

Análise da Relação Solo, Vegetação, Clima: Um Estudo de Caso na Bacia do Córrego Santa Cruz em Itabira/MG

Analysis of the Soil-Vegetation-Climate Relationship: A Case Study in the Santa Cruz Stream Watershed in Itabira/MG

Rhanderson dos Reis DIAS¹ , Ana Carolina Vasques FREITAS¹  & Gláucio Marcelino MARQUES¹ 

¹Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas (ICPA), Itabira, MG, Brasil. E-mail: rhandersondias@unifei.edu.br; ana.freitas@unifei.edu.br; glauciomarques@unifei.edu.br.

Resumo: Esta pesquisa apresenta uma investigação sobre a interação dinâmica entre clima, solo e vegetação em uma bacia hidrográfica localizada no município de Itabira em Minas Gerais. Foi realizada uma análise comparativa de parâmetros físicos em áreas com diferentes usos e ocupação da terra, por meio da amostragem de solo, condições meteorológicas e fluxo de dióxido de carbono (CO₂), além de levantamento da flora presente na área de estudo. Assim, o objetivo principal foi verificar como as interações entre os elementos específicos de cada área influenciam nos resultados. Para isso, foram selecionadas quatro áreas: uma degradada, outra em processo de recuperação ecológica, a terceira com mata densa e, por fim, uma de pastagem. Em cada área selecionada o solo e o fluxo de CO₂ foi amostrado em altitudes semelhantes, e foram conduzidas em laboratório análises de densidade do solo e partículas e porosidade total. Os resultados demonstraram que áreas preservadas apresentam temperaturas do ar e do solo mais amenas, alta umidade do ar, baixa luminosidade, solos com baixa densidade e alta porosidade, e baixas taxas de emissão de CO₂. Assim, ressalta-se a necessidade de preservação da vegetação e manutenção do solo na bacia hidrográfica para que seja possível a maior oferta de serviços ecossistêmicos, uma vez que a região apresenta uma rica biodiversidade e capacidade de sustentação de várias espécies, e sua vegetação nativa contribui para a captura de carbono, auxiliando no combate às mudanças climáticas, o que é fundamental para assegurar a continuidade dos benefícios proporcionados pelos ecossistemas da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: manutenção dos solos; emissão de CO₂; áreas degradadas; condições meteorológicas; recuperação ecológica.

Abstract: This research presents an investigation into the dynamic interaction between climate, soil, and vegetation in a watershed located in the municipality of Itabira in Minas Gerais. A comparative analysis of physical parameters was conducted in areas with different land uses and occupations through soil sampling, meteorological conditions, and carbon dioxide (CO₂) flux, as well as a survey of the flora present in the study area. Thus, the main objective was to verify how the interactions between the specific elements of each area influence the results. To this end, four areas were selected: one degraded, another in the process of ecological recovery, a third with dense forest, and finally, a pasture area. In each selected area, the soil and CO₂ flux were sampled at similar altitudes, and laboratory analyses of soil density particles and total porosity were conducted. The results showed that preserved areas have milder air and soil temperatures, high air humidity, low luminosity, soils with low density and high porosity, and low CO₂ emission rates. Thus, the need for vegetation preservation and soil maintenance in the watershed is highlighted to provide a greater supply of ecosystem services, as the region has rich biodiversity and the capacity to support various species, and its

native vegetation contributes to carbon sequestration, helping to combat climate change. This is fundamental for ensuring the continuity of the benefits provided by the watershed ecosystems.

Keywords: soil maintenance; CO₂ emission; degraded areas; meteorological conditions; ecological recovery.

1. Introdução

Os impactos das mudanças climáticas no meio ambiente, ecossistemas, recursos hídricos, solos, entre outros, têm sido motivo de grande preocupação ao redor do mundo (*Intergovernmental Panel on Climate Change* [IPCC], 2023). As emissões excessivas de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases, tais como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), agravam ainda mais esse cenário de alterações climáticas (Junior, 2020).

Conforme Silva & Jatobá (2017), o clima exerce influência sobre os solos e demais formações superficiais, interferindo, assim, no desenvolvimento das formações vegetais e suas características, as quais, portanto, podem ser diferenciadas em várias regiões, reforçando a necessidade de estudos e pesquisas acerca da relação clima-solo-vegetação.

De acordo com Fritzsons *et al.* (2023), toda vegetação na superfície da terra depende de elementos climáticos como a temperatura e umidade, e a medição destes é imprescindível quando se pretende avaliar o desenvolvimento de uma espécie, um conjunto de espécies, ou todo um ecossistema, sendo que esses elementos climáticos são influenciados pelos fatores locais, como o uso e cobertura da terra, altitude, entre outros.

A vegetação é um elemento de extrema importância na troca de água, energia e carbono entre a superfície da terra e a atmosfera. Além disso, a vegetação fornece múltiplos serviços ecossistêmicos essenciais, como a produção de alimentos e a absorção de dióxido de carbono (Reis *et al.*, 2022). Esta última é fundamental para mitigar as mudanças climáticas devido às atividades antrópicas (Li *et al.*, 2022).

As interferências que ocorrem entre a tríplice clima-solo-vegetação não se dão apenas por fatores naturais, mas também antrópicos, como a urbanização, que por si só é capaz de atenuar alterações climáticas locais/regionais, dado a profunda interferência na paisagem e uso dos solos devido a remoção da vegetação, afetando os processos naturais do solo" (Shinzato & Duarte, 2018). Além disso, os grandes centros urbanos são responsáveis por aproximadamente 75% das emissões de gases de efeito estufa em nível mundial (UN-HABITAT, 2011; WORLD BANK, 2010).

As emissões de dióxido de carbono estão relacionadas às propriedades do solo: matéria orgânica (Yuste *et al.*, 2019), umidade do solo (Dowhower *et al.*, 2020), temperatura do solo (Yuste *et al.*, 2019; Zou *et al.*, 2018) e comunidades microbianas do solo (Nikolenko *et al.*, 2019). Assim, o uso da terra é um fator extremamente relevante para mitigar ou agravar as mudanças climáticas, dado a sua interferência no ciclo do carbono.

