



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES

SANDRA DIAS BARBOSA

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM ÁREAS COM DIFERENTES
COBERTURAS DA TERRA NO BIOMA CAATINGA**

Recife
2024

SANDRA DIAS BARBOSA

**EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM ÁREAS COM DIFERENTES
COBERTURAS DA TERRA NO BIOMA CAATINGA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre(a) em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Aplicações de Radioisótopos na Agricultura E Meio-Ambiente.

Orientadora: Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas

Coorientadora: Dra. Edilândia Farias Dantas

Recife
2024

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Barbosa, Sandra Dias.

Emissões de gases de efeito estufa em áreas com diferentes coberturas da terra no Bioma Caatinga / Sandra Dias Barbosa. - Recife, 2024.

75f.: il.

Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2024.

Orientação: Ana Dolores Santiago de Freitas.

Coorientação: Edilândia Farias Dantas.

1. Mudanças Climáticas; 2. Uso da terra; 3. Semiárido. I. Freitas, Ana Dolores Santiago de. II. Dantas, Edilândia Farias. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 621.48

SANDRA DIAS BARBOSA

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM ÁREAS COM DIFERENTES
COBERTURAS DA TERRA NO BIOMA CAATINGA**

Dissertação Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociência - CTG, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de Concentração: Aplicações de Radioisótopos na Agricultura e Meio-Ambiente.

Aprovado em: 06/08/2024

BANCA EXAMINADORA

Dra. Kelly Ribeiro (Examinadora Externa)
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Dra. Cybelle Souza de Oliveira (Examinadora Externa)
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Dra. Jéssica Rafaella de Sousa Oliveira (Examinadora Externa)
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter permitido alcançar esse momento.

Gostaria de agradecer a minha orientadora Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas por todo suporte e direcionamento para realização deste projeto. A minha coorientadora Dra. Edilândia Farias Dantas pela ajuda ao longo dos dois anos.

Agradecer ao meu esposo Ewerton Lucas por todo apoio e incentivo, que foram essenciais para que eu seguisse nessa trajetória.

A minha amiga Suzana que desde o início foi uma grande incentivadora e me ajudou muito em todos os aspectos.

A minha amiga Karina com quem convivo desde a graduação e com quem tenho compartilhado todas as inseguranças e conquistas no meio profissional.

Aos amigos que fiz ao longo desses dois anos, em especial Juscélia, Pablo, Alcileia e Bruna que foram os quais me acompanharam ao longo dos meus dias e com os quais vivenciei muitos momentos.

Aos nossos parceiros que ajudaram com atividades de campo e de dados, muito obrigado.

E a todos que indiretamente estiveram envolvidos no processo.

“Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente,
mas o que melhor se adapta às mudanças”
(Leon C. Megginson, 1963).

RESUMO

A Caatinga possui enorme riqueza de espécies vegetais, é apontada como a região de semiárido com maior número de pessoas do mundo. Vem sendo influenciado fortemente pelas ações antrópicas, principalmente na vegetação e na mudança de uso do solo. Muitas atividades podem promover estas modificações, como a retirada da cobertura vegetal seja para destinação a queima desse material, para a criação animal, etc. Essas modificações no ambiente podem ser um fator preocupante no que diz respeito à um possível aumento nos níveis de gases de efeito estufa emitidos. Os principais gases relacionados ao efeito estufa CO_2 , N_2O e CH_4 , respectivamente. Contudo, estudos que visam identificar o que essas mudanças têm promovido em relação as emissões de gases de efeito estufa, são escassos. Neste sentido, o objetivo desse trabalho quantificar as emissões de gases do efeito estufa em parcelas permanentes para estudos ecológicos com diferentes coberturas vegetais no Bioma Caatinga, correlacionando as estimativas com parâmetros (físicos e químicos) do solo e ao longo das estações do ano. A metodologia utilizada foi a que faz uso de um medidor de gás portátil. Os resultados referentes a temperatura e umidade do solo demonstram foram variáveis entre as épocas do ano, o que pode influenciar nas emissões. Para os gases foi possível identificar que o gás que mais emitiu em diferentes épocas foi o CO_2 , apresentando os maiores valores na época chuvosa ($832,54 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Houve pouca emissão de CH_4 (o maior foi $59,78 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) em ambas as épocas, o que pode indicar um enorme potencial de controle de emissões deste gás em região semiárida. Para o N_2O foi possível perceber uma diferença de emissões entre as épocas, onde na estação seca ($106,54 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ocorreu as menores emissões. Os resultados obtidos demonstraram o quanto o Bioma Caatinga é importante para dinâmica dos gases de efeito estufa proveniente dos diferentes usos do solo, em especial a sua capacidade de consumo de CH_4 .

Palavras-chave: Mudanças Climáticas, Uso da terra, Semiárido.

ABSTRACT

The Caatinga is rich in plant species and is considered the semiarid region with the largest population in the world. It has been strongly influenced by human activities, especially in terms of vegetation and changes in land use. Many activities can promote these changes, such as the removal of vegetation cover for burning, animal husbandry, etc. These changes in the environment can be a cause for concern regarding a possible increase in the levels of greenhouse gases emitted. The main gases related to the greenhouse effect are CO₂, N₂O and CH₄, respectively. However, studies that aim to identify what these changes have promoted in relation to greenhouse gas emissions are scarce. In this sense, the objective of this study is to quantify greenhouse gas emissions in permanent plots for ecological studies with different types of vegetation cover in the Caatinga Biome, correlating the estimates with soil parameters (physical and chemical) and throughout the seasons. The methodology used was one that makes use of a portable gas meter. The results regarding soil temperature and humidity showed that they varied between seasons, which may influence emissions. For gases, it was possible to identify that the gas that was emitted the most at different times was CO₂, with the highest values in the rainy season (832.54 mg m⁻² h⁻¹). There was little emission of CH₄ (the highest was 59.78 µg m⁻² h⁻¹) in both seasons, which may indicate a huge potential for controlling emissions of this gas in the semiarid region. For N₂O, it was possible to notice a difference in emissions between seasons, with the lowest emissions occurring in the dry season (106.54 µg m⁻² h⁻¹). The results obtained demonstrated how important the Caatinga Biome is for the dynamics of greenhouse gases from different land uses, especially its capacity to consume CH₄.

Keywords: Climate Change, Land Use, Semiarid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa de localização geográfica dos municípios.....	31
Figura 2: Coberturas vegetais das parcelas permanentes em época seca e chuvosa, pastagem, caatinga aberta, caatinga densa, respectivamente.....	33
Figura 3: Croqui da parcela permanente.....	33
Figura 4: Médias das temperaturas da solo época seca e chuvosa.....	39
Figura 5: Médias da umidade do solo nas estações seca e chuvosa, nos diferentes usos do solo e nos diferentes municípios.....	42
Figura 6: Emissões de CO ₂ em diferentes usos do solo em Petrolina.....	43
Figura 7: Emissões de CO ₂ em Araripina.....	44
Figura 8: Emissões de CO ₂ em Arcoverde.....	45
Figura 9: Emissões de CO ₂ em Sertânia.....	46
Figura 10: Emissões de CO ₂ em São Bento do Una.....	47
Figura 11: Emissões de CO ₂ em Caruaru.....	48
Figura 12: Teste de Tukey aplicado nas emissões de CO ₂ em época chuvosa comparando com o local.....	49
Figura 13: Teste de Tukey aplicado nas emissões de CO ₂ em época seca comparando com o local.....	50
Figura 14: Teste de Tukey aplicado nas emissões de CO ₂ em época chuvosa comparando entre o uso do solo.....	51
Figura 15: Emissões de CH ₄ em Petrolina.....	52
Figura 16: Emissões de CH ₄ em Araripina.....	53
Figura 17: Emissões de CH ₄ em Arcoverde.....	54
Figura 18: Emissões de CH ₄ em Sertânia.....	55
Figura 19: Emissões de CH ₄ em São Bento do Una.....	56
Figura 20: Emissões de CH ₄ em Caruaru.....	57
Figura 21: Teste de Tukey aplicado nas emissões de CH ₄ em época chuvosa comparando entre o uso do solo.....	58
Figura 22: Teste de Tukey aplicado nas emissões de CH ₄ em época chuvosa e seca em local.....	59
Figura 23: Emissões de N ₂ O em Petrolina.....	60
Figura 24: Emissões de N ₂ O em Araripina.....	61
Figura 25: Emissões de N ₂ O em Arcoverde.....	62
Figura 26: Emissões de N ₂ O Sertânia.....	63
Figura 27: Emissões de N ₂ O em São Bento do Una.....	64
Figura 28: Emissões de N ₂ O em Caruaru.....	65
Figura 29: Teste de Tukey aplicado nas emissões de N ₂ O em época seca comparando com o local.....	66
Figura 30: Teste de Tukey aplicado nas emissões de N ₂ O em época chuvosa comparando com o uso do solo.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características edafoclimáticas das parcelas permanentes.	32
Tabela 2: Caracterização química do solo.	35
Tabela 3: Caracterização física do solo.	35
Tabela 4: Precipitação nos diferentes municípios nas épocas de coleta.	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. CAATINGA	15
2.2. GASES DE EFEITO ESTUFA	19
2.3. SEQUESTRO DE CARBONO E EMISSÃO DE CO ₂	22
2.4. EMISSÃO DE CH ₄	25
2.5. EMISSÃO DE N ₂ O	27
2.6. MÉTODOS DE COLETA PARA DETECÇÃO DE GEE	28
2.7. EMISSÃO DE GEE NO BIOMA CAATINGA E EM FLORESTAS TROPICAIS SECAS	29
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1. Áreas de estudo	31
3.2. Amostragem e determinação de atributos físicos e químicos do solo	34
3.3. Coleta e determinação de gases	36
3.4. Análise estatística	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1. Temperatura e Precipitação	38
4.2. Umidade	41
4.3. EMISSÕES DE CO ₂	43
4.3.1. Petrolina	43
4.3.2. Araripina	44
4.3.3. Arcoverde	45
4.3.4. Sertânia	46
4.3.5. São Bento do Una	47
4.3.6. Caruaru	48
4.4. EMISSÕES DE CH ₄	52
4.4.1. Petrolina	52
4.4.2. Araripina	53
4.4.3. Arcoverde	54
4.4.4. Sertânia	55
4.4.5. São Bento do Una	56
4.4.6. Caruaru	57
4.5. EMISSÕES DE N ₂ O	60
4.5.1. Petrolina	60
4.5.2. Araripina	61
4.5.3. Arcoverde	62

4.5.4. Sertânia.....	63
4.5.5. São Bento do Una.....	64
4.5.6. Caruaru	65
4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	68

1. INTRODUÇÃO

Um dos temas mais discutidos na atualidade seria a diminuição das emissões de gases de efeito estufa (MENEZES, 2021). Olhando de forma global é apontado que o aumento das concentrações desses gases de efeito estufa tem relação com diversos fatores, entre eles a queima de combustíveis fósseis e às mudanças de uso da terra (SIGNOR et al., 2021).

As áreas de regiões semiáridas compõem um quinto da área de terra global, são áreas utilizadas para a produção agrícola. Mas, não se tem total entendimento a respeito do comportamento das fontes e dos sumidouros de gases de efeito estufa vindos de solos dessa região, entender o comportamento dos gases de efeito estufa em regiões áridas e semiáridas é extremamente importante (BARTON et al., 2013).

O bioma Caatinga possui uma área de 844.453 km² o que corresponde aproximadamente a 11% do território nacional (REIS et al., 2021). O clima da região é semiárido, com precipitações pluviométricas médias anuais que variam entre 250 a 800 mm, com grande irregularidade de distribuição ao longo do ano e entre os anos (SOUZA et al., 2015). A vegetação é, em sua maior parte, constituída por florestas tropicais secas, que apresentam características únicas, adaptadas ao clima, com alta diversidade florística, atualmente formando um mosaico de áreas com diferentes tipos de cobertura (FERNANDES et al., 2020, SIGNOR et al., 2022).

No Semiárido brasileiro, a criação de caprinos e ovinos tem importância socioeconômica de enorme relevância no que diz respeito à fonte de renda para as famílias da região, possuindo ainda relação de importância com a preservação da cultura relacionada ao consumo de produtos derivados desses animais. Contudo, a vegetação de caatinga nativa é amplamente utilizada para alimentação dos rebanhos, com um impacto muito acentuado, sendo a atividade considerada como uma das maiores intervenções antrópicas no Bioma (EMBRAPA, 2022). Os caprinos são identificados como sendo os que promovem uma maior degradação à vegetação, já que se encontram em grande número, sendo associada a estes a redução de várias espécies de plantas herbáceas, arbustivas e arbóreas, afetando a biodiversidade e a capacidade de regeneração da vegetação. Cerca de 89% da criação de caprinos, 17,9% do rebanho de bovinos e 49,8% dos ovinos da produção nacional está concentrada no Semiárido (ARAÚJO-FILHO; CRISPIM, 2002).

As mudanças de uso da terra no bioma Caatinga e as características edafoclimáticas que o Semiárido apresenta acabam por intensificar as taxas de mineralização e perda de carbono do solo. Diante disso, o processo de regeneração natural da Caatinga pode ser lento, sendo um dos biomas que mais apresentam vulnerabilidade às mudanças climáticas (KILL; PORTO, 2019).

Dentro deste contexto, é importante o conhecimento de como as emissões de gases do solo se comportam diante nos diferentes tipos de cobertura do solo no Semiárido. É extremamente importante pontuar que uma parte expressiva do valor das emissões de gases de efeito estufa são atribuídos à mudança de uso da terra e à atividade agropecuária. Gases como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) são apontados como gases que promovem mudanças nas temperaturas médias do planeta (NETO et al., 2011).

As mudanças de uso da terra são fatores para aumentar as emissões de gases porque o CO_2 é emitido devido a decomposição dos resíduos vegetais, a respiração da microbiota e raízes, além da oxidação da matéria orgânica do solo (MOS). O fluxo de CH_4 tende a ocorrer quando os processos microbianos estão em situação de anaerobiose dentro do ciclo do C, acontecendo esse entre o solo e atmosfera quando tem disponibilidade de N. Os processos microbianos também são apontados como responsáveis por aproximadamente 60 % das emissões de N_2O , ocorrendo um aumento significativo de emissões quando são utilizados fertilizantes nitrogenados, já que é apontado que aproximadamente 1% deste fertilizante pode ser emitido como gás (NETO et al., 2011; MCDANIEL, et al., 2019).

