T. A., Nesic, Z., Gaumont-Guay, D. (2012). Using automated non-steady state chamber systems for making continuous long-term measurements of soil CO_2 efflux in forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 161, 57-65. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.03.009.

Karhu, K., Auffret, M. D., Dungait, J. A., Hopkins, D. W., Prosser, J. I., Singh, B. K., Subke, J., Wookey, P. A., Ågren, G. I., Sebastià, M., Gouriveau, F., Bergkvist, G., Meir, P., Nottingham, A. T., Salinas, N.; Hartley, I. P. (2014). Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. *Nature*, 513 (7516), 81-84. DOI: 10.1038/nature13604.

Kirschbaum, M. U. (1995). The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry*, 27 (6), 753-760. DOI:10.1016/0038-0717(94)00242-S.

La Scala Jr,. N.; Marques, J. R. J., Pereira, G. T., Corá, J. E. (2000). Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 32 (10), 1469-1473. DOI: 10.1016/S0038-0717(00)00053-5.

Li, L., Yang, H., Li, H., Sun, J., Shang, F. (2025). Soil respiration and its temperature sensitivity in Pinus koraiensis plantations are mediated by temperature, humidity, and wind speed. *Trees, Forests and People*, 19, 100784. DOI: 10.1016/j.tfp.2025.100784.

Littell, R.C., Henry, P. R., Ammerman, C. B. (1998). Statistical analysis of repeated measures using SAS procedures. *Journal of Animal Science*, 76 (4), 1216-1231. DOI: 10.2527/1998.7641216x.

Luo, Y., Zhou, X. (2006). *Soil respiration and the environment*. San Diego: Academic Press. 316 p.

Meyer, N., Welp, G., Amelung, W. (2018). The Temperature Sensitivity (Q10) of Soil Respiration: Controlling Factors and Spatial Prediction at Regional Scale Based on Environmental Soil Classes. *Global Biogeochemical Cycles*, 32 (2), 306-323. DOI: 10.1002/2017GB005644.

Moyano, F. E., Vasilyeva, N., Bouckaert, L., Cook, F., Craine, J., Curiel Yuste, J., *et al.* (2012). The moisture response of soil heterotrophic respiration: interaction with soil properties. *Biogeosciences*, 9 (3), 1173–1182. DOI: 10.5194/bg-9-1173-2012.

Mundim, K. C., Baraldi, S., Machado, H. G., Vieira, F. M. (2020). Temperature coefficient (Q10) and its applications in biological systems: Beyond the Arrhenius theory. *Modelagem EcolóGica*, 431, 109127. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2020.109127.

Orchard, V. A., Cook, F. J. (1983). Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, 15 (4), 447–453. DOI:10.1016/0038-0717(83)90010-X.

Pandey, R., Rawat, M., Singh, R., Bala, N. (2023). Large scale spatial assessment, modelling and identification of drivers of soil respiration in the Western Himalayan temperate forest. *Ecological Indicators*, 146, 109927. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.109927.

Qin, S., Zhang, D., Wei, B.*et al* . (2024). Dual roles of microbes in mediating soil carbon dynamics in response to warming. *Nat Commun*, 15, 6439. DOI: 10.1038/s41467-024-50800-4.

R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 10 dec 2024.

Santos, D. R. S., Silva-Neto, C. M., Chotti, C. P.T., Bombardelli, W. Á., Battisti, R., Tomazello-Filho, M., Lavres, J. (2023). Climate-growth relation and isotopic Δ13carbon responses of field-grown Pinus caribaea var. Hondurensis and Pinus taeda to nutrient availability. *Forest Ecology and Management,* 552, 121548. DOI:10.1016/j.foreco.2023.121548.

Rodtassana, C., Unawong, W., Yaemphum, S., Chanthorn, W., Chawchai, S., Nathalang, A., Brockelman, W. Y. (2021). Different responses of soil respiration to environmental factors across forest stages in a Southeast Asian forest. *Ecology and Evolution*, 11 (21), 15430-15443. DOI: 10.1002/ece3.8248.