Segundo Farina *et al.* (2017) existem evidências comprovadas de que solos adequadamente gerenciados podem se tornar sumidouros de carbono, contribuindo significativamente para a redução das emissões de CO₂ para a atmosfera. Os sistemas agroflorestais, por exemplo, desempenham um papel essencial na captura e armazenamento de carbono atmosférico, contribuindo, assim, para a redução das concentrações de CO₂ na atmosfera. Além disso, a diversidade de espécies nos sistemas agroflorestais promove a fertilidade do solo, melhorando a sua capacidade de retenção de carbono. Portanto, o sequestro de carbono em sistemas agroflorestais não apenas atenua os impactos das mudanças climáticas, mas também promove a resiliência dos ecossistemas agrícolas, resultando em benefícios ambientais e econômicos a longo prazo (Wolf, 2012).

Na climatologia, destaca-se que a variedade de climas existentes no mundo influencia diretamente na configuração das distintas formações vegetais, tais como Florestas Equatoriais, Florestas Tropicais, Estepes, Desertos, Floresta de Coníferas, Taiga, entre outras (Köppen, 1931, p. 112).

Assim, esta pesquisa objetiva estudar a relação clima-solo-vegetação de uma área localizada dentro da sub-bacia hidrográfica do Rio do Peixe, denominada de Bacia do Córrego Santa Cruz, situada em Itabira, cidade do interior de Minas Gerais. A sub-bacia hidrográfica do rio do Peixe abrange os municípios de Itabira, de Nova Era e de Santa Maria de Itabira, possuindo uma área de drenagem igual a 407 km², sendo uma região muito antropizada devido à presença de centros urbanos em suas margens. Bonfim *et al.* (2013) comenta que os estudos nesta área ainda são escassos e recentes, sendo estes, portanto, de grande importância para o desenvolvimento de novas pesquisas na sub-região.

2. Materiais e Métodos

2.1 Caracterização geral da área de estudo

A área de estudo desta pesquisa é comumente conhecida como Pesqueiro do Paquinha, e está localizada na Zona Rural do município de Itabira, em Minas Gerais, na bacia hidrográfica do Córrego Santa Cruz, nas coordenadas 19°43'3.64"S e 43°11'30.34"W, conforme Figura 1, na qual é possível observar também o limite do município.

Segundo dados do IBGE (2022), a cidade ocupa uma área territorial de 1.253,704 km², e possui 113.343 habitantes. Dados de 2019 da mesma fonte, informam que o município tem uma área urbanizada de 25,63 km².

Atualmente, a área de estudo é um pesqueiro, usufruindo da piscicultura como principal atividade econômica para manutenção e custeio geral do espaço. Com relação aos tipos de solo, predomina apenas um tipo, sendo este um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (Correa, 2018). Segundo o Plano Diretor Participativo de Itabira (2016), os principais solos encontrados na delimitação da cidade, são o Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho Distrófico e Argissolo Vermelho-Amarelo, porém o domínio pedológico é do Latossolo Vermelho Distrófico.

Sobre a vegetação, em ITABIRA (2016), em seu primeiro encarte revisado e publicado, enquadra o município numa zona de transição entre os biomas de Mata Atlântica e Cerrado; já, a área de estudo se encontra dentro do bioma de Mata Atlântica, e pode ser identificada também como Floresta Estacional Semidecidual.