Há grande escassez de estudos relacionados a emissões de gases de efeito estufa (GEE) edáficos pelos solos da Caatinga, sendo apontado como o bioma menos estudado no território brasileiro (KILL; PORTO, 2019; ALVES et al., 2009). Essa lacuna de informações relacionadas a florestas secas é significativamente maior que a de florestas tropicais úmidas (SCHRODER et al.2021). Com base nessas informações, é importante que se compreenda como as emissões de gases de efeito estufa variam de acordo com as condições edafoclimáticas e tipo de cobertura no Semiárido. Este trabalho foi desenvolvido a partir da hipótese que solos com pastagens e com caatinga aberta apresentam maiores emissões de GEE que solo sob vegetação de caatinga densa.

Objetivo geral

Quantificar emissões de gases de efeito estufa (GEE) em áreas com diferentes condições edafoclimáticas e coberturas vegetais no Bioma Caatinga.

Objetivos específicos

1. Quantificar as emissões de GEE (CO_2 , CH_4 e N_2O) em solos de áreas sob diferentes condições edafoclimáticas e coberturas vegetais no Bioma Caatinga em duas épocas, chuvosa e seca.
2. Determinar atributos do solo (químicos e físicos) e variáveis ambientais (umidade e temperatura do ar e do solo) de áreas sob diferentes condições edafoclimáticas e coberturas vegetais no Bioma Caatinga.
3. Relacionar as diferentes condições ambientais e de cobertura do solo com as estimativas de emissões de GEE

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. CAATINGA

O bioma Caatinga cobre cerca de 80% da área do Semiárido brasileiro, sendo sua denominação originada do termo tupi-guarani que significa “mata branca”, designação devida à perda das folhas no período de estiagem, o que confere uma aparência branca, seca e sem vida à vegetação. A vegetação dessa área possui características específicas que auxiliam na resistência à seca, sendo perenifólias, com as folhas de tamanho pequeno ou folíolos, com a superfície da folha ondulada, possuindo espinhos ou acúleos, caules lenhosos curtos e com pequeno diâmetro, com paredes espessas (ALVES et al., 2009; MAIA et al., 2017).

As condições climáticas do bioma, como escassez de água durante uma grande parte do ano e a irregularidade temporal na distribuição das chuvas, implicam especialmente na vegetação característica da caatinga (QUEIROZ, 2009). Seus índices pluviométricos são baixos, com precipitações entre 250 e 800 mm ano⁻¹ (GUSMÃO et al., 2016). Em anos atípicos, muito chuvosos ou muito secos, a precipitação pode ultrapassar os 1.000 mm ou ser inferior a 200 mm, respectivamente (MAIA, 2012). Duas estações bastante distintas ficam bem delimitadas com a

sazonalidade climática característica: uma estação chuvosa curta, com duração de três a cinco meses, e uma longa estação seca, o restante do ano (LIMA, 2012). Quanto a temperatura da região é caracterizada por médias anuais elevadas, em torno de 27 °C (GUSMÃO et al., 2016), em serras e chapadas com altitudes acima de 500 m a tendência é para a diminuição dessa temperatura (ALVES; ARAÚJO; NASCIMENTO, 2009). No entanto, embora esteja inteiramente localizada no Semiárido nordestino, sob condições de clima quente e seco, com evapotranspiração potencial que pode alcançar os 2.700 mm anuais (ARAÚJO FILHO, 2013), a caatinga apresenta grande variedade de paisagens e relativa riqueza biológica (ARAÚJO; SILVA, 2010).

Os solos da caatinga, mesmo em escalas locais, são extremamente diversos (QUEIROZ, 2009), apresentando a maior variabilidade do país (SAMPAIO, 2010). Ao longo de toda sua extensão, é possível encontrar solos que se originam tanto de formações geológicas cristalinas quanto de formações geológicas sedimentares (ALVES et al., 2009). Em sua maioria, são solos rasos (pouco desenvolvidos) (ARAÚJO; SOUSA, 2011) e com afloramentos rochosos (ALVES et al., 2009). Latossolo, Luvisolo, Argissolo, Neossolo Quartzarênico, Neossolo Litólico, Planossolos, Neossolo Regolítico e Cambissolos são as classes de solos mais representativas do Semiárido brasileiro (RIBEIRO; SAMPAIO; GALINDO, 2009; ARAÚJO FILHO, 2013). Quanto ao relevo, a principal feição geomorfológica corresponde à das grandes depressões, também conhecida como depressão sertaneja (QUEIROZ, 2009). Assim, a diversificação em paisagens e tipos vegetacionais da caatinga é justificada, em parte, pelas variações Geomorfológicas, Climáticas e Topográficas, que influenciam a distribuição, riqueza e diversidade de suas espécies vegetais (ARAÚJO FILHO, 2013).

É possível identificar que ocorrem no mínimo 3.150 espécies, que são distribuídas em 950 gêneros e aproximadamente 152 famílias de angiospermas (FERNANDES; QUEIROZ, 2018). De modo, que o bioma é composto em sua maioria por fisionomias xerofíticas, lenhosas, espinhosas e decíduas, identificando que as características do ambiente condicionam uma grande gama de peculiaridade às suas espécies, já que este apresenta clima em sua maior parte quente e seco (CARNEIRO et al., 2019). A família Leguminosae é considerada como o grupo com maior número de exemplares na Caatinga e com maior número de espécies endêmicas no bioma (GIULIETTI et al., 2004).

Outra família de importância na Caatinga é Cactaceae, devido ao seu

metabolismo fotossintético que melhor se adapta a ambientes que possuem baixa disponibilidade hídrica. Estas plantas apresentam metabolismo denominado MAC (mecanismo ácido das Crassuláceas), que lhes confere maior adaptabilidade a assimilação de CO₂ e otimização do uso da água. Das espécies de cactáceas que são nativas que ocorrem na região Nordeste identificamos um grupo variado que possui características bem particulares. Das espécies consideradas frutíferas encontramos o mandacaru (*Cereus jamacaru*), o quipá (*Tacinga inamoena*), xique-xique (*Pilosocereus gounellei*) e o facheiro (*Pilosocereus chrysostele*) são indivíduos que possuem frutos com características diferenciadas e visível potencial para exploração, sendo o mandacaru e o quipá comestíveis e as demais tendo potencial como atrativo para os pássaros (CARNEIRO et al., 2019).

Mesmo com tanta diversidade ele ainda é um dos que possuem a flora e fauna menos estudadas entre os biomas brasileiros e também um dos que tem sofrido mais degradação nos últimos 400 anos por causa do uso sem controle e com ausência de planejamento, sendo apontado como o terceiro com maior processo de degradação no Brasil, alcançando aproximadamente 51% de alteração provocada pelo homem (MAIA et al., 2017).

O Observatório Nacional da Dinâmica da Água e do Carbono no Bioma Caatinga (ONDACBC) é uma rede de pesquisa composta por grupos das principais instituições de pesquisa do Nordeste (UFPE, UFC, UFRN, UFPB, UFCG, UFAL, UFS, Instituto Nacional do Semiárido, Instituto Agrônomo de Pernambuco, Embrapa Semiárido). No ano de 2017, o ONDACBC implantou uma Rede de Parcelas Permanentes para Estudos de Longa Duração (PERENE). O desenho experimental da Perene prevê a instalação de parcelas em diversos municípios do Semiárido, com parcelas com três tipos de uso e cobertura da terra: caatinga densa (caatinga que se encontra em avançado estado de crescimento e regeneração, estando em alguns casos em avançado estado de sucessão ecológica, possuindo dossel que realiza a interceptação de aproximadamente 80% da luz solar radiante), caatinga aberta (caatinga que possui menor densidade de árvores e arbustos e apresenta uma maior cobertura no estrato herbáceo, encontrando-se em estágio inicial/intermediário de regeneração e sucessão ecológica) e pastagens herbáceas (seria uma área com ação antrópica composta por herbáceas, possuindo pouco ou nenhum arbustos e árvores em regeneração, sendo impedidas de realizar avanço na sucessão ecológica por causa da ação do homem que realiza a capina e queima e pelo excesso de pastejo)

e dois tratamentos de pastejo (áreas abertas ao pastejo e áreas protegidas por cercas para que os animais não tenham acesso).

2.2. GASES DE EFEITO ESTUFA

Encontramos como regulador da temperatura da terra um mecanismo chamado de efeito estufa. Onde parte da energia solar que se encontra na forma de radiação atravessa a atmosfera e posteriormente atinge a superfície terrestre onde é absorvida ou até refletida pela Terra, sendo uma parte desta radiação que é refletida não retorna ao espaço, e é refletida de volta onde é absorvida pela camada de gases de efeito estufa (GEE), que se encontram presentes na atmosfera, gerando o aquecimento da atmosfera. Os principais GEE's são dióxido de carbono (CO_2), o gás metano (CH_4), os óxidos de nitrogênio (NO_x) que podem ter origem antrópica ou natural, tendo sido registrado um aumento em suas concentrações na atmosfera. Das atividades antrópicas que contribuem para as alterações que levam a emissão de GEE, tem destaque a agricultura e pecuária, que envolvem mudanças de uso da terra. Estima-se que cerca de 20% do CO_2 e de 50 a 70% das emissões de N_2O e CH_4 do planeta sejam resultado deste tipo de atividade (ALMEIDA et al., 2015).

Dentro da pecuária encontramos como a principal fonte de emissões a fermentação entérica que é responsável por 79,4% do total. Já nas mudanças de uso da terra, se consideradas as remoções de áreas protegidas, vegetação secundária e outras mudanças de uso, são apontadas como o setor que representa 30 % das emissões líquida brasileira 30%. Observando o setor de transportes encontraremos os automóveis como sendo a segunda categoria de veículo responsáveis por mais emitirem gases de efeito estufa, com emissões que chegam a 31% das que ocorreram dentro do setor em 2021 tendo ficado atrás apenas dos caminhões que tiveram 42% das emissões. (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023).

Conforme o Observatório do Clima (2023), as emissões brutas vindas das mudanças de uso da terra apresentaram um aumento entre os anos de 2020 e 2021, sendo este de 18%. De modo que essas emissões seriam as maiores emissões desde 2009 (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023).

No ano de 2020 foi identificado que, do ponto de vista global, houve uma redução de aproximadamente 7% das emissões, porém o Brasil foi na direção oposta apresentando um aumento das emissões brutas de GEE de 9,5%. Um dos fatores apontados que justificam isto seria o aumento do desmatamento, principalmente na Amazônia e no Cerrado (POTENZA et al., 2021). Neste ano o setor da energia mostrou uma redução nas emissões de 4,6% devido ao isolamento social imposto pela

pandemia de COVID 19. Já no setor de processos industriais e uso de produtos, houve uma estabilidade, apresentando uma oscilação de 0,5% para cima. No setor dos resíduos foi possível identificar um aumento de 1,6%, no setor da agropecuária apresentou um aumento de 2,5%, sendo a maior elevação percentual desde o ano de 2010. Com estes dados o Brasil encontra-se na quinta posição entre os maiores poluidores climáticos, tendo cerca de 3,2% do total mundial, estando atrás apenas da China, EUA, Rússia e Índia (POTENZA et al., 2021).

Dentro do setor agropecuário, as áreas responsáveis pelas emissões são advindas da digestão dos animais ruminantes (fermentação entérica) e do manejo de dejetos, no caso o tratamento e disposição destinada a estes. A fermentação entérica apresentou uma emissão de 65% do total do setor agropecuário, com um incremento de 1,5% se comparado com o ano de 2019. Logo após este subsetor, está descrito os solos manejados que apresentaram um crescimento de 5,4% em relação a 2019. De modo que o N_2O , vindo desse subsetor, vem do uso de dejetos de bovinos de corte que são usados como adubo no pasto, bem como o uso de fertilizantes sintéticos. E como fonte de CO_2 a calagem, aplicação do calcário, sendo apontada com terceira maior fonte de emissão desse subsetor. Os demais subsetores encontram-se representando uma emissão em conjunto de menos de 7% (POTENZA et al., 2021).

Potenza (2021) aponta que as mudanças no uso da terra contabilizaram 46% do total de emissão do Brasil, sendo assim o setor que mais emitiu de forma bruta gases do efeito estufa do país. A remoção das áreas protegidas, da vegetação secundária e outras formas de mudanças de uso da terra respondem por um percentual de aproximadamente 24% das emissões líquidas do Brasil, enquanto as emissões vindas da queima de resíduos florestais são responsáveis por 7% das emissões do setor.

Alguns fatores tendem a influenciar a dinâmica de emissão GEE do solo. A umidade do solo é um dos fatores de maior importância na emissão de NO e N_2O , CO_2 e CH_4 já que influencia na atividade microbiana, outro fator que influencia é a temperatura, que juntas podem explicar mais de 80% da variação nas emissões (OERTEL et al., 2016).

Muitos estudos apresentam dados sobre emissões GEE nos biomas brasileiros, mas é comum que haja uma ausência ou minimização da emissão que ocorre em biomas com terras áridas, que representam 41% da superfície do globo terrestre (MCLAIN; MARTENS, 2006). Apesar de ser identificado a influência dos solos para os

balanços atmosféricos de CO₂, N₂O e CH₄, por apresentar características únicas, as áreas com terras áridas vêm sendo negligenciadas com pouca execução de estudos (MCHUGH et al., 2015; COSTA et al., 2006).

Para realização de estimativas de emissões de GEE é necessária uma metodologia padronizada, que auxilie na confiabilidade da análise e permita uma melhor facilidade de comparação. A importância desta padronização destaca-se para a promoção da identificação e certificação de atividades com potencialidade para redução das emissões no mercado de C mundial (COSTA et al., 2006).

2.3. SEQUESTRO DE CARBONO E EMISSÃO DE CO₂

As mudanças promovidas pelas ações antropogênicas tem sido uma pauta muito discutida nas últimas décadas, principalmente no que diz respeito às mudanças ambientais que essas ações promovem. A remoção da vegetação nativa tende a promover mudanças no ecossistema e no seu ciclo, principalmente em regiões tropicais do Brasil, já que estas tem apresentado uma dependência da matéria orgânica para que se mantenham, tendo em vista as inter-relações das características físicas, químicas, biológicas e do C presente no solo (LIMA et al., 2012).