Rolim, G. S., Camargo, M. B. P., Lania, D. G., Moraes, J. F. L. (2007). Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. *Bragantia*, 66 (4), 711-720. 10.1590/S0006-87052007000400022.

Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araujo Filho, J. C., Oliveira, J. B., Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5ed. Brasília: Embrapa. 356p.

Sass, A. L., Bassaco, M. V. M., Motta, A. C. V., Maeda, S., Barbosa, J. Z., Bognola, I. A., Bosco, J. V. G., Goularte, G. D., Prior, S. A. (2020). Cellulosic industrial waste to enhance Pinus taeda nutrition and growth: A study in subtropical Brazil. *Scientia Forestalis*, 48, 1–16. DOI: 10.18671/SCIFOR.V48N126.13.

Saul, F. A. C. (2025). *Seleção de genótipos de Pinus caribaea Morelet var. bahamensis e Pinus caribaea Morelet var. hondurensis Barret e Golfari para produção de resina e madeira comparado em dois sistemas de resinagem*. (Tese de doutorado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Programa de Pós-graduação em Agronomia (Sistemas de Produção).

Schlesinger, W. H., Andrews, J. (2000). A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48 (1), 7–20. DOI: 10.1023/A:1006247623877.

Shapiro, S. S., Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52 (34), 591-611. DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591.

Silva, B.O. *Emissão de CO_2, estoque e humificação do carbono do solo em áreas convertidas do bioma Cerrado, Brasil Central.* Jaboticabal. (2021). 89 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Universidade Estadual Paulista.

Thornthaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38 (1), 55-94. Disponível em https://www.jstor.org/stable/210739. Acesso em: 15 dec 2024.

Tukey, J. W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 38 (1), 55-94. DOI: 10.2307/3001913.

Vicentini, M. E., Pinotti, C. R., Hirai, W.Y., Moraes, M. L. T., Montanari, R., Teixeira Filho, M. C. M., Milori, D. M. B. P., La Scala, J. R. N., Panosso, A. R. (2019). CO_2 emission and its relation to soil temperature, moisture, and O_2 absorption in the reforested areas of Cerrado biome Central Brazil. *Plant and Soil*, 444, 193-211. DOI: 10.1007/s11104-019-04262-z.

Vicentini, M. E., Silva, P. A., Canteral, K. F. F., De Lucena, W. B., Moraes, M. L. T., Montanari, R., Teixeira Filho, M. C. M., Peruzzi, N. J., La Scala, J. R. N., Rolim, G. S., Panosso, A. R. (2023). Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems for prediction of soil respiration in forested areas southern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195 (9), 1074. DOI: 10.1007/s10661-023-11679-8.

Wang, M., Zhang, S., Guo, X., Xiao, L., Yang, Y., Luo, Y., Mishra, U., Luo, Z. (2024). Responses of soil organic carbon to climate extremes under warming across global biomes. *Nature Climate Change*, 14 (1), 98-105. DOI: 10.1038/s41558-023-01874-3.

Yang, L., Zhang, H., Qin, J., Liu, X., Mayer, M. (2024). A global meta-analysis of forest harvesting effects on soil respiration, its components, and temperature sensitivity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 358, 110259. DOI: 10.1016/j.agrformet.2024.110259.

Zhao, Z., Ding, X., Wang, G., Li, Y. (2024). 30 m Resolution Global Maps of Forest Soil Respiration and Its Changes From 2000 to 2020. *Earth's Future*, 12 (2). DOI: 10.1029/2023EF004007.

Xu, Y., Luo, T., Wu, B., Xia, Z., Xu, W., Gao, J. (2024). Soil carbon emissions and influential factors across various stages of vegetation succession in vegetated concrete. *Scientific Reports*, 14, 5963. DOI: 10.1038/s41598-024-56473-9.