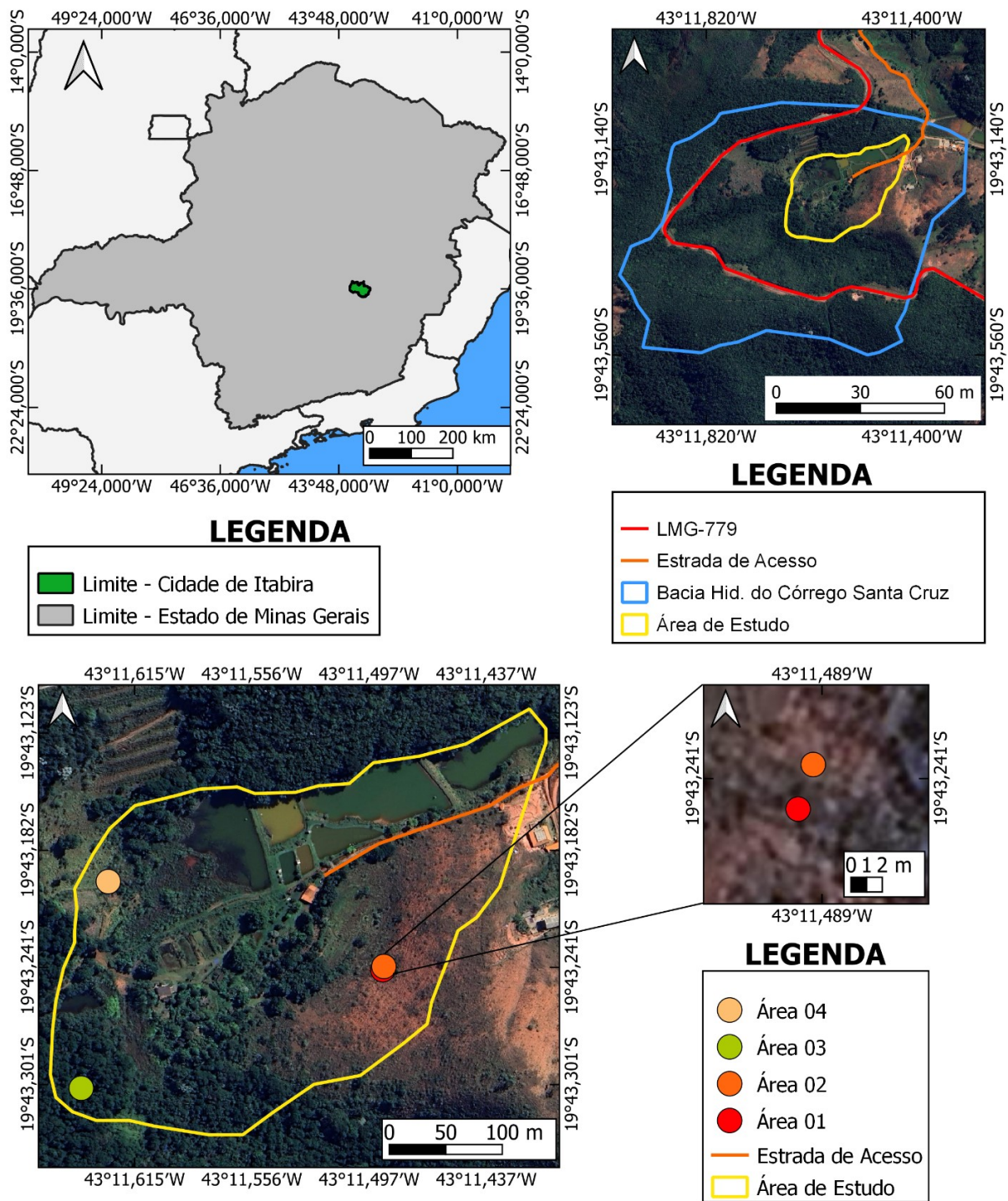


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo (Autor com base nos dados do IDE-SISEMA, 2023)

Figure 1. Location map of the study area (Author based on the IDE-SISEMA data, 2023)

2.1.1 Características climáticas da região estudada

Em termos climáticos, o município de Itabira apresenta classificação de Köppen-Geiger como Cwa (Clima subtropical úmido). No geral, o clima é moderado com verões quentes e chuvosos, sendo que a entrada de frentes frias reduz a temperatura no inverno, com mínimas abaixo de 20°C. (Martins *et al.*, 2018).

Na Figura 2 pode-se visualizar o climograma para Itabira no período de 1981-2010, a partir dos dados do ERA5 (COPERNICUS, 2023). Verifica-se que a precipitação total média anual em Itabira é de 1.391,3 mm. A precipitação média mensal varia entre 15,4 mm (julho) a 286,7 mm (dezembro). A temperatura média anual é de 21,8°C, com variações mensais de 18,5°C em julho a 24,4°C em fevereiro. As máximas oscilam entre 24,4°C em julho e 29,5°C em fevereiro (Figura 2), enquanto as mínimas vão de 13,6°C em julho a 20,2°C em fevereiro (Figura 2).

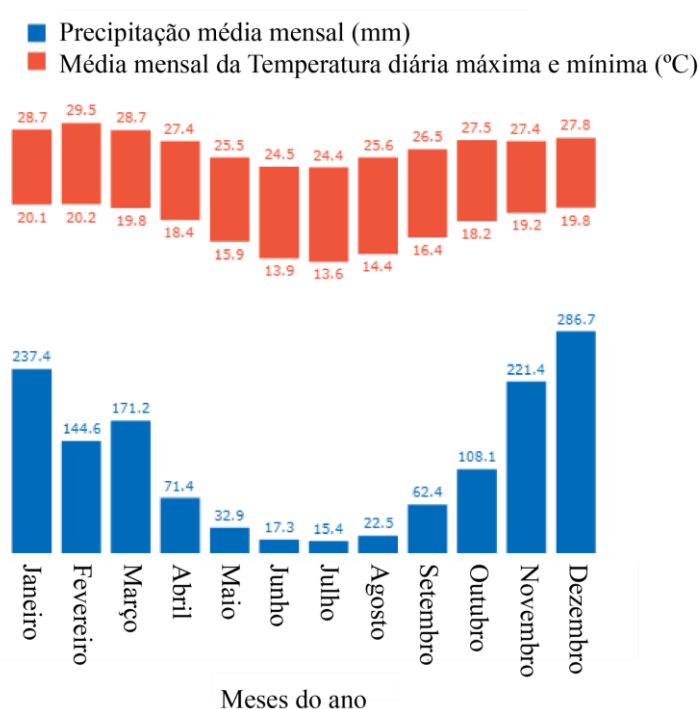


Figura 2. Climograma (Temperatura/Precipitação) de Itabira (Copernicus ERA5, 2023)

Figure 2. Climograph (Temperature/Precipitation) of Itabira (Copernicus ERA5, 2023)

2.2 Áreas de amostragem

Foi realizada uma visita técnica na área de estudo no dia 05 de outubro de 2023 para realização de um levantamento prévio dos possíveis pontos para amostragem. Na Figura 1 é possível ver as vias de acesso e a delimitação do local de estudo.

Após o levantamento prévio foram georreferenciadas quatro áreas para amostragem e estudo, sendo elas:

- Área 1: Área degradada;
- Área 2: Área em processo de recuperação ecológica;
- Área 3: Área de mata densa;
- Área 4: Área de pastagem.

É importante ressaltar que as áreas 1 e 2 possuem pouca distância entre elas, uma vez que se encontram sobre o mesmo nível de degradação do solo, com a diferença de que a Área 1 estava completamente sem cobertura vegetal, já a Área 2 possuía mudas de plantas utilizadas no processo de recuperação ecológica da Área. Na Figura 1 também é possível visualizar as quatro áreas onde foram realizadas as amostragens, levando-se em consideração as diferentes relações clima-solo-vegetação, assim como o tipo de uso do solo em cada uma delas.

2.3 Coleta e análise dos dados

Foram coletadas 4 amostras de solos nas áreas selecionadas e listadas no Quadro 1. Para isso, foi utilizado um trado para amostras indeformadas e cilindros de aço inox de 100 cm³ de volume.

Quadro 1. Amostragem da área de estudo (Autor, 2023).

Frame 1. Sampling of the study area (Author, 2023).

Tipo de Área	Nº da amostra
Degradada	Amostra 1
Degradada em processo de recuperação	Amostra 2
Mata densa	Amostra 3
Pastagem	Amostra 4

Nas Figuras 2 e 3 podem ser visualizados alguns dos materiais utilizados para as coletas em campo.



Figura 2. Trado para amostras indeformadas e demais materiais utilizados (SoilControl.com).

Figure 2. Auger for undisturbed samples and other materials used (SoilControl.com).



Figura 3. Coleta das amostras em campo nas áreas 1(a), 2(b), 3(c) e 4(d) (Autor, 2023).