O acúmulo de C no solo depende das taxas de deposição e de decomposição de resíduos que ocorrem nesse solo. Em regiões onde não existe restrição hídrica, solos que possuem alta fertilidade natural possuem seus estoques de carbono no máximo da sua capacidade para armazenar C. Já ecossistemas que possuem uma fertilidade natural muito baixa apresentam uma baixa produção primária de vegetação. Em tais ecossistemas, a produção pode ser aumentada pela aplicação de adubos e de calcário, em relação ao ecossistema natural que existisse nesse local anteriormente. Essas modificações na dinâmica da matéria orgânica do solo tendem a contribuir para uma maior emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o CH₄ e o N₂O para a atmosfera, sendo esses, responsáveis por agravar as mudanças climáticas (LIMA et al., 2012).

O armazenamento de C no planeta ocorre em diferentes compartimentos (oceânico, geológico, pedológico, biótico e atmosférico), fazendo estas parte de um ciclo no qual o C circula entre eles, sendo o maior desses o compartimento oceânico. É estimado que o compartimento pedológico, que corresponde ao solo, possui uma quantidade três vezes maior que a que se encontra estocada no compartimento biótico e duas vezes maior do que o C que se encontra no reservatório atmosférico, isto se considerarmos uma profundidade de um metro. Se considerarmos uma profundidade de 30 cm o estoque do solo para C encontra-se em mesma quantidade do reservatório atmosférico, aproximadamente (LAL, 2004).

O equilíbrio do ciclo do carbono entre o reservatório de carbono do solo e o reservatório de carbono do ar sofre influencia do uso da terra em uma escala maior, em que um teor expressivo de carbono orgânico do solo é oxidado e assim liberado para a atmosfera como CO₂, o que faz com que ocorra uma maior emissão de GEE.

A capacidade para sequestro de C pode ser relacionada com a atividade humana, características do solo e o ambiente natural, o que o torna um sistema com uma possibilidade maior de controle de emissões de GEE (GUOJO et al., 2020).

Regiões que apresentem clima tropical possuem diversas condições que são favoráveis a decomposição da matéria orgânica (umidade, temperatura, oxigênio, pH, tipo e qualidade da matéria orgânica, presença de microrganismos). Em solos dessas regiões podemos identificar a menor capacidade de troca catiônica que solos temperados, o que pode ter influência na decomposição da matéria orgânica do solo, sendo este um aspecto que tende a influenciar em um menor armazenamento de C se compararmos com as regiões de clima temperado, devendo observar o fato das regiões tropicais serem responsáveis por estocarem aproximadamente 32% do C orgânico dos solos do planeta (CARVALHO et al., 2010).

Em regiões onde ainda se encontra a vegetação natural, o estoque de C orgânico é estável, já em solos no qual houve a remoção desta vegetação e foi realizado cultivo, acaba ocorrendo uma diminuição dos estoques de C orgânico do solo, que poderia resultar em um aumento de emissão de CO₂ para atmosfera e consequentemente uma potencial diminuição de aporte de C fotossintetizado no solo. A quantidade líquida de CO₂ emitido do solo para atmosfera é determinada através da diferença dos estoques de C do solo cultivado em relação a quantidade líquida de C do solo com vegetação natural (COSTA et al., 2006; ABREU, 2023; BALDOTTO et al., 2015; CERRI et al., 2017).

Em regiões semiáridas ocorrem diferentes controles biofísicos durante o ano, seguindo as mudanças no regime hidrológico e como isso impacta na umidade do solo, já que a precipitação é capaz de modular os processos biológicos dentro desse ecossistema. A caatinga apresenta eficiência na utilização do carbono que depende das chuvas. De certo modo, ainda existem informações limitadas a respeito da influência dos pulsos isolados de chuva nos fluxos de energia e balanço de CO₂. Sendo importantes influências na atividade biológica, os pulsos de chuva impulsionam a atividade fisiológica e a dinâmica da estrutura desses ecossistemas, influenciando a ciclagem subterrânea de carbono e nutrientes, o que tende a estimular as atividades biológicas das plantas e microbiana do solo. Impactando assim nos ciclos da água, energia e carbono em ecossistemas desse tipo (SILVA et al., 2024).

É descrito na literatura que os tipos de uso do solo tem influência nos estoques de carbono do solo, sendo maior em florestas e solos de pastagens do que todos os

outros tipos de cobertura terrestre. As alterações sofridas nos ambientes tropicais secos podem levar a estoques mais baixos, de modo especial em zonas semiáridas, por apresentar uso pouco frequente de fertilizantes, por ter remoção de culturas agrícolas, uma aceleração na mineralização da matéria orgânica, e compreensão a respeito das mudanças nesse fenômeno é fundamental (LIMA et al., 2022).

Tem sido registrado emissões de GEE de aproximadamente 1.305 milhões de toneladas de CO₂, sendo a agricultura responsável por 34% e o setor da energia de 32% dessa emissão (BRASIL, 2020; SIGNOR et al., 2022). A maior parte das emissões que vem do setor agrícola, especificamente da pecuária como resultado da fermentação entérica dos ruminantes, corresponde a 56,5% das emissões em escala nacional. Mesmo com todos esses resultados, estudos que representem o nível dessas emissões no Semiárido brasileiro são pouco representativos (SIGNOR et al., 2022).

2.4. EMISSÃO DE CH₄

O metano (CH₄) é o gás orgânico mais abundante na atmosfera da Terra e é apontado como o segundo gás mais importante para o efeito estufa, ficando atrás apenas do CO₂ (AGOSTINETTO et al., 2002; BENSEN et al., 2018). As mudanças de uso do solo são um fator que pode influenciar diretamente no aumento dos fluxos desse GEE para a atmosfera e as principais fontes são os solos naturalmente inundados ou que possuem cultivo sob inundação (correspondem a aproximadamente 40% do total de metano), as lavouras de arroz, fermentação entérica, gás natural, a realização de queima da biomassa, atividade de cupins, aterros de lixo, minas de carvão e oceanos. O Brasil é o décimo primeiro país que mais emite metano. Para as lavouras de arroz a emissão dependerá do estágio de desenvolvimento das plantas, das condições que tendem a afetar o solo, o regime de irrigação, fertilizantes, deposição de resíduos orgânicos e condições climáticas (AGOSTINETTO et al., 2002; BENSEN et al., 2018).

As lavouras de arroz sob inundação apresentam emissão de metano como resultado da decomposição anaeróbica de compostos orgânicos. São fontes de metano a matéria orgânica natural do solo, exudatos das raízes das plantas e a matéria orgânica que é incorporada como fitomassa de plantas infestantes e dos restos culturais (AGOSTINETTO et al., 2002; BENSEN et al., 2018).

As atividades agrícolas são apontadas como uma das ações que desempenham normalmente uma ação danosa na atividade em bactérias que promovem oxidação de CH₄, podendo destacar algumas ações mais comuns que levam a essa situação, como, adubação com ureia e amônia em plantios agrícolas. Se realizada por longos períodos, adubações deste tipo podem promover modificações na população microbiana, podendo diminuir a existência de sumidouros de CH₄ (BAYER et al., 2012).

Em sistemas pastoris, o CH₄ é produzido por fermentação entérica, através de um produto da respiração anaeróbica sendo um item removedor de elétrons dentro do rumem, e pelas excretas. Para que ocorra produção de CH₄ existe uma grande perda de energia no decorrer da digestão dos alimentos, de modo que reduzir a produção de CH₄ implica no aumento da eficiência de uso de alimentos. A proporção da energia

bruta que é ingerida que irá se tornar CH_4 tende a variar de 3,0% a 6,5% (RUGGIERI et al., 2017).

As emissões de CH_4 na região nordeste correspondem a 2,7%. Com um olhar voltado apenas para o setor agropecuário é visível que a região nordeste tem emitido 1,54% das emissões nacionais de CH_4 (SIGNOR; MORAES, 2021).

Em um patamar global os ruminantes são apontados como responsáveis por 25% das emissões do CH_4 , já no Brasil é apontado que 70% venha dos ruminantes, se considerarmos o tamanho da produção nacional. As excretas dos bovinos são outra forma de emissão de CH_4 , com a excreção das fezes alguns microrganismos metanogênicos são capazes de se manter vivos ao utilizarem uma parte dos substratos que se encontram nas fezes produzindo o gás (RUGGIERI et al., 2017).

2.5. EMISSÃO DE N₂O

No solo, o óxido nitroso (N₂O) é resultado dos processos que envolvem microrganismos do solo. Os principais processos biológicos que produzem o N₂O são o processo incompleto da desnitrificação, que é um processo anaeróbico facultativo, e a nitrificação, que é um processo aeróbico, de modo que aproximadamente 70% do N₂O dos solos vem desses dois processos. Fatores como a umidade e temperatura do solo influenciam na disponibilidade de N, sendo apontados como os mais influentes no que diz respeito no controle do fluxo de N₂O. Atributos químicos do solo, como pH e teor de matéria orgânica e físicos, como textura, estrutura e porosidade e biológicos, como a cobertura vegetal, são importantes definidores das condições ambientais. Dessa forma, algumas práticas de manejo têm sido apontadas como definidoras na emissão de N₂O, como utilização de adubos nitrogenados, leguminosas e preparo do solo (COSTA et al., 2006; MCDANIEL, et al., 2019; RUGGIERI et al., 2017).

As emissões na região Nordeste correspondente a N₂O encontram-se em 1,44%. No setor da agropecuária é visível que a região Nordeste tem emitido 0,33% das emissões nacionais N₂O respectivamente (SIGNOR; MORAES, 2021). Nas plantações a utilização de fertilizantes nitrogenados tem impulsionado o aumento nos índices de emissões globais do N₂O (MCDANIEL et al., 2019; ALMARAZ et al., 2023).

A compreensão a respeito do fluxo de N no solo e como o equilíbrio se mantém são fundamentais. Por exemplo, o entendimento a respeito das emissões de N₂, que é um gás inerte e benigno ambientalmente, dos solos é um ponto negligenciado. Através do processo de desnitrificação, o NO₃⁻ pode ser convertido a N₂, sendo o processo dependente de C para sua realização ser completa (ALMARAZ et al., 2023).

Algumas estratégias são apontadas como fatores de mitigação para a emissão de N₂O, de modo a impulsionar a eficiência do uso de N pelos animais e plantas. Algumas formas são apontadas como fonte de mitigação da emissão de N₂O, como o manejo de pastagens, buscando reduzir a compactação do solo devido ao uso de máquinas e pisoteio dos animais, e o aumento da matéria orgânica que se encontra no solo. Outros manejos seriam o aumento da utilização de forrageiras leguminosas, para reduzir a utilização de fertilizantes nitrogenados, cessar a utilização de queimadas, fazer uso de N apenas na quantidade necessária exigida pelas forrageiras, buscar equilíbrio na produção animal e vegetal, não fazer uso de fertilizantes a lanço (RUGGIERI et al., 2017).

2.6. MÉTODOS DE COLETA PARA DETECÇÃO DE GEE

Atualmente existem muitos métodos que podem ser utilizados para coletar e quantificar os GEE. O método de captura de CO₂ em solução alcalina em solos trata-se de uma técnica clássica, sendo usada para medir a respiração que ocorre no solo. É um método de determinação indireta, realizado em laboratório, com amostras de solo coletadas em campo, sendo apontado como o método mais antigo, simples e barato para estudo da emissão de CO₂ de solos (COSTA et al., 2006).

O método que utiliza analisadores de infravermelho é baseado na capacidade de que os gases de CO₂, CH₄ e N₂O tem de absorver a radiação eletromagnética na faixa do infravermelho. A utilização deste método para quantificação é vista como muito prática para as estimativas dos GEE, já que é possível quantificar os três gases (CO₂, CH₄ e N₂O) em uma única amostragem (COSTA et al., 2006).

Para a cromatografia gasosa, os principais itens que compõem o sistema são o gás carregador, coluna cromatográfica, detector e sistema computacional para processamento dos dados. Trata-se de um sistema versátil já que permite escolher os componentes e montar um só aparelho para quantificar os três GEE (COSTA et al., 2006; JUNIOR-LIMA et al., 2022).

A utilização da câmara de amostragem promove restrição à passagem de ar que é liberado do solo para a atmosfera, ficando os gases restritos dentro da câmara, o que permite a obtenção de amostras gasosas para determinação de suas composições. Estas câmaras podem ser fechadas ou abertas, sendo as fechadas as mais comuns. Para realização das medições de gás é realizada a coleta do ar em intervalos de tempo previamente definidos, utilizando as amostras coletadas para determinação por infravermelho ou cromatografia gasosa. Este tipo de câmara promove uma alteração no microambiente por sua instalação desestabilizar o solo no qual é inserida, o que provoca mudanças na temperatura, pressão e concentração dos gases, o que deve ser considerado nas interpretações dos resultados que serão obtidos (COSTA et al., 2006).

2.7. EMISSÃO DE GEE NO BIOMA CAATINGA E EM FLORESTAS TROPICAIS SECAS

As florestas tropicais secas são importantes fornecedores de serviços ecossistêmicos, com um imenso papel de apoio aos sistemas agrícolas, favorecendo milhões de pessoas que vivem dessa prática, sendo em sua maioria pessoas de baixa renda. Entretanto, este tipo de formação vegetal é um dos mais ameaçados e menos estudados do mundo. A falta de estudos neste tipo de floresta é apontada por alguns autores por dificuldades em como se definir o que viria a constituir essas florestas. Uma definição utilizada para tal diz que as florestas tropicais secas são uma Zona Ecológica Global (ZEG), que possuem um clima tropical, com chuvas de verão, com um período seco de 5 a 8 meses e uma precipitação anual inferior a 800 mm. Podendo ser inclusas dentro das Florestas secas o tipo mais seco de miombo e bosques sudaneses, a savana na África, a caatinga e o chaco na América do Sul e as florestas e bosques decíduos de *Dipterocarpus* na Ásia. Independente da região onde se localizem é de conhecimento que as florestas tropicais secas são o tipo de vegetação que menos possuem estudos realizados ou em execução (BLACKIE et al., 2014).