Figure 3. Field sample collection in areas 1(a), 2(b), 3(c) e 4(d) (Author, 2023).

A seleção dos locais para amostragem nas áreas 1 e 2 (degradada sem e com cobertura vegetal) considerou fatores como a inclinação do terreno e o nível de compactação do solo, escolhendo pontos com baixa declividade e solos menos compactados para facilitar as coletas. Essas instruções foram seguidas para todos os quatro pontos de amostragem, permitindo a coleta de amostras e o estudo dos seus parâmetros físicos e químicos, que serão descritos a seguir.

2.3.1 Parâmetros físicos

Para auxiliar nas análises, foram medidos e coletados nos quatro pontos de amostragem diversos parâmetros físicos utilizando um medidor multiparâmetro e um termômetro digital de solo a 10 cm de profundidade. Os parâmetros incluíram temperatura do solo e do ar, umidade relativa, sensação térmica, temperatura do ponto de orvalho, velocidade do vento, iluminação, altitude e pressão. Esses dados são essenciais para

identificar as características da área estudada e dos pontos de coleta, permitindo compreender como os elementos climáticos podem influenciar as análises de solo.



Figura 4. Medidor multiparâmetro utilizado em campo (Autor, 2023).

Figure 4. Multiparameter meter used in the field (Author, 2023).

2.4 Preparo das amostras em laboratório

Após coletadas e acondicionadas em caixa térmica ainda no campo, os cilindros de alumínio com as amostras foram levados para o laboratório de Geologia e Pedologia da Universidade Federal de Itajubá. Posteriormente, as amostras foram secas por 24 horas em estufa a 105°C e, após esse processo, foram pesadas.

2.5 Cálculos da densidade do solo

A determinação da densidade do solo mede a densidade média de um volume conhecido de solo (100 cm³), que está diretamente relacionada com a porosidade, composição orgânica e mineralógica média do solo (Teixeira *et al.*, 2017). Para calcular a densidade do solo das amostras coletadas, foi utilizada a relação entre a massa das amostras secas a 105°C (em estufa) e o volume dos cilindros utilizados para as amostras (100 cm³), conforme a fórmula (1).

Fórmula (1): a / b

Onde:

a = peso das amostras após a secagem (g/cm³);

b = volume do cilindro (cm³).

2.6 Cálculos da densidade de partículas

Os cálculos da densidade de partículas medem a densidade média das partículas minerais e orgânicas na amostra, refletindo sua composição média e considerando apenas o volume de matéria sólida, desconsiderando a porosidade (Teixeira *et al.*, 2017). Para calcular a densidade de partículas, foi estabelecida a relação entre o peso seco das amostras (20 g por amostra) e o volume de água destilada utilizado para completar os 50 ml da bureta, mais 20 ml usados para a diluição das amostras no balão volumétrico, conforme a fórmula (2).

$$\text{Fórmula (2): } a / 50 - b$$

Onde:

a = peso seco das amostras (20 g);

b = volume de água destilada do balão volumétrico + volume de água destilada usado para completar as buretas.

2.6.1 Materiais e métodos

A Figura 5 ilustra parte do processo laboratorial realizado para possibilitar os cálculos das análises físicas e químicas das amostras de solo. A1 representa a Amostra 1 (área degradada), A2 a Amostra 2 (área de recuperação ecológica), A3 a Amostra 3 (área de pastagem) e A4 a Amostra 4 (área de mata densa). Inicialmente, as amostras foram desagregadas no almofariz com o pistilo, peneiradas e separadas (Figura 5a). Em seguida, foram pesadas 20 gramas de cada amostra (Figura 5b) para utilização em processo de diluição no balão volumétrico (Figura 5c).



Figura 5. Processo de análise das amostras no laboratório: a) desagregação, peneiramento e separação, b) pesagem, c) diluição (Autor, 2023).

Figure 5. Sample analysis process in the laboratory: a) disaggregation, screening, and separation, b) weighing, c) dilution (Author, 2023).

2.7 Cálculo da porosidade total do solo

A porosidade é a porcentagem de um volume total de solo que pode ser ocupado por água ou ar, e essa medida é importante para “entender o movimento e a retenção de água, ar, solutos e minerais em um determinado solo” (Teixeira *et al.*, 2017).

A fórmula (3) foi utilizada nos cálculos da porosidade total das amostras de solo.

$$\text{Fórmula (3): } 100 (a - b) / a$$

Onde:

a = valor da densidade de partículas de cada amostra;

b = valor da densidade do solo de cada amostra;

2.8 Fluxo de carbono

Para determinar a emissão de dióxido de carbono na interface solo-atmosfera, foi utilizado um analisador de gás por infravermelho (IRGA) LICOR, modelo LI-820, acoplado a uma câmara opaca de PVC cilíndrica. O ar da câmara era conduzido até o analisador por uma bomba de ar com vazão de 0,8 L min⁻¹. As leituras foram registradas a cada 15 segundos durante 20 minutos, e o fluxo de CO₂ foi determinado pela regressão linear do aumento da concentração de CO₂ em função do tempo. A fórmula (4) foi utilizada para calcular o fluxo de CO₂ (m⁻².h⁻¹) para cada amostra de solo.

$$\text{Fórmula (4): } (CA \times V) / A$$

Onde:

CA = valor do coeficiente angular da equação de regressão linear;

V = valor do volume da câmara = 0,012 m³;

A = valor da área de câmara = 0,042 m².

Para obter o fluxo de CO₂ do solo na unidade de mg.m⁻².h⁻¹ foi feita uma relação com um fator de conversão no valor de 17,7.



Figura 6. Analisador de gás por infravermelho com câmara dinâmica (Autor, 2023).

Figure 6. Infrared gas analyzer with dynamic chamber (Author, 2023).

3. Resultados e discussão

3.1 Análise dos parâmetros

Na Tabela 1 verifica-se os pesos secos de cada uma das quatro amostras analisadas. A seguir serão discutidos os resultados obtidos para cada amostra.

Tabela 1. Peso das amostras em cada área (Autor, 2023).

Table 1. Weight of the samples in each area (Author, 2023).