A China possui muitos tipos de ecossistemas, onde é possível identificar área árida e semiárida. É apontado que o país tem apresentado um aumento das suas emissões de gases de efeito estufa sendo um dos que mais emitem no mundo, sendo a contribuição do país em CO₂ de aproximadamente 13,5% atrás apenas dos EUA (GUOJO et al., 2020).

Os estudos que já foram realizados no bioma Caatinga demonstram que as alterações no uso da terra que ocorrem interferem diretamente em atributos que tendem a influenciar em emissões maiores nesse bioma, bem como a temperatura e umidade do solo. Outro ponto a ser observado seriam as mudanças climáticas, já que como já citado a temperatura e umidade são importantes reguladores das emissões de GEE, e também a influência do clima nas atividades microbiológicas destes solos (RIBEIRO, 2017).

Para os gases CH₄ e N₂O, as emissões com maiores valores ocorrem nos estados da Bahia, do Ceará, de Pernambuco e do Piauí, por se tratar dos estados com os maiores rebanhos de bovinos, caprinos e ovinos. Os rebanhos de caprinos e de ovinos na Bahia, se aproximam da metade do rebanho bovino. No Piauí, Pernambuco e Ceará, pelas condições climáticas, a situação é outra, a quantidade de caprinos e

ovinos é muito maior que a quantidade de bovinos (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2018; SIGNOR; MORAES, 2021).

Os dados a respeito dos GEEs correspondentes a região Nordeste, foram calculados baseados em valores tabelados e em condições que não correspondem às encontradas no Nordeste, por esta razão é muito necessária a intensificação de estudos a respeito da emissão de GEEs na região, considerando a diversidade de atividades ligadas a produção e também exportação de produtos e ao grau de importância da região no que diz respeito às mudanças climáticas (SIGNOR; MORAES, 2021).

Trabalhos como o de Araújo (2008), concluíram que se faz necessária a realização de mais estudos em regiões de semiárido a respeito de temperatura e umidade do ar levando em consideração como esses fatores são relevantes para a liberação de CO₂.

Outro estudo que analisou dados do MapBiomas durante um período de 2000 a 2016, identificou que o município de Petrolândia- PE perdeu uma parte expressiva de sua área vegetada, em contrapartida o uso agropecuário apresentou um aumento, o que implicou em um aumento nas emissões de GGE durante o período do estudo, tendo em vista que este fator tem ligação com aumento de emissões (Gomes et al., 2017).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Áreas de estudo

As avaliações foram realizadas em parcelas que compõem a rede de pesquisas ecológicas de longa duração no Nordeste (PERENE). As parcelas estão espacializadas de modo a compreender condições edafoclimáticas contrastantes no Semiárido de Pernambuco (Figura 1) e estão instaladas em estações do IPA, nos municípios de Caruaru, São Bento do Una, Arcoverde, Sertânia e Araripina, e do IF Sertão, em Petrolina (Tabela 1).

Figura 1: Mapa de localização geográfica dos municípios.

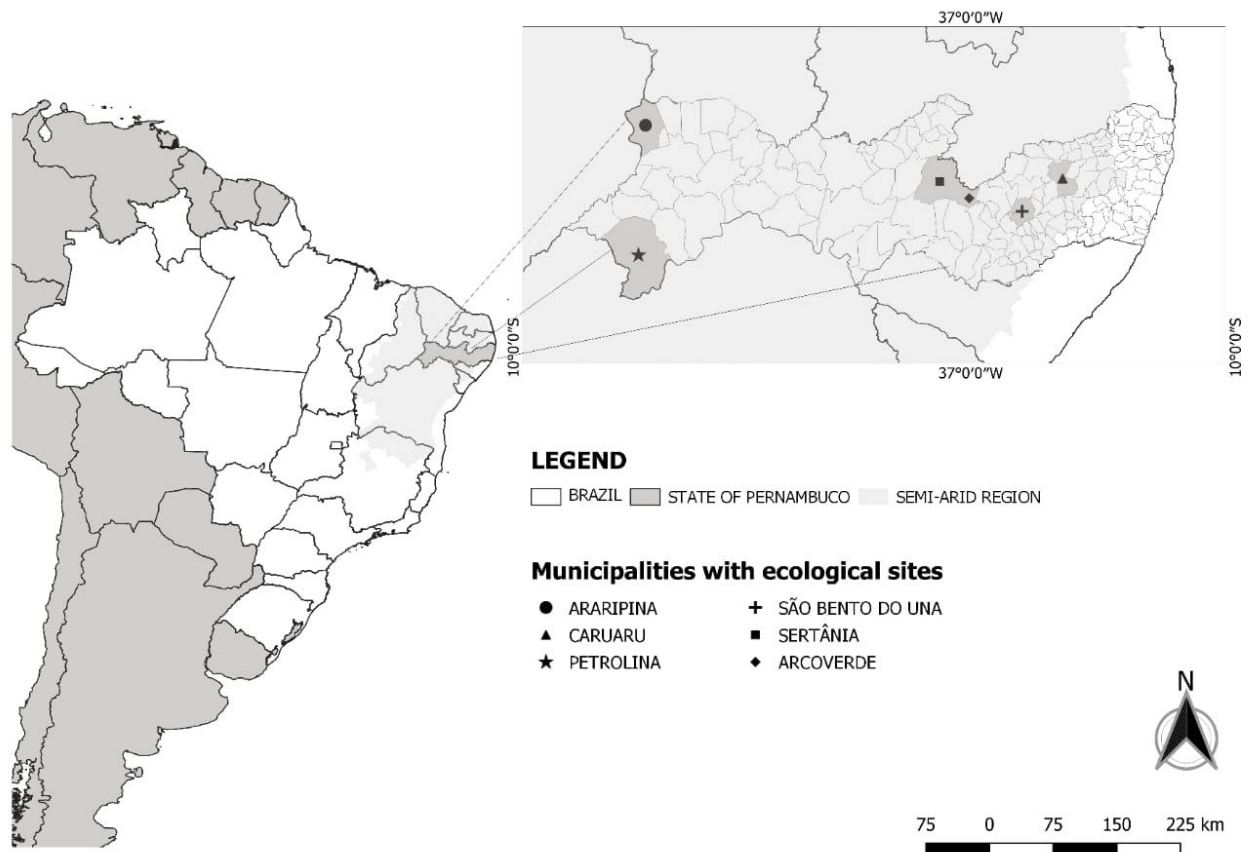


Tabela 1: Características edafoclimáticas das parcelas permanentes.

Municípios/ Características	Arcoverde	Sertânia	Araripina	Petrolina	São Bento do Una	Caruaru
Mesorregião	Sertão	Sertão	Sertão	Sertão	Agreste	Agreste
Microrregião	Sertão do Moxotó	Sertão do Moxotó	Araripina	Petrolina	Vale do Ipojuca	Vale do Ipojuca
Coordenadas	8°25'15" S	8°04'14" S	7°34'33" S	9°19'13" S	8°31'22" S	8°36'15" S
	37°03'41" W	37°15'57" W	40°29'52" W	40°51'66" W	36°26'38" W	35°87'18" W
Altitude (m)	730	558	831	380	614	545
Temperatura média anual (°C)	23,5	25	24,6	26,6	22,8	22,5
Precipitação média anual (mm)	706	490	759	428	616	612
Clima (Classificação de Köppen)	Tropical quente e seco (semi-árido)	Tropical quente e seco (semi-árido)	Tropical quente e seco (semi-árido)	Tropical quente e seco (semi-árido)	Tropical quente e seco (semi-árido)	Tropical quente e seco (semi-árido)
Tipo de solo	Neossolo Regolítico	Neossolo Regolítico	Latossolo	Argissolo	Planossolo Háplico	Neossolo Regolítico

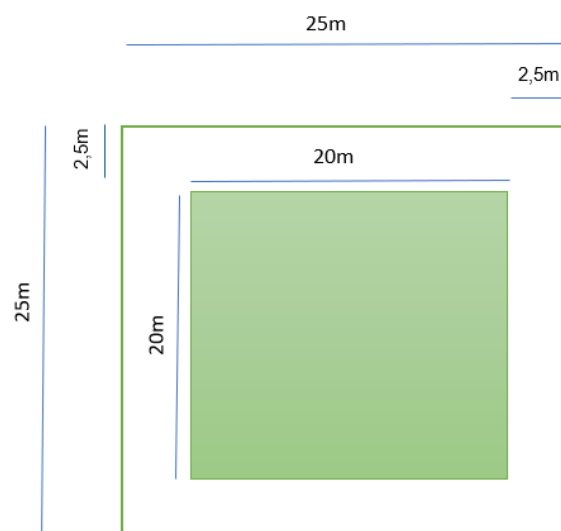
Em cada um dos municípios, foram instaladas parcelas permanentes em áreas com três tipos de cobertura vegetal, que constituem os tipos mais comuns de uso da terra para fins pecuários no Bioma Caatinga. As áreas de caatinga fechada são caracterizadas por vegetação nativa com dossel que intercepta mais de 80% da luz solar radiante, indicando um histórico longo de pouca intervenção antrópica, um avançado estado de crescimento e regeneração e, alguns casos, de sucessão ecológica. As áreas com caatinga aberta apresentam menor densidade de árvores e arbustos e maior cobertura de estrato herbáceo, indicando um estágio inicial ou intermediário de regeneração e sucessão ecológica. As pastagens herbáceas são áreas antropizadas, formadas quase que exclusivamente por espécies herbáceas, com poucos arbustos e árvores em regeneração que apresentam diâmetros de caule menores que 6 cm (Figura 2).

Figura 2. Coberturas vegetais das parcelas permanentes em época seca e chuvosa, pastagem, caatinga aberta, caatinga densa, respectivamente.



Dentro de cada tipo de cobertura vegetal, foram delimitadas parcelas de 25 x 25 m, que foram cercadas não sendo permitido a entrada dos animais e, por este motivo, foram denominadas de parcelas com exclusão. Dentro de cada uma foi separada uma bordadura de 5 m de largura em todo o perímetro, ficando a área útil de estudo com 20 x 20 m, totalizando uma área amostral de 400 m² por parcela (figura 3). Como foram estabelecidas 18 parcelas, sendo 3 parcelas para cada município, totaliza-se uma área amostral total de 7200 m² (0,72 ha).

Figura 3: Croqui da parcela permanente.



3.2. Amostragem e determinação de atributos físicos e químicos do solo

Foram coletadas amostras deformadas, com trado manual holandês, e indeformadas, com trado com anel volumétrico, de solo, para a determinação dos atributos físicos e químicos do solo, na camada de 0 a 20 cm de profundidade.

Parte das amostras foram secas ao ar, homogeneizadas e peneiradas em peneira de malha de 2 mm (terra fina seca ao ar, TFSA), para determinação dos atributos químicos e físicos dos solos. Os atributos químicos analisados foram: pH em água (proporção solo: água de 1:2,5); carbono (C) e nitrogênio (N) totais; determinados pelo método da combustão seca, utilizando analisador elementar LECO, TruSpec CHN-900), sódio (Na^+), potássio (K^+) e fósforo (P), extraídos com Mehlich-1, sendo Na^+ e K^+ dosados por fotometria de emissão de chama e P por colorimetria; cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e alumínio (Al^{3+}), extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e dosados por titulometria. A granulometria do solo (proporções de areia, silte e argila) foi determinada pelo método da pipeta, permitindo definir a classe textural de cada amostra. Todas as análises foram feitas seguindo as metodologias estabelecidas pela Embrapa (2017).

A densidade das partículas (D_p) do solo foi determinada pelo método do balão volumétrico (Embrapa, 2009) e a densidade do solo (D_s) (g cm^3) pelo método do anel volumétrico (GROSSMAN & REINSCH, 2002) por meio da seguinte equação:

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_t}$$

onde: D_s – é a densidade do solo (g cm^{-3}); M_{ss} – é a massa da amostra contida no anel volumétrico e seca a 105°C (g); V_t – é o volume total do solo, assumido como sendo o volume do anel volumétrico ($\pi r^2 h$), expresso em cm^3 .

A porosidade total do solo foi obtida de forma indireta, a partir da diferença entre as densidades do solo e das partículas do solo (Embrapa, 2009).

Tabela 2: Caracterização química do solo.

Município	Cobertura	pH H ₂ O	N	C %	C/N	P	Ca	Mg	K mg/dm ³	Al	Na	CTC
Petrolina	C. D.	5,62	0,06	0,70	11,77	2,83	1,56	0,70	0,25	0,06	0,02	4,38
	C. A.	5,23	0,05	0,58	11,99	2,83	0,66	0,55	0,16	0,33	0,02	3,27
	P.	5,73	0,05	0,59	12,22	2,50	2,19	0,59	0,24	0,09	0,01	4,83
Araripina	C. D.	4,37	0,05	0,80	15,99	1,83	0,28	0,47	0,06	0,73	0,03	5,85
	C. A.	4,42	0,03	0,49	14,44	1,83	0,06	0,43	0,03	0,66	0,02	3,65
	P.	4,52	0,04	0,56	13,69	1,67	0,19	0,51	0,03	0,58	0,01	4,15
Sertânia	C. D.	6,80	0,16	1,64	10,57	44,33	17,49	1,37	0,41	0,00	0,06	20,82
	C. A.	6,90	0,08	1,03	12,37	32,17	7,78	1,19	0,65	0,00	0,04	11,08
	P.	6,80	0,09	0,92	9,74	31,33	7,05	1,36	0,31	0,00	0,06	10,15
Arcoverde	C. D.	5,00	0,21	2,47	11,47	6,00	3,13	1,15	0,43	0,22	0,03	10,17
	C. A.	5,38	0,12	1,34	10,93	7,83	1,79	0,78	0,46	0,16	0,03	5,92
	P.	5,82	0,12	1,24	10,43	8,83	2,73	0,80	0,50	0,03	0,02	7,33
São Bento do Una	C. D.	5,22	0,14	1,44	10,47	4,17	5,10	0,98	0,29	0,17	0,05	11,02
	C. A.	5,27	0,07	0,76	10,56	4,50	2,96	1,12	0,22	0,13	0,07	7,58
	P.	5,10	0,08	0,76	9,63	4,67	1,47	0,93	0,23	0,18	0,05	5,02
Caruaru	C. D.	4,98	0,11	1,30	11,58	11,17	2,95	0,98	0,04	0,16	0,33	9,80
	C. A.	5,23	0,09	1,10	12,09	12,17	2,59	1,11	0,36	0,12	0,07	7,55
	P.	4,53	0,06	0,57	9,36	15,17	0,94	0,80	0,04	0,39	0,20	6,15

Caatinga Densa: C. D.; Caatinga Aberta: C. A.; Pastagem: P.