Áreas	Amostra	Peso seco (g)
Degradada	1	111,82
Recuperação ecológica	2	82,75
Mata densa	3	71,33
Pastagem	4	55,64

Conforme os dados da Tabela 1, foi possível calcular a densidade do solo (fórmula 1), densidade de partículas (fórmula 2) e porosidade total (fórmula 3). Na Tabela 2 verifica-se os resultados encontrados nos parâmetros físicos das áreas onde foram coletadas as amostras, e a Tabela 3 apresenta os resultados da análise física do solo de cada uma das quatro amostras. Finalmente, na Tabela 4 encontram-se os valores de fluxo de CO₂.

Tabela 2. Parâmetros físicos das áreas amostradas (Autor, 2023).

Table 2. Physical parameters of the sampled areas (Author, 2023).

Parâmetros Físicos	A1	A2	A3	A4
Temperatura do Solo	24,7° C	24,5°C	22,9°C	25,6°C
Temperatura do Ar	39,2° C	36,6°C	32,5°C	34,3°C
Umidade Relativa	46,1 %	47,5 %	53,6 %	53,5 %
Sensação Térmica	39,5° C	36,5°C	32,8°C	34,8°C
Temp. Ponto de Orvalho	25,0° C	23,7°C	21,3°C	22,4°C
Luxímetro	54612,0 lux	38958,0 lux	6130,0 lux	32300,0 lux
Altitude	860 m	857 m	830 m	830 m
Pressão	916,2 hPa	916,8 hPa	917,6 hPa	917,6 hPa

Tabela 3. Resultados das análises físicas para as áreas amostradas (Autor 2023)

Table 3. Results of the physical analyses for the sampled areas (Author. 2023)

Parâmetros Químicos	A1	A2	A3	A4
Densidade do Solo	1,11 g/cm ³	0,82 g/cm ³	0,71 g/cm ³	0,55 g/cm ³
Densidade de Partículas	2,38 g/cm ³	2,59 g/cm ³	2,53 g/cm ³	2,40 g/cm ³
Porosidade Total	53,36 %	68,33 %	71,90 %	77,08 %

Tabela 4. Fluxo de CO₂ para as áreas amostradas (Autor, 2023)Table 4. CO₂ flux for the sampled areas (Author, 2023)

Áreas	Amostra	Fluxo de CO ₂ (mg.m ⁻² .h ⁻¹)
Degradada	1	89
Recuperação ecológica	2	72
Mata densa	3	31
Pastagem	4	270

Os dados apresentados na Tabela 2 permitem uma comparação entre as áreas para cada parâmetro analisado. A temperatura do solo na Área 3 apresentou uma variação de aproximadamente 2°C entre as demais áreas. Isso pode ser explicado devido à maior presença de vegetação nessa área (mata densa), onde o microclima é mais ameno. Na Área 3 foram encontradas espécies de árvores como o Jacaré (*Piptadenia gonoacantha*), a Embaúba (*Cecropia pachystachya*), o Angico (*Anadenanthera colubrina*) e a Candeia (*Moquiniastrum polimorphum*), conforme Tabela 5. Estas são espécies de grande e médio porte, que fornecem sombra e auxiliam na redução da quantidade de radiação solar que incide sobre a Área, conforme pode se verificar pelo parâmetro luminosidade, cujos valores ficaram bem abaixo em relação às outras áreas.

Tabela 5. Espécies de vegetação encontradas na área de estudo (Autor, 2023)

Table 5. Species of vegetation found in the study area (Author, 2023)

Nome comum	Nome científico	Família	Floresta Estacional Semidecidual
Jacaré	<i>Piptadenia gonoacantha</i>	Fabaceae	Sim
Canudo de Pito	<i>Senna bicapsularis</i>	Fabaceae	Sim
Pindaíba	<i>Xylopia brasiliensis</i>	Annonaceae	Sim
Embaúba	<i>Cecropia pachystachya</i>	Urticaceae	Sim
Papagaio	<i>Aegiphila integrifolia</i>	Lamiaceae	Sim
Angico Branco	<i>Anadenanthera colubrina</i>	Mimosaceae	Sim
Candeia	<i>Moquiniastrum polimorphum</i>	Compositae	Sim
Sangra d'agua	<i>Croton urucurana</i>	Euphorbiaceae	Sim
Jacarandá	<i>Jacaranda cuspidifolia</i>	Fabaceae	Sim

A temperatura do ar, do ponto de orvalho e a sensação térmica também apresentaram valores menores na área de mata densa em relação às demais áreas (Tabela 2). A temperatura do ar e a umidade relativa se relacionaram de forma inversamente proporcional, pois quanto maior foi a temperatura nas áreas amostradas, menor a umidade relativa medida. Assim, a Área 1 (degradada) apresentou o menor valor de umidade relativa e a maior temperatura (Tabela 2).

As áreas de coleta foram selecionadas buscando-se altitudes com a menor variação possível entre elas para que esse parâmetro não influenciasse os resultados e

inviabilizasse a comparação entre as áreas. Por isso, nota-se que as áreas amostradas apresentaram altitudes variando entre 830 e 860 m, sendo que as altitudes das áreas 1 e 2 apresentaram valores bem próximos, e exatamente iguais para as áreas 3 e 4 (Tabela 2). A altitude apresenta uma relação inversamente proporcional à pressão atmosférica. Assim, quanto maior a altitude, menor foi a pressão medida nos pontos amostrados, sendo que as áreas 3 e 4 apresentaram a mesma pressão atmosférica, uma vez que possuem a mesma altitude (Tabela 2).

Quanto às análises físicas do solo, apresentadas na Tabela 3, nota-se uma relação também inversamente proporcional entre a densidade do solo e a porosidade total, sendo que quanto maior for o valor da densidade, menor a porosidade (Barbosa *et al.*, 2020). A Área 1 apresentou o maior valor para a densidade do solo e o menor para a porosidade total. Isso se deve ao fato de que esta área degradada apresenta solo bastante compactado, exposto, e com pouca matéria orgânica disponível, o que restringe o crescimento e desenvolvimento das plantas. Por outro lado, as áreas 3 e 4 apresentaram os menores valores de densidade e os maiores de porosidade (Tabela 2), resultando em maior aeração, condução e retenção de água, facilitando a penetração e à ramificação das raízes no solo (Tognon, 1991; Barbosa *et al.*, 2020).

Dentre os fatores que podem influenciar a densidade do solo, destacam-se “o material constituinte do solo, os sistemas de usos e o tipo de cobertura vegetal”, conforme apresentado por Mantovanelli *et al.* (2015). Em relação a densidade de partículas, Araújo Filho *et al.* (2022) encontraram que, em condições típicas, os solos minerais possuem uma densidade de partículas que varia entre 2,3 e 2,9 g/cm³, com uma média aproximada de 2,65 g/cm³, devido à mineralogia predominante, que inclui quartzo, feldspatos e silicatos de alumínio. O valor médio das áreas amostradas nesse estudo é de 2,48 g/cm³, sendo, portanto, próximo do valor médio encontrado por Araújo Filho *et al.* (2022).

Deve-se ressaltar que os valores obtidos para os parâmetros de densidade do solo e porosidade total das áreas amostradas são similares aos encontrados por outros estudos comparativos, como, por exemplo, Almeida (2010). No parâmetro de porosidade total, as amostras 3 e 4, apresentaram resultados na faixa dos 70%, indicando uma boa drenagem do solo e uma maior aeração, como mencionado anteriormente, permitindo, assim, ambientes mais propícios para o crescimento das raízes, e a atividade microbiana. As áreas onde as amostras 3 e 4 foram coletadas são solos com maior presença de vegetação. Apesar da Área 4 ser de pastagem, esta apresenta vegetação rasteira na superfície do solo e intensa atividade microbiológica, como pode ser demonstrado pelo fluxo de CO₂, o qual atingiu o maior valor, em relação às outras áreas (Tabela 4). O CO₂ produzido no solo é proveniente da respiração das raízes das plantas, de microorganismos presentes no solo, da fauna do solo e da oxidação química dos compostos de carbono, sendo denominado de respiração do solo (Brandão, 2014).

A atividade microbiológica do solo desempenha um papel central na regulação do fluxo de carbono terrestre, sendo que a fixação do CO₂ atmosférico no solo é realizada principalmente por plantas de maior porte (Hartmann & Six, 2023). Assim, pode-se notar que o menor valor de fluxo foi obtido na Área 3 de mata densa e na Área 2 de recuperação ecológica, indicando que a vegetação presente nessas áreas está realizando fotossíntese e, assim, sequestrando mais CO₂ e contribuindo, assim, para diminuir o fluxo para a atmosfera nessas áreas. A amostragem do fluxo na Área 2 foi realizada próxima a presença de uma muda, indicando a contribuição da mesma, embora ainda seja de pequeno porte, no sequestro de carbono. No caso da Área 3, destaca-se também que havia acúmulo

significativo de serrapilheira. De acordo com Walkiewicz *et al.* (2021), a serrapilheira pode atuar como uma barreira física modificando as trocas gasosas e também como uma camada isolante, amortecendo os efeitos das variações de luz, temperatura e irradiação, e, assim, alterando a temperatura do solo. Destaca-se também que, de acordo com os mesmos autores, a respiração da serrapilheira também depende em grande parte do teor de umidade, e, portanto, a contribuição da serrapilheira para a respiração do solo é influenciada pela frequência e quantidade de precipitação. Como a amostragem foi realizada no final do período de estiagem, estudos futuros devem avaliar a influência da sazonalidade da precipitação no fluxo de CO₂.

Por sua vez, as áreas 1 e 4 apresentaram os maiores valores de fluxos de CO₂. Em termos da diferença entre os valores nessas áreas, destaca-se, novamente, que o fluxo é influenciado pela temperatura e umidade do solo (Almeida, 2010; Carmo *et al.*, 2012). Pode-se notar que a Área 1 apresentou menor temperatura do solo em relação a Área 4 (Tabela 2). Almeida (2010) encontrou fluxo de CO₂ maior em áreas de pastagem do que em floresta (independente da área de estudo amostrada) e em solos que apresentaram maior temperatura, uma vez que altas temperaturas favorecem a atividade da biota do solo, contribuindo para aumentar a taxa de respiração do solo.

Em termos de umidade, segundo os resultados obtidos por Almeida (2010), quanto maior a saturação de água no solo, maior o fluxo de CO₂. A amostragem deste estudo foi realizada ainda no período seco, o que contribuiu para uma redução dos valores de fluxo, de modo geral, em todas as áreas. Os valores de fluxo de CO₂ obtidos neste estudo nas quatro áreas amostradas variaram de 31 a 270 mg.m⁻².h⁻¹, ou de 0,2 a 1,7 μmol.m⁻².s⁻¹. Pinto-Junior *et al.* (2009) analisou o fluxo de CO₂ no solo em uma floresta de transição Amazônica no Cerrado, obtendo valores de 2,88 μmol.m⁻².s⁻¹ na estação seca, que é um valor próximo aos encontrados nesse estudo para área de Floresta Estacional Semidecidual. Já Almeida (2010) encontrou valor de 3,26 μmol.mm⁻².s⁻¹ na área de remanescentes da Floresta Atlântica no período seco.

Finalmente, pode-se notar que a Área 4, que também apresentou valores mais altos de fluxo (Tabela 4), apresentou também solos com a maior porosidade e menor densidade (Tabela 3) e isso pode influenciar nas trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, uma vez que essas trocas ocorrem pelos poros do solo (Silva *et al.*, 2019). Assim, quanto mais aerado for o solo, mais facilmente as moléculas de CO₂ escapam, aumentando o fluxo para a atmosfera (Brandão, 2014). Além disso, a quantidade de ar nos poros é influenciada pelo conteúdo de água nos mesmos, assim, logo após a chuva, há um aumento no fluxo de CO₂ devido a expulsão dos gases pelo preenchimento dos poros com água (Brandão, 2014).

4. Conclusão

A presente pesquisa permitiu um aprofundamento na complexidade das interações e da relação entre o clima, o solo e a vegetação, elementos que exercem influência direta sobre os ecossistemas e destacam ainda mais a dinâmica ambiental.