Fonte: Próprio autor (2024).

Tabela 3: Caracterização física do solo.

Cidade	Cobert	Densidade (g/cm ³)		Composição Granulométrica (%)				Umidade (%)			Porosidade
		Dp	Ds	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Residual	0,33 Atm	15 Atm	
Petrolina	C. D.	1,40	2,60	28,33	48,67	11,33	11,67	1,39	10,78	3,71	0,4615
	C. A.	1,43	2,59	34,67	48,67	7,00	9,67	1,35	6,61	3,13	0,4479
	P.	1,42	2,56	33,83	42,17	7,00	17,00	1,48	7,87	4,58	0,4453
Araripina	C. D.	1,33	2,56	51,00	23,83	5,83	19,33	1,40	12,72	6,44	0,4805
	C. A.	1,33	2,55	51,33	22,33	2,33	24,00	1,87	10,49	5,63	0,4784
	P.	1,34	2,55	49,33	23,33	3,33	24,00	1,74	12,13	5,99	0,4745
Sertânia	C. D.	1,35	2,56	38,83	18,67	22,67	19,83	1,55	20,87	9,51	0,4727
	C. A.	1,35	2,53	44,00	26,33	18,50	11,17	1,79	11,43	5,33	0,4664
	P.	1,37	2,60	44,67	20,17	17,67	17,50	1,84	12,90	7,09	0,4731
Arcoverde	C. D.	1,37	2,56	40,17	22,17	22,00	15,67	1,81	15,83	8,63	0,4648
	C. A.	1,34	2,53	40,67	26,33	18,17	14,83	1,23	13,70	7,50	0,4704
	P.	1,34	2,53	45,67	21,33	21,33	11,67	1,37	14,16	7,51	0,4704
São Bento do Una	C. D.	1,35	2,53	34,00	24,33	31,67	10,00	1,45	11,91	4,59	0,4664
	C. A.	1,35	2,56	34,33	29,33	23,33	13,00	1,49	11,66	4,74	0,4727
	P.	1,35	2,56	47,00	27,00	15,33	10,67	1,46	7,35	2,53	0,4727
Caruaru	C. D.	1,32	2,49	45,67	24,67	15,00	14,67	1,64	15,24	7,61	0,4699
	C. D.	1,35	2,53	53,00	22,00	11,33	13,67	1,28	14,08	7,22	0,4664
	P.	1,34	2,56	49,00	24,83	14,50	11,67	1,46	9,13	4,65	0,4766

Caatinga Densa: C. D.; Caatinga Aberta: C. A.; Pastagem: P.

Fonte: Próprio autor (2024).

3.3. Coleta e determinação de gases

No presente estudo foi utilizada metodologia para estimativas das emissões de gases, onde as amostragens foram realizadas em duas épocas, uma na estação chuvosa e outra na estação seca, buscando a realização no período da manhã.

A metodologia utilizada faz uso do equipamento medidor de gás portátil da marca Gasmeter modelo DX4015, que se trata de um analisador portátil de gás que utiliza de tecnologia FTIR (infravermelho por transformada de Fourier), de modo que este realiza a medição de todos os comprimentos de onda IR simultaneamente o que produz um espectro completo. Nas parcelas foram distribuídas, também de forma aleatória, cinco câmaras confeccionadas com alumínio e com uma estrutura que contém espaço na parte superior na qual é adicionado água no momento da coleta, que tem como função vedação assim que a tampa for colocada sobre a base, para coleta de gases. A tampa possui conectores com fios ligados ao equipamento de leitura, fazendo com que o ar circule, em um ciclo fechado. A tampa é movimentada pelas bases já instaladas, ficando sobre cada base por dez minutos.

Essa metodologia permite a leitura instantânea dos gases CO_2 , CH_4 e N_2O mediante uma comparação com uma biblioteca. A leitura com esse equipamento permite a digitalização simultânea de todo o espectro infravermelho, dos gases que estão passando pela unidade de leitura. Após isto, o software calcula as concentrações de cada gás na amostra, de modo a se basear na absorção característica de cada radical químico, que são comparados com a biblioteca padrão do equipamento, fazendo com que todos os gases da amostra sejam medidos simultaneamente, porque todo o espectro infravermelho é varrido de uma só vez. As medições são multicomponentes, sem que ocorra qualquer interferência cruzada.

Simultaneamente às coletas de gases, foram feitas aferição da temperatura do ar e do solo, no interior da câmara e fora da câmara. Para tal medida, foi utilizado termômetros digitais (Minipa MV-360), conforme metodologia da Embrapa (2009). Também foram determinadas a umidade gravimétrica de amostras de solo coletadas no momento das coletas e leituras de gases, UA (%), correspondente à umidade da amostra no momento da coleta, determinado pela diferença de pesagem da amostra úmida e após a secagem em estufa (EMBRAPA, 2009).

3.4. Análise estatística

As variáveis estimadas foram submetidas a teste de distribuição normal e homoscedasticidade e, quando necessário, foram realizadas transformações dos dados para que atendessem às premissas da análise de variância (ANOVA).

Para estimar os efeitos gerais da sazonalidade (período chuvoso e período seco) e dos tipos cobertura (caatinga densa, caatinga aberta e pastagem com herbácea), os dados serão submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando um desenho experimental em parcelas subdivididas, em que as parcelas foram os períodos de amostragem (período seco e período úmido) e as subparcelas, os tipos de cobertura (caatinga fechada, caatinga aberta e pastagem). Os locais onde as parcelas foram instaladas são considerados como repetições experimentais. Para comparação das médias foi utilizado o teste t de Student (Bonferroni) ($p < 0,05$), teste mais indicado para trabalhos em que não se tem um delineamento experimental propriamente dito.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Temperatura e Precipitação

A média de temperatura do solo se apresentou maior durante a estação seca em todos os locais. A maior temperatura foi de 48,76 °C em caatinga aberta (Sertânia), já a menor temperatura foi 26,1 °C ocorrendo em caatinga densa (Arcoverde), o que demonstra uma variação de temperatura considerável nos diferentes tipos vegetacionais.

A temperatura máxima foi de 32,28 °C na estação chuvosa em caatinga densa (Sertânia), e a menor foi de 22,86 °C em caatinga densa (Arcoverde), com uma menor variação nas temperaturas o que pode ser justificado pela ocorrência das chuvas que ocorrem na estação. Pode-se verificar que as vegetações com maiores temperaturas possuem menores exemplares vegetais, com isso o solo tende a receber mais radiação solar incidente, o que contribui em muito para um aumento do fluxo de calor do solo (quantidade de energia térmica que se move através de uma área do solo em uma unidade de tempo) (LIMA et al., 2020).

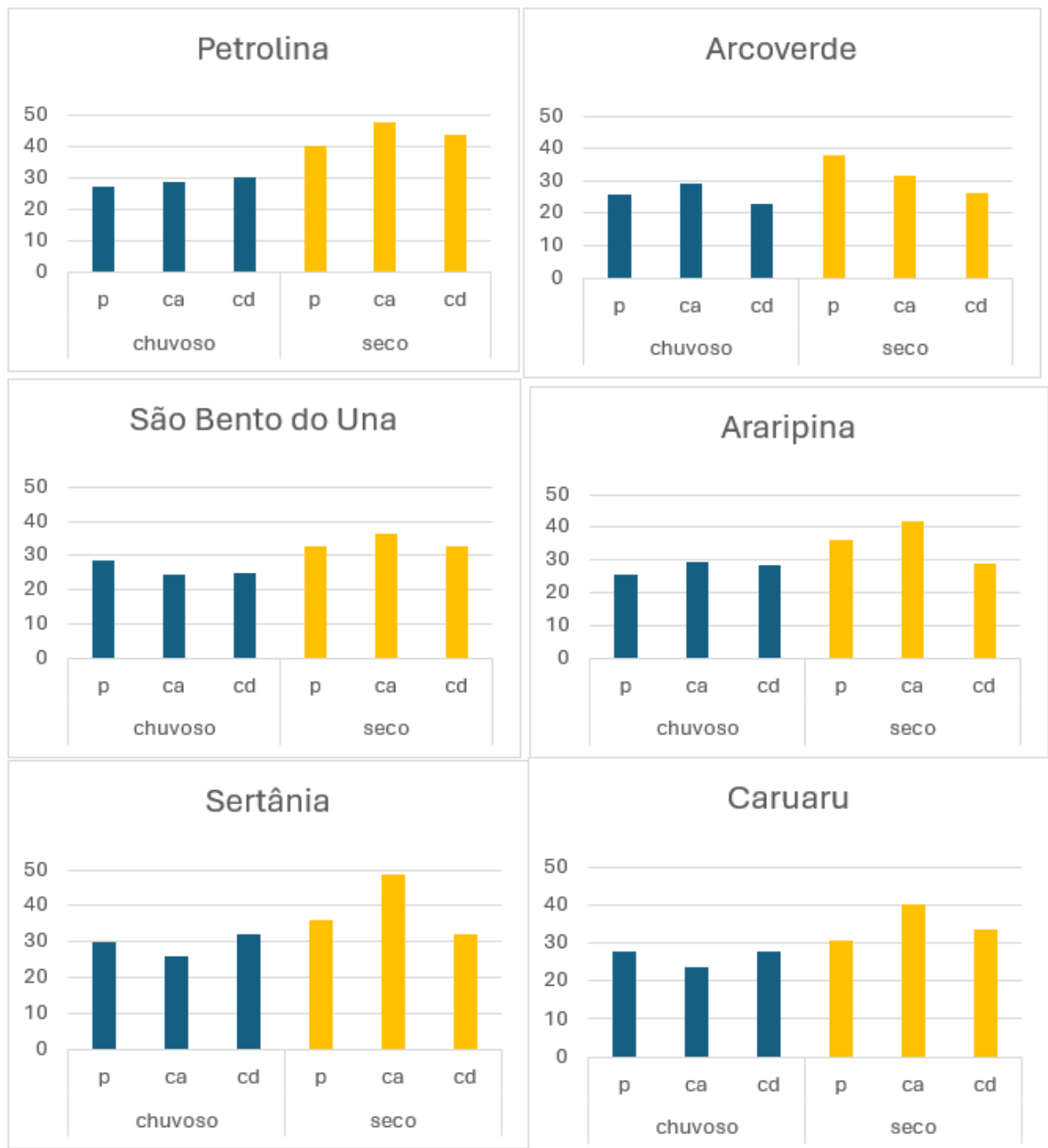
Podemos observar na figura 4 as diferenças de temperatura entre as localidades e os diferentes usos do solo, com variações na estação chuvosa e na estação seca.

Na estação chuvosa podemos identificar algumas situações se compararmos as mudanças de uso do solo. A caatinga densa, em Petrolina apresentou maiores valores em suas temperaturas se comparado com os outros estratos, isto pode estar relacionado com o fato de que a caatinga densa apresentar árvores com baixa quantidade de folhas o que acaba por deixar o solo mais exposto a maior incidência solar, na pastagem encontra-se o menor valor que pode estar relacionado a maior concentração de capim, que realiza uma cobertura quase que completa do solo. Em Araripina a maior temperatura foi na caatinga aberta devido a parcela possuir uma menor cobertura vegetal, contendo muita área do solo descoberta. Em São Bento do Una o maior valor da temperatura foi na pastagem que possui menor existência de indivíduos arbóreos, o que pode acabar por contribuir com as maiores temperaturas.

Na estação seca a maior temperatura ocorreu na caatinga aberta de Petrolina, já que a vegetação desta área é a mais aberta em relação a caatinga densa e a pastagem nos municípios, permitindo uma maior exposição do solo. Araripina apresentou uma maior temperatura na caatinga aberta, quando comparada às

diferentes mudanças de uso do solo devido a ausência de vegetação. Em Sertânia a caatinga aberta apresentou a maior temperatura, devido a presença de indivíduos herbáceos e na estação seca apresentavam uma aparência muito seca o que evidenciava o solo. Arcoverde apresentou a maior temperatura em pastagem que se deve ao fato de possuir apenas capim pagola. Em São Bento do Una e Caruaru a maior temperatura foi em caatinga aberta que em ambas as áreas ela possuía poucos indivíduos o que permitia maior incidência solar.

Figura 4: Médias das temperaturas da solo época seca e chuvosa.



A precipitação mensal variou nos diferentes municípios durante as duas épocas de coleta (Tabela 4). As médias acumuladas durante o mês de maio (correspondente a época chuvosa) apresentaram o maior valor em Arcoverde, seguida de São Bento do Una e os menores foram vistos em Sertânia e Petrolina. Já em outubro (correspondente a época seca) as médias acumuladas em sua maioria (em quatro municípios) foram iguais a zero e os maiores valores foram em Caruaru e São Bento do Una, localizadas no agreste pernambucano. A precipitação relaciona-se com a umidade e a temperatura e conseqüentemente na atividade microbiana do solo. Segundo Silva et al. (2024) os pulsos de atividade microbiana do solo sofrem influencia se a precipitação for acima de 80 mm acabam por influenciar em uma assimilação líquida de CO₂ em contra partida se a precipitação for abaixo de 13 mm não é o suficiente para recarregar os estoques de água do solo e incrementar a fotossíntese.

Tabela 4: Precipitação nos diferentes municípios nas épocas de coleta.

Municípios	Maio 2023		Outubro 2023	
	Média Acumulada (mm)	Média Climática (mm)	Média Acumulada (mm)	Média Climática (mm)
Petrolina	24,6	9,5	0	10,4
Araripina	60,5	41	0	12,3
Sertânia	16,5	47,2	0	13,2
São Bento do Una	73,7	81,4	2,1	16,9
Arcoverde	78,7	77,1	0	14,5
Caruaru	44,6	81,4	6,6	11,2

Fonte: Adaptado da Agência Pernambucana de Águas e clima (APAC), Pernambuco, Brasil.

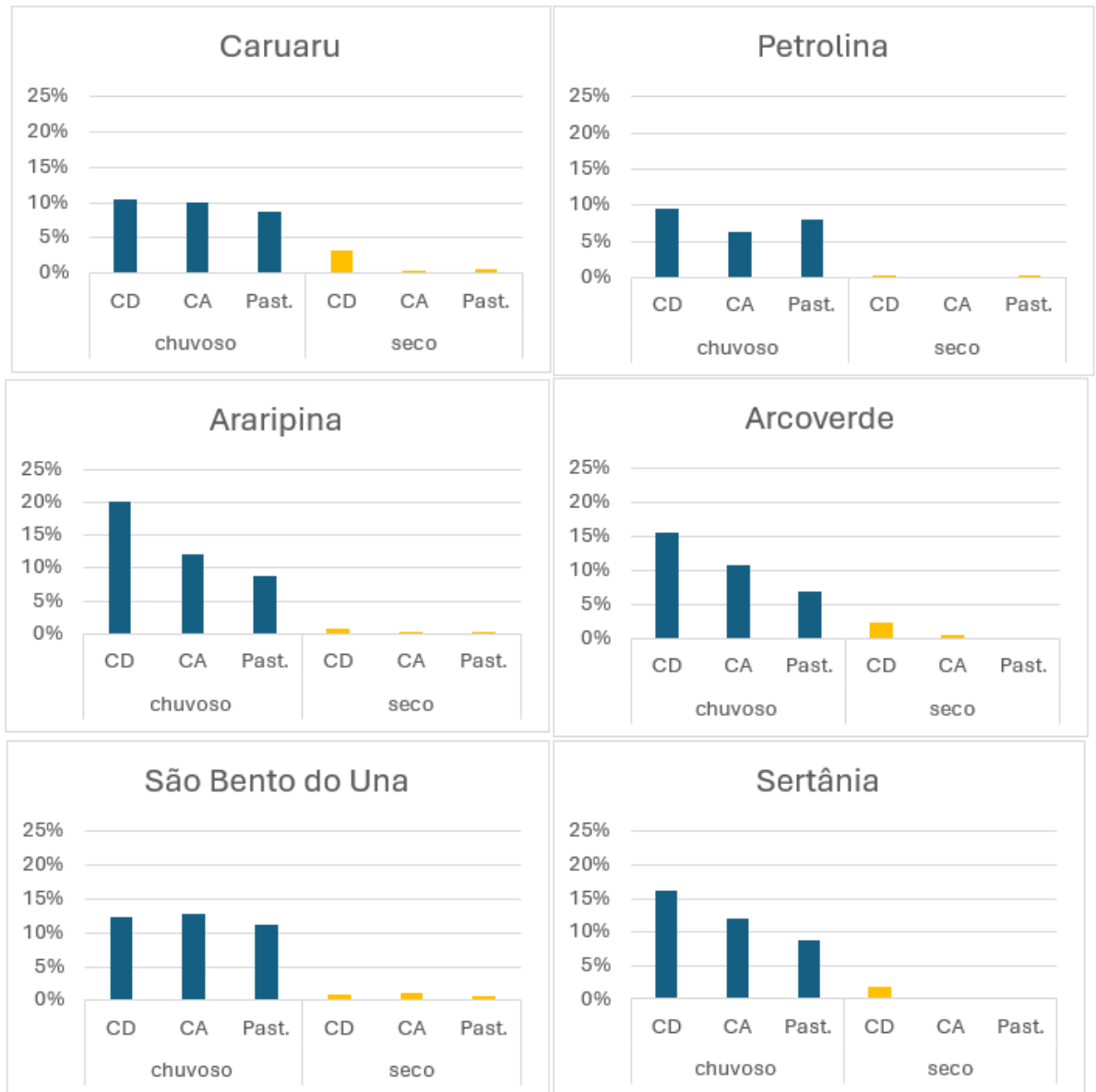
4.2. Umidade

A umidade média durante a estação seca se apresentou baixa, com máxima e mínimo de 3,32 e 0,14%, respectivamente. Na época chuvosa a média da temperatura máxima foi de 16,16%, e o valor mínimo foi de 6,23%, onde o mínimo encontrado nessa estação superior ao máximo correspondente a estação seca (Figura 5).

A umidade é um fator determinante na atividade microbiana do solo, sendo fatores diretamente proporcionais. Visto que, uma maior umidade do solo, teremos uma maior atividade de microrganismos e consequente uma maior respiração no solo influenciando nas emissões de GEE (RIBEIRO, 2017).

Os resultados da umidade estão relacionados com vários fatores, como por exemplo os solos dos municípios. Em Araripina encontramos um Latossolo que é um solo mais argiloso o que influencia em manter a umidade por mais tempo nele, foi o município que apresentou maior umidade em época chuvosa. Em Petrolina encontramos a menor umidade, em época chuvosa, que pode estar relacionada ao fato da baixa precipitação que ocorreu no mês de maio neste município. Em Caruaru o solo que encontramos é o Neossolo Regolítico que de muitas características a capacidade de reter água é relativamente baixa, o que pode ter influencia com a baixa umidade quantificada.

Figura 5: Médias da umidade do solo nas estações seca e chuvosa, nos diferentes usos do solo e nos diferentes municípios.

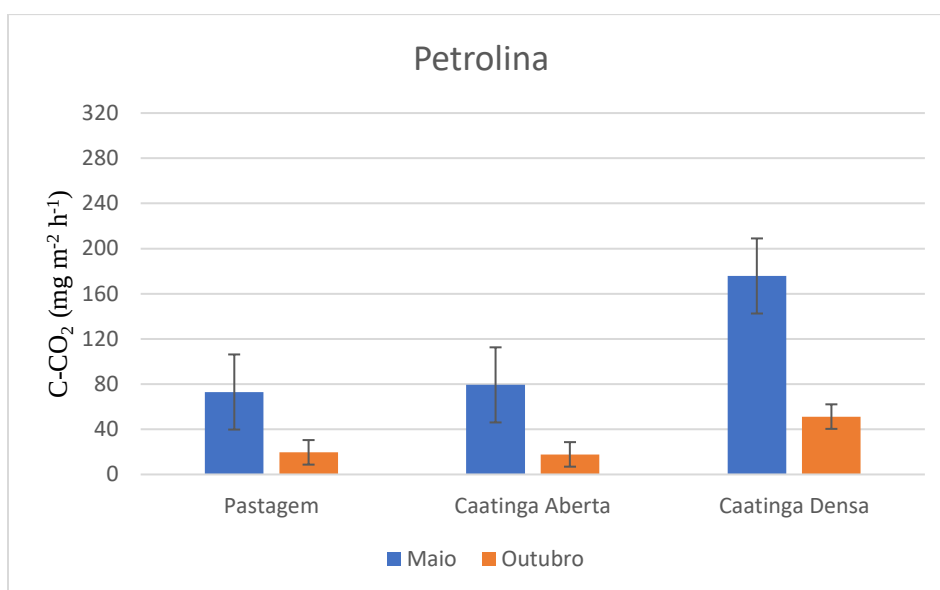


4.3. EMISSÕES DE CO₂

4.3.1. Petrolina

As emissões de CO₂ foram superiores dos que as que ocorreram na estação seca nos três usos do solo estudados no município de Petrolina. Com suas maiores emissões ocorrendo na caatinga densa em ambas as épocas, com o maior valor na época chuvosa com valor de 175,76 mg m⁻² h⁻¹ conforme visto na Figura 6.

Figura 6: Emissões de CO₂ em diferentes usos do solo em Petrolina.



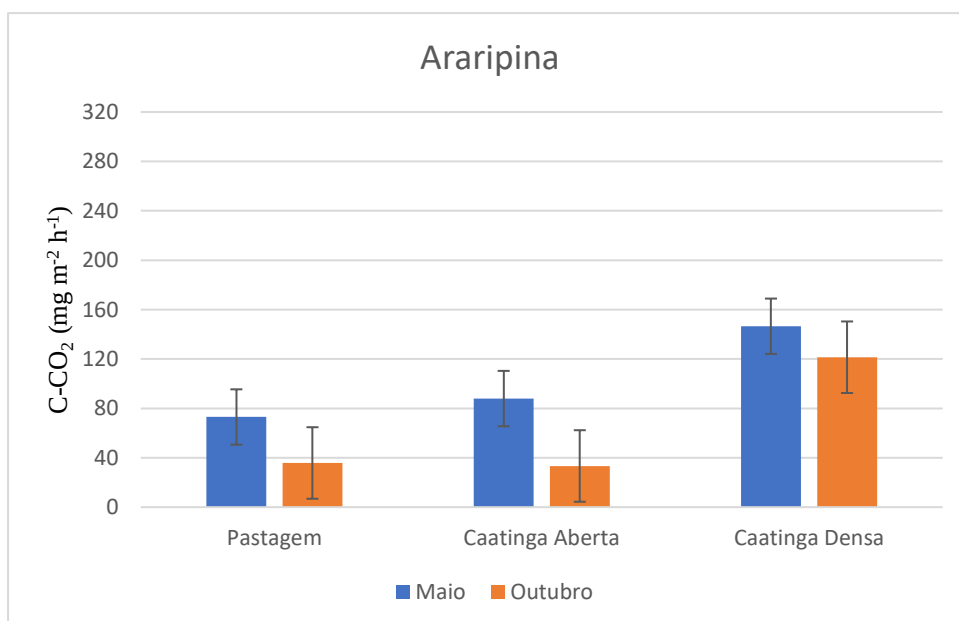
Podemos identificar que são vários os possíveis fatores relacionados as emissões do CO₂, como a respiração das raízes e da microbiota do solo, a umidade que se encontra no solo, onde o aumento da umidade do solo seco é responsável por ocasionar um crescimento na atividade microbiana do solo que se encontrava pausada durante o período seco, impulsionando assim a mineralização do carbono e nitrogênio, favorecendo as emissões de CO₂ do solo (HARRISON-KIRK et al., 2013; DAVID et al., 2018). Estudos apontam que quanto maior for a umidade do solo maior será as emissões já que a mobilidade microbiana é favorecida com essa umidade (EMBRAPA, 2023). Em Petrolina encontramos solos argilosos, que são solos que possuem maior quantidade de argila o que favorece permanência de umidade por mais tempo nesse solo.

4.3.2. Araripina

Em Araripina a distribuição das parcelas é diferente das demais parcelas, onde as três se encontram próximas espacialmente, com uma caatinga densa com vegetação bem estabelecida, com dossel bem fechado. Já a caatinga aberta possui pouca cobertura vegetal sobre o solo, com a ocorrência de poucos indivíduos de arbustos.

Os valores de emissões de CO₂ foram superiores na época chuvosa, com maior valor na caatinga densa (209,03 mg m⁻² h⁻¹), o menor valor foi identificado em caatinga aberta na época seca com emissão de CO₂ de 33,34 mg m⁻² h⁻¹, conforme figura 7. A caatinga densa que apresentou uma maior umidade, influenciando na emissão de CO₂, mostrando que a quantidade de água disponível no solo foi um fator determinante na emissão desse gás no experimento (RIBEIRO, 2017). A baixa emissão de CO₂ na caatinga aberta pode estar relacionada com a alta temperatura no solo passando dos 40 °C, já que muitos microrganismos funcionam em uma faixa específica de temperatura (KARHU et al., 2014).

Figura 7: Emissões de CO₂ em Araripina.

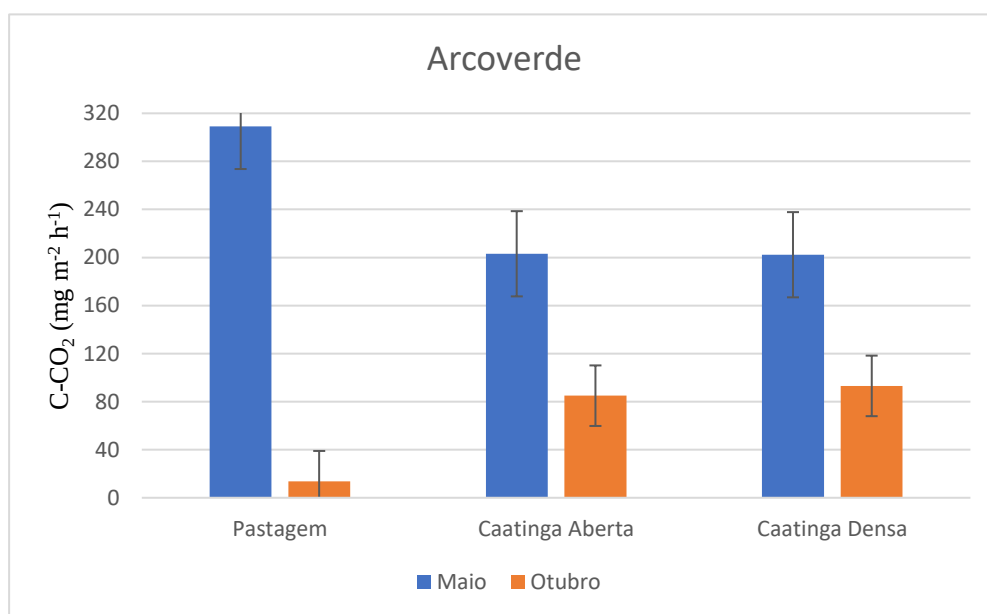


4.3.3. Arcoverde

Em Arcoverde a maior emissão foi em pastagem na época chuvosa com valores de $309,11 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e na época seca o maior valor de emissão foi em caatinga densa com $93,11 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Figura 8). No período seco, a caatinga densa e caatinga aberta tiveram uma maior emissão de CO_2 , devido a maior umidade em relação a pastagem.

A área de pastagem apresentava ocorrência de capim pagola e pouca ocorrência de indivíduos arbustivos, já na área de caatinga densa a vegetação é bem estabelecida com dossel fechado e pouca ocorrência de entrada de luz solar radiante. A pastagem apresentou uma maior emissão e pode estar relacionada com a temperatura favorável a mineralização do C e N. Em estudo realizado por Dai et al, (2020), demonstraram que em temperatura elevada muda o ciclo de N da imobilização microbiana para a mineralização ecossistemas terrestres globais.

Figura 8: Emissões de CO_2 em Arcoverde.