A área de estudo na bacia hidrográfica do Córrego Santa Cruz, em Itabira, Minas Gerais, possui uma grande biodiversidade, e é uma área que permite diversos estudos na área ambiental. Os dados coletados e as análises realizadas forneceram importantes informações sobre como as condições climáticas moldam a composição do solo e a sua dinâmica, por conseguinte, impactando diretamente a vegetação que se desenvolve na região. Da mesma forma, as alterações no uso e ocupação da terra, as quais promovem

modificações na vegetação e no solo, influenciam o clima local. Portanto, a relação clima-solo-vegetação é complexa e interdependente.

Esse estudo demonstrou que as áreas degradadas apresentam temperaturas do ar e do solo elevadas, baixa umidade do ar, alta luminosidade, solos com alta densidade e baixa porosidade, e altas taxas de emissão de CO₂. Por outro lado, áreas preservadas apresentam baixas taxas de emissão de CO₂, temperatura do ar e do solo mais amenas, alta umidade relativa do ar, menor luminosidade, e solos com menor densidade e maior porosidade. No caso da área de pastagem analisada neste estudo, o solo não se encontrava compactado como as áreas de pastagem usuais (apresentando a menor densidade entre todas as áreas analisadas), uma vez que, atualmente, há a presença somente de alguns poucos equinos na área. Contudo, a remoção da vegetação nativa trouxe impactos como o aumento na temperatura do solo (a maior entre todas as áreas analisadas), que, aliado à maior porosidade (a maior entre todas as áreas), resultou em um aumento significativo nas emissões de CO₂ (a maior entre todas as áreas).

Em suma, conclui-se que segue sendo importante a manutenção correta dos solos, para que estes não percam seus atributos físicos e químicos que garantam estabilidade e a continuidade dos processos ecológicos, além da provisão de serviços ecossistêmicos, como purificação do ar, recursos hídricos, alimentos, entre outros, os quais propiciam saúde e qualidade de vida. Manter áreas vegetadas se faz ainda mais necessário em um cenário de mudanças climáticas, como pôde-se observar pelo baixo fluxo de carbono medido na área de mata densa, uma vez que o processo de fotossíntese pelas espécies ali presentes garante um maior consumo de CO₂, permitindo um melhor estoque de carbono no ambiente.

A complexidade dos sistemas naturais impõe desafios inerentes à generalização dos resultados para diferentes ecossistemas, contudo, é importante entendermos as causas e origens de cada influência que esses sistemas sofrem, especialmente devido às atividades antrópicas.

Agradecimentos: Agradecemos aos revisores desse artigo e aos professores Dr. Nicolás Misailidis Stríkis do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP) e a Dra. Fernanda Maria Belotti do Instituto de Ciências Puras e Aplicadas da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo apoio na realização do trabalho. Agradecemos também a UNIFEI e ao Sérgio Quintão e Silva que viabilizaram a execução do trabalho.

Contribuições dos Autores: Concepção, A.C.V.F. e G.M.M.; metodologia, A.C.V.F. e G.M.M.; análise formal, R.R.D., A.C.V.F. e G.M.M.; pesquisa, R.R.D.; coleta de dados, R.R.D., A.C.V.F. e G.M.M.; preparação de dados, R.R.D.; escrita do artigo, R.R.D. e A.C.V.F.; revisão, R. R. D. e A.C.V.F.; supervisão, A.C.V.F. e G.M.M. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

- Almeida, A.M. 2010. *Fluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo sob pastagens e fragmentos de floresta atlântica em regeneração (RJ)*. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/handle/1/3037>>. Acesso em: 03 dez. 2023.
- Araújo Filho, J.C.; Silva, C.B. & Marques, F.A. 2022. Solos. In: Pfaltzfraff, P.A.; Torres, F.S. M. & Costa, M.R. (org.), *Caracterização do meio físico na pesquisa da geodiversidade da região metropolitana do Recife*. Recife: CPRM, cap. 12, pp. 108-120. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20596>>. Acesso em: 26 ago. 2024.
- Barbosa, T.C.S.; Costa, N.M.G.B.; Santos, D.B.; Machado, M.S. & Filho, F.M. 2020. Qualidade física do solo em áreas sob manejo agroecológico e convencional / Physical soil quality in area under agroecological and

conventional management. *Brazilian Journal of Development*, 6(7), 48899-48909, <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-511>

Bonfim, A.C.F.; Vieira, E.M.; Pereira, P.H.R. & Perdigão, L.S. 2013. *Delimitação automática da sub-bacia hidrográfica do Rio do Peixe no município de Itabira - MG por meio de geoprocessamento*. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/3511dd7875ce6abf09115a6a0fc33610_97eeefcd024ba9c91ebb0c751e2992e6.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2023.

Brandão, C.B. 2014. *Emissão de CO₂ do solo e sua correlação com a rizosfera de diferentes paisagens de áreas mineradas do município de Santo Antônio de Pádua-RJ*. 102 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<https://www.bdtu.uerj.br:8443/handle/1/13333>>. Acesso em: 26 ago. 2024.

Carmo, J.B.; Neto, E.R.S.; Duarte-Neto, P.J.; Ometto, J.P.H.B. & Martinelli, L.A. 2012. Conversion of the coastal Atlantic Forest to pasture: Consequences for the nitrogen cycle and soil greenhouse gas emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 148: 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.010>

COPERNICUS. 2023. ERA5 explorer. Disponível em: <<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-era5-explorer?tab=app>>. Acesso em: 30 nov. 2023.

Correa, I. 2018. *Recuperação de área degradada com sistema agroflorestal no município de Itabira, MG*. Trabalho final de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental (TCC). Universidade Federal de Itajubá (Unifei) Campus Itabira.