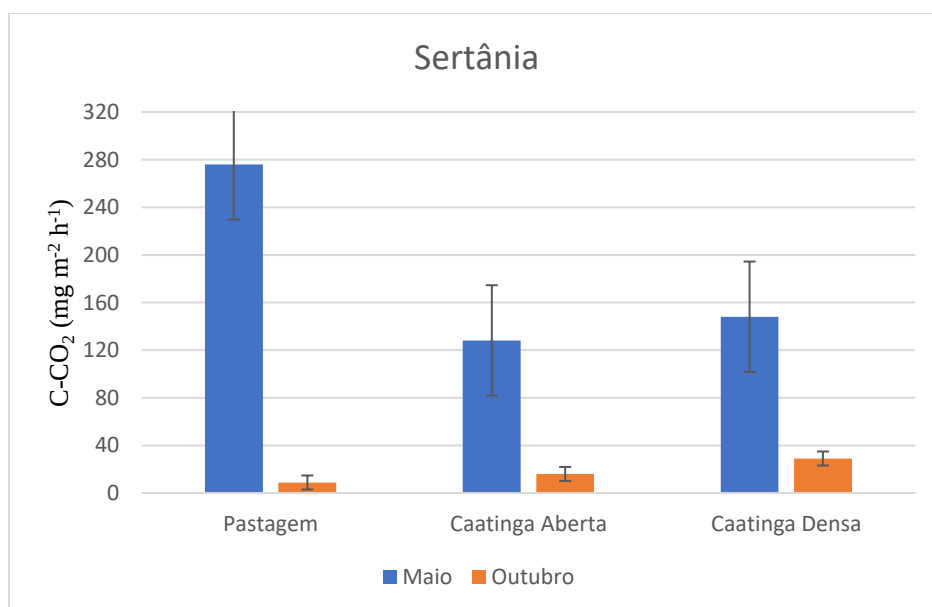


4.3.4. Sertânia

Em Sertânia os resultados obtidos em época chuva foram muito superiores aos encontrados na época seca. Com máxima na chuvosa de $276,07 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ em pastagem e mínima de $128,25 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ em caatinga aberta, na época chuvosa a máxima foi em caatinga densa com $29,01 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e mínima em pastagem com $8,86 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, na Figura 9 demonstrada abaixo.

Condições climáticas podem apresentar relação com a maior emissão de CO_2 nestas parcelas já que existiu ocorrência de chuva na noite anterior e no dia da coleta, promovendo assim uma adição de água ao solo e intensificando a atividade microbiana dele. Já na época seca as temperaturas apresentaram valores que alcançaram seus $48,76^\circ\text{C}$ o que implica em uma clara diminuição da umidade do solo que chegou a 0,24% seu menor valor medido neste município.

Figura 9: Emissões de CO_2 em Sertânia.



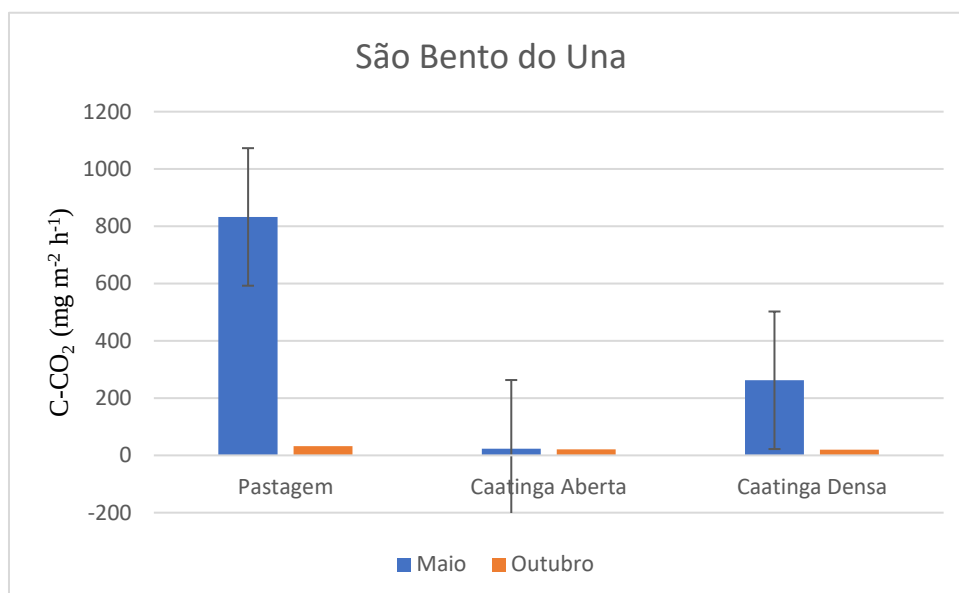
4.3.5. São Bento do Una

Nas parcelas de São Bento do Una ocorreu chuva no dia anterior e no próprio dia da coleta, chuva com volume expressivo, com precipitação média para o mês de maio sendo de 73,7 mm. Neste sentido, a variável da umidade e temperatura foram semelhantes nos diferentes usos do solo.

No período seco, a precipitação do mês de outubro se encontrou por volta de 2,1 mm, e temperaturas de solo com variação de aproximadamente 8 °C se comparadas com a época chuvosa, esse aumento nas temperaturas e ausência de ocorrência de chuvas pode estar associado aos menores valores encontrados na época seca, dados de emissão despostos abaixo na figura 10.

As maiores emissões quantificadas foi na pastagem nas duas épocas de coleta. Na época chuvosa foi quantificado na pastagem com valor de 832,54 mg m⁻² h⁻¹. Na época seca o valor máximo encontrado foi de 32,51 mg m⁻² h⁻¹ em pastagem, e a menor emissão foi na caatinga densa com valor de 19,39 mg m⁻² h⁻¹.

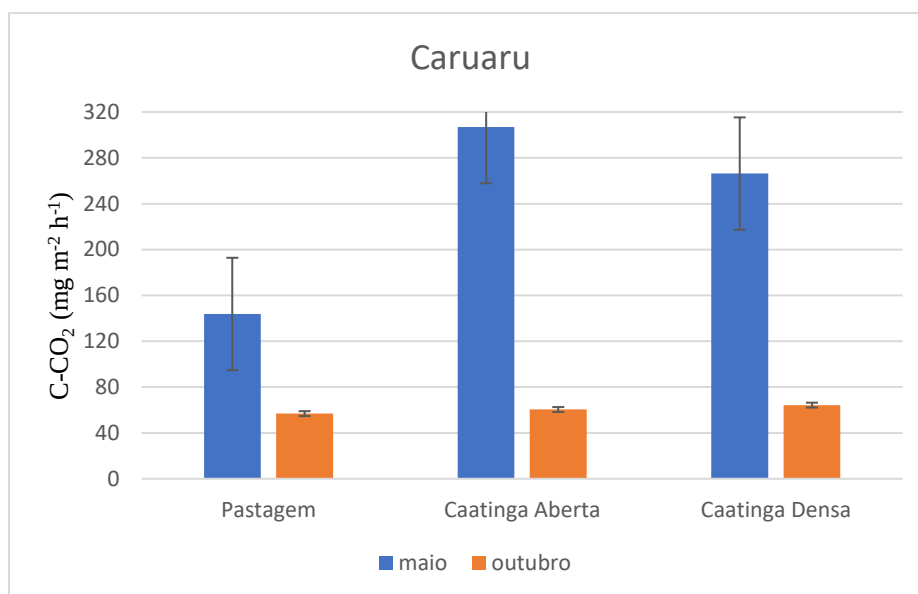
Figura 10: Emissões de CO₂ em São Bento do Una.



4.3.6. Caruaru

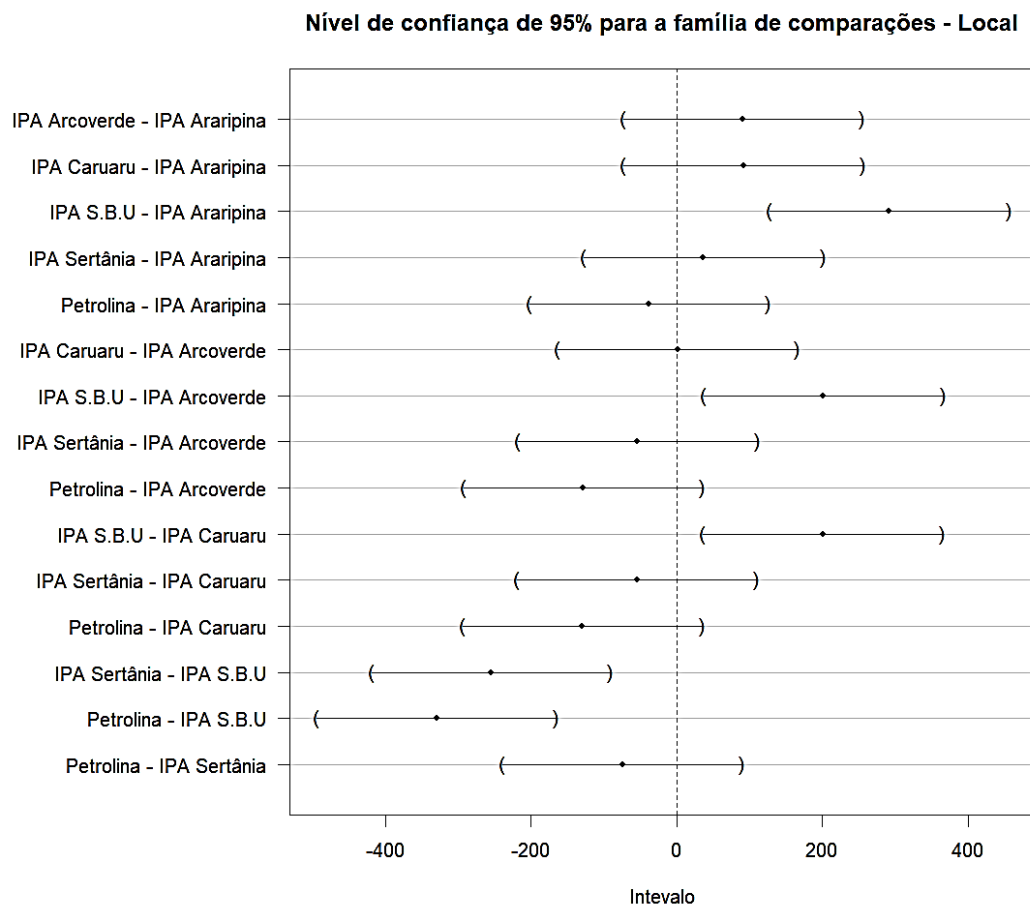
No município de Caruaru apresentou máxima de emissão na época chuvosa em caatinga aberta de $306,92 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, em caatinga densa de $266,29 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e menor emissão em pastagem $143,79 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, esse fato pode estar relacionado a umidade que foi maior na caatinga densa e caatinga aberta (Figura 11). Na época seca a máxima foi de $64,25 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ em caatinga densa e o menor valor foi de $56,84 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ em pastagem, podendo estar relacionado com a umidade já que a caatinga apresentou a maior umidade do solo em relação aos usos do solo.

Figura 11: Emissões de CO_2 em Caruaru.



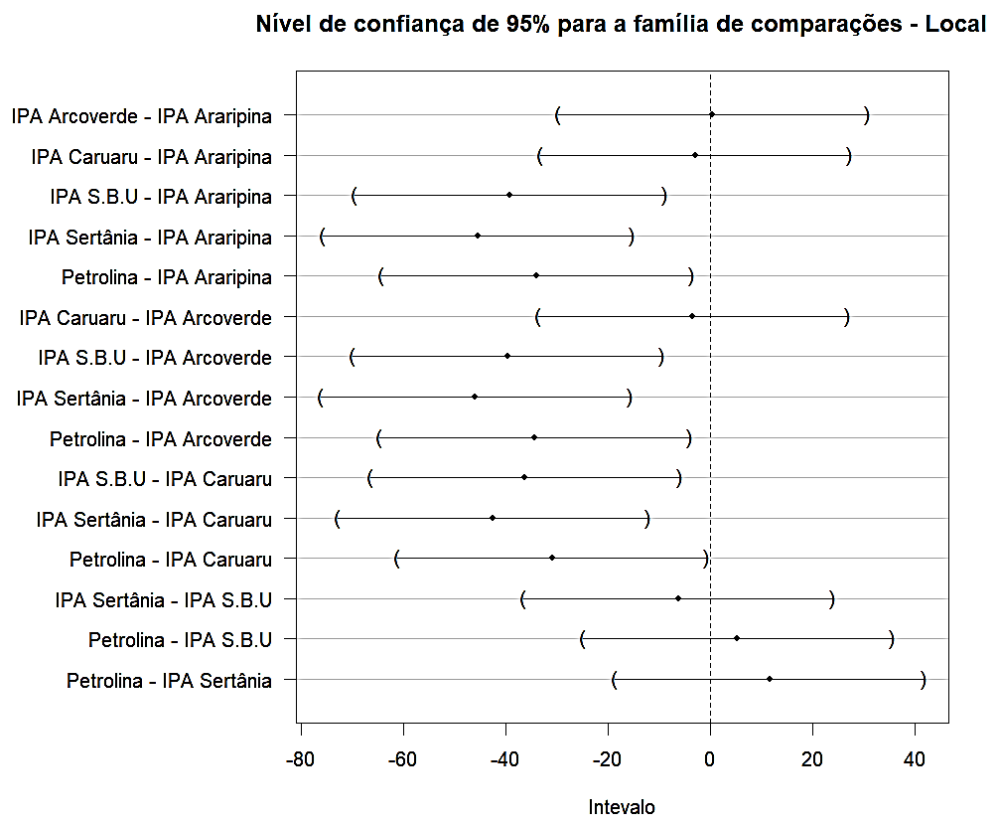
Com as análises estatísticas realizadas é possível perceber, na figura 12 abaixo, que a relação entre os locais durante a época chuvosa mostrou que a diferença significativa aconteceu entre São Bento do Una e Araripina ($P = <0,001$), São Bento do Una e Arcoverde ($P = 0,00744$), São Bento do Una e Caruaru ($P = 0,00788$), Sertânia e São Bento do Una ($P = <0,001$), Petrolina e São Bento do Una ($P = <0,001$).

Figura 12: Teste de Tukey aplicado nas emissões de CO₂ em época chuvosa comparando com o local.