Dowhower, S.L.; Teague, W.R.; Casey, K.D. & Daniel, R. 2020. Soil greenhouse gas emissions as impacted by soil moisture and temperature under continuous and holistic planned grazing in native tallgrass prairie. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 287: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106647>

Farina, R.; Marchetti, A.; Francaviglia, R.; Napoli, R. & Di Bene, C. 2017. Modeling regional soil C stocks and CO₂ emissions under Mediterranean cropping systems and soil types. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 238: 128-141. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.015>

Fritzsos, E.; Garrastazú, M.C.; Wrege, M.S. & Mantovani, L.E. 2023. O efeito do uso e ocupação da terra sobre o clima: comparação entre duas estações meteorológicas. *Revista Brasileira de Climatologia*, 32(19): 566-583. <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16638>

Hartmann, M. & Six, J. 2023. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4: 4-18. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>

IBGE. 2022. Censo Demográfico 2022 : tipos de domicílios coletivos, improvisados, de uso ocasional e vagos : resultados do universo / IBGE.

IDE-SISEMA. 2023. *Infraestrutura de dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos*. Disponível em: <<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>>. Acesso em: 11 nov. 2023.

IPCC. 2023. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2023: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. [Relatório]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>>. Acesso em: 11 nov. 2023.

ITABIRA. 2016. Plano de Manejo do Parque Natural Municipal do Intelecto. Itabira, MG. 133 p.

Junior, C.C. 2020. *Potencial de captura de carbono no solo a partir da reabilitação de pastagens degradadas no cerrado*. GTP Pastagens. Imaflora, 83p. Disponível em: <https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/potencial_de_captura_de_carbono_no_solo_a_partir_da_reabilitacao_de_pastagens_degrada.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2023.

Köppen, W. 1931. *Die Klimate der Erde: Grundriss der Klimakunde*. Berlin: Walter de Gruyter & Co.

Li, W.; Migliavacca, M.; Forkel, M.; Denissen, J.M.C.; Reichstein, M.; Yang, H.; Duveiller, G.; Weber, U. & Orth, R. 2022. Widespread increasing vegetation sensitivity to soil moisture. *Nature communications*, 13(1): 3959. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31667-9>

Mantovanelli, B.C.; Pinheiro da Silva, D.A.; Campos, M.C.C.; Gomes, R.P.; Soares, M.D.R. & Coutim dos Santos, L.A. 2015. Avaliação dos atributos do solo sob diferentes usos na região de Humaitá, Amazonas. *Revista de Ciências Agrárias*, 58(2): 122-130. <https://doi.org/10.4322/rca.1822>

Martins, F.B.; Gonzaga, G.; Santos, D.F. & Reboita, M.S. 2018. Classificação de Köppen e de Thorntwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. *Revista Brasileira de Climatologia, Edição Especial*

Dossiê Climatologia de Minas Gerais. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/download/60896/36669>>. Acesso em: 22 nov. 2023.

Nikolenko, O.; Orban, P.; Jurado, A.; Morana, C.; Jamin, P.; Robert, T.; Knöller, K.; Borges, A.V. & Brouyère, S. 2019. Dynamics of greenhouse gases in groundwater: hydrogeological and hydrogeochemical controls. *Applied Geochemistry*, 105: 31-44. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.04.009>

Pinto-Junior, O.B.; Sanches, L.; Dalmolin, A.C. & Nogueira, J.S. 2009. Efluxo de CO₂ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. *Acta Amazônica*, 39(4): 813-822. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000400009>

Reis, A.M.; Oliveira, P.H.; & Silva, T.R. 2022. Ecossistemas e serviços ambientais: Um estudo sobre a importância da vegetação. *Revista Brasileira de Ecologia*, 45(3): 123-145.

Shinzato, P. & Duarte, D.H.S. 2018. Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera. *Ambiente Construído*, 18(2): 197-215. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000200250>

Silva, A.F. & Jatobá, L. 2017. *Relação clima-solo-planta na análise integrada de paisagens*. EMBRAPA. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1083004/relacao-clima-solo-planta-na-analise-integrada-de-paisagens>>. Acesso em: 03 dez. 2023.

Silva, D.A.P.; Campos, M.C.C.; Mantovanelli, B.C.; Santos, L.A.C.; Soares, M.D.R. & Cunha, J.M. 2019. Spatial variability of CO₂ emission, temperature and soil moisture in an area under pasture in the Amazon region, Brazil. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 18(1): 119-126. <https://doi.org/10.5965/223811711812019119>

Teixeira, P.C.; Donagemma, G.K.; Fontana, A. & Teixeira, W.G. 2017. *Manual de métodos de análise de solo*. Brasília, DF: Embrapa, Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>>. Acesso em: 28 nov. 2023

Tognon, A.A. 1991. *Propriedades físico-hídricas do Latossolo Roxo da região de Guairá-SP sob diferentes sistemas de cultivo*. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1991. <https://doi.org/10.11606/D.11.2019.tde-20191108-120755>

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME [UN-HABITAT]. 2011. *Cities and climate change: policy directions*. Global report on human settlements, Disponível em: <https://www.citiesalliance.org/sites/default/files/UN_H_GRHS2011_CitiesClimateChange.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2023.

Walkiewicz, A.; Rafalska, A.; Bulak, P.; Bieganski, A. & Osborne, B. 2021. How Can Litter Modify the Fluxes of CO₂ and CH₄ from Forest Soils? A Mini-Review. *Forests*, 12: 1276. <https://doi.org/10.3390/f12091276>

Wolf, R. 2012. *Sistemas agroflorestais: potencial para sequestro de carbono e produção de outros serviços ambientais*. UFGD. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/937494/1/093Sistemasagroflorestaispotencialparasequestrodecarbono.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2023

WORLD BANK. 2010. *Annual Report* (English). Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) Washington, D.C.: World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/408911468331735129/2010-annual-report>

Yuste, J.C.; Flores-Rentería, D.; García-Angulo, D.; Hereş, A.-M.; Bragă, C.; Petritan, A.-M. & Petritan, I.C. 2019. Cascading effects associated with climate-change-induced conifer mortality in mountain temperate forests result in hot-spots of soil CO₂ emissions. *Soil Biology and Biochemistry*, 133: 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.02.017>

Zou, C.; Li, Y.; Huang, W.; Zhao, G.; Pu, G.; Su, J.; Coyne, M.S.; Chen, Y.; Wang, L.; Hu, X. & Jin, Y. 2018. Rotation and manure amendment increase soil macro-aggregates and associated carbon and nitrogen stocks in flue-cured tobacco production *Geoderma*, 325: 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.017>