Já para as emissões de CO₂ na época seca as análises estatísticas apresentaram um comportamento semelhante onde as diferenças significativas mais visíveis ocorreram entre São Bento do Una e Araripina ($P= 0,00377$), Sertânia e Araripina ($P= <0,001$), Petrolina e Araripina ($P= 0,01843$), São Bento do Una e Arcoverde ($P= 0,00332$), Sertânia e Arcoverde ($P= <0,001$), Petrolina e Arcoverde ($P= 0,01626$), São Bento do Una e Caruaru ($P= 0,00968$), Sertânia e Caruaru ($P= 0,00131$), Petrolina e Caruaru ($P= 0,04142$) (Figura 13).

Figura 13: Teste de Tukey aplicado nas emissões de CO₂ em época seca comparando com o local.

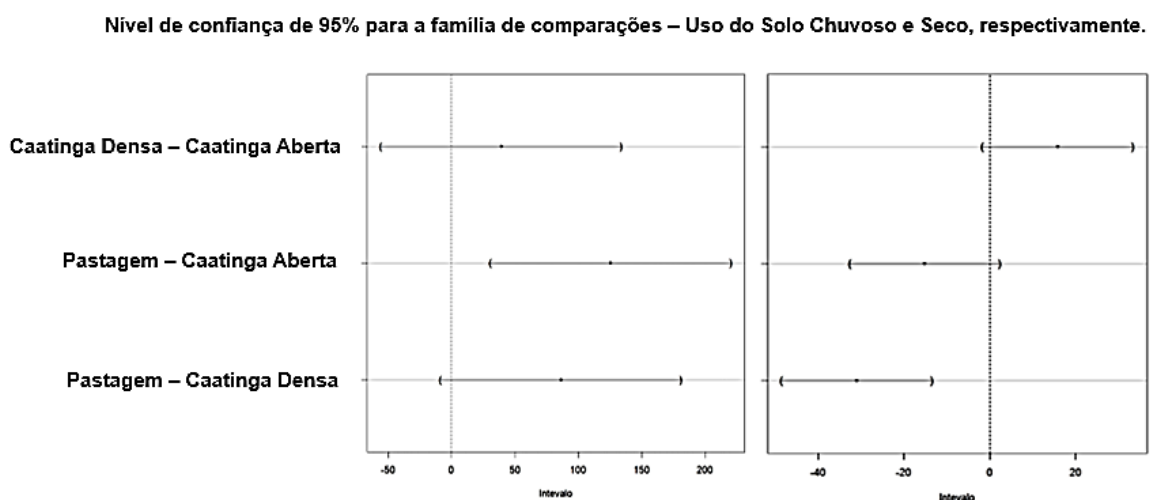


Em relação a mudança de uso do solo, a análise estatística entre emissões de CO₂ e Uso do Solo demonstrou que o uso do solo que mais apresentou diferenças estatística ocorreu entre pastagem e caatinga aberta ($P= 0,00619$) no período chuvoso. Na época seca foi possível identificar que as diferenças significativas mais específicas ocorreram nas coberturas vegetais da pastagem e caatinga densa ($P= 0,000166$) (Figura 14).

Essa dinâmica ocorre pela ação antrópica em que proporciona alteração nos atributos do solo como temperatura, umidade, diminuição na cobertura do solo, deixando a superfície do solo exposta diretamente a radiação solar, influenciando diretamente nos processos microbiológicos e de ciclagem de nutrientes alterando as taxas de respiração do solo, resultando em maiores e/ou menores emissões de CO₂.

A conversão de florestas em terras cultivadas geralmente provoca grandes emissões de GEE tanto em curto espaço de tempo, devido à conclusão da biomassa florestal, mas também ao longo dos anos seguintes, devido à decomposição da matéria orgânica do solo (DON et al., 2011).

Figura 14: Teste de Tukey aplicado nas emissões de CO₂ em época chuvosa comparando entre o uso do solo.



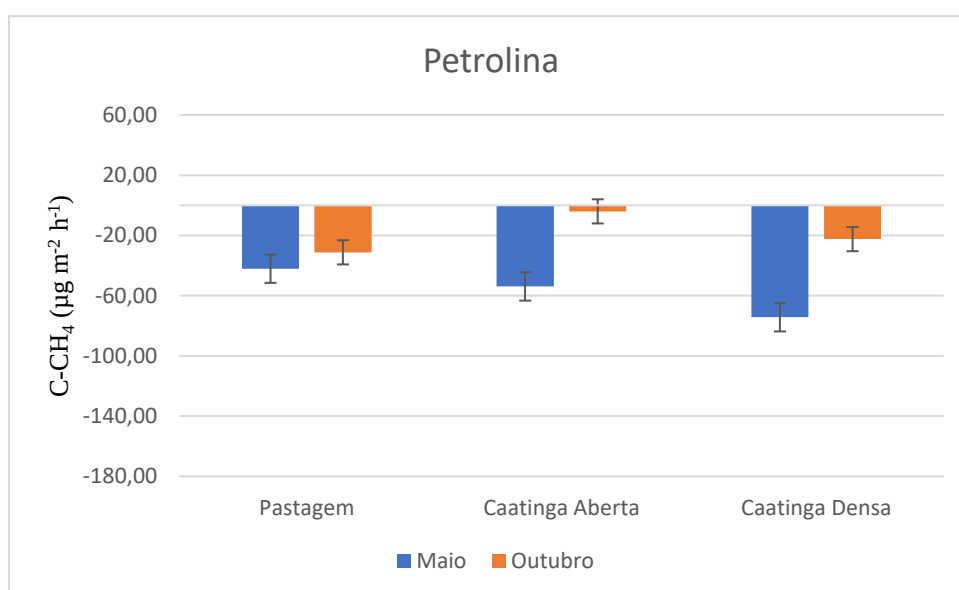
4.4. EMISSÕES DE CH₄

4.4.1. Petrolina

Os valores de CH₄ em Petrolina apresentaram valores em um total negativos para esta cidade, onde os valores mais expressivos foram em caatinga densa com valor de -74,33 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ na estação chuvosa e os menos expressivos foi em caatinga aberta na estação seca -4,01 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, que pode ser visualizada na figura 15 abaixo.

Estudos como o de Carmo (2012) vem apontando que os solos das florestas tropicais secas podem se comportar como sequestradores de CH₄, em especial nas épocas de seca que é o momento no qual a umidade se encontra baixa e as bactérias metanotróficas passam a consumir o CH₄ atmosférico como uma fonte de carbono.

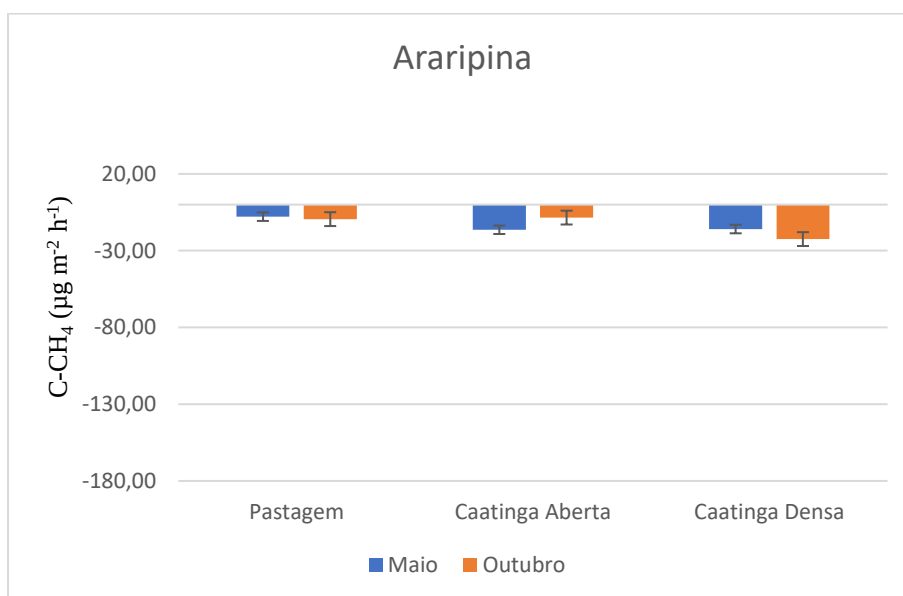
Figura 15: Emissões de CH₄ em Petrolina.



4.4.2. Araripina

Foram quantificados em Araripina apenas valores negativos como visto na município anterior, com o valor mais expressivo em caatinga densa na época seca com valor de $-22,45 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, e o valor menos expressivo ocorrendo também em caatinga densa no valor de $-7,86 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, demonstrado na Figura 16. Os baixos valores de emissão de gases, um modo geral os solos da Caatinga não apresentaram emissões significativas de CH_4 , como relatado em estudos anteriores, podendo em alguns casos atuar como sumidouros, de modo que pode estar realizando um consumo de Metano atmosférico pelo solo (KELLER et al., 2005; MEGONIGAL e GUENTHER, 2008).

Figura 16: Emissões de CH_4 em Araripina.

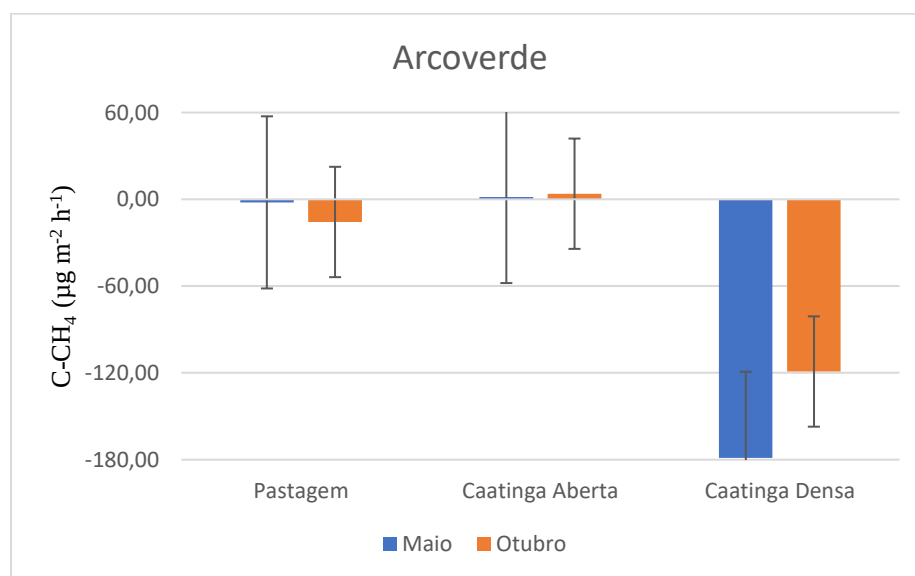


4.4.3. Arcoverde

Em Arcoverde houve emissão em caatinga aberta nas duas épocas sendo a maior na época seca com valor de $3,88 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ e menor de $1,62 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, respectivamente, já os demais usos do solo apresentaram apenas valores negativos, com os mais e menos expressivos ocorrendo em caatinga densa com valores de $-178,77 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ e $-119,05 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, valores demonstrados na Figura 17 abaixo.

Na caatinga aberta existia deposição considerável de folhagem que haviam caído das árvores e formado camada discreta de material vegetal, compondo a serrapilheira do local. Onde, essa serrapilheira que se encontra sobre o solo pode apresentar um papel importante na correlação de valores positivos de emissão de CH_4 , já que a entrada de água no solo pela chuva, favorece a decomposição de resíduos da serrapilheira, podendo ficar muito intensa a atividade microbiana o que levaria a formação de pontos de anaerobioses no solo, com isso fazendo o carbono a ser usado e levando a uma formação de CH_4 (JIA, et al., 2021). No período a ocorrência de temperaturas próximas de 30°C pode ter representado um incentivo na decomposição do material vegetal.

Figura 17: Emissões de CH_4 em Arcoverde.

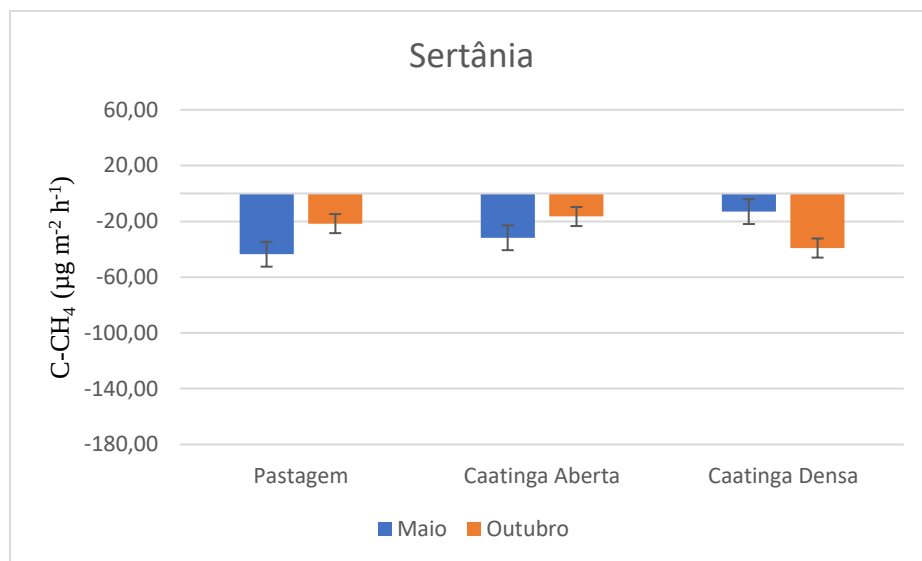


4.4.4. Sertânia

As baixas emissões mostram que a Caatinga não é um grande emissor de Metano a atmosfera e no município de Sertânia as emissões CH_4 foram todas negativas com os valores mais expressivos em caatinga densa na época chuvosa - $43,60 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ e a menos expressiva em pastagem também em época chuvosa com valor de $-13,06 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Figura 18).

Segundo Guo et al. (2013) que realizou estudo no Leste Asiático, apontou que a precipitação tem influenciado nas concentrações de CH_4 , à medida que a temperatura diminui as emissões de CH_4 tendem a diminuir, e onde a concentração global de CH_4 apresentando uma tendência decrescente.

Figura 18: Emissões de CH_4 em Sertânia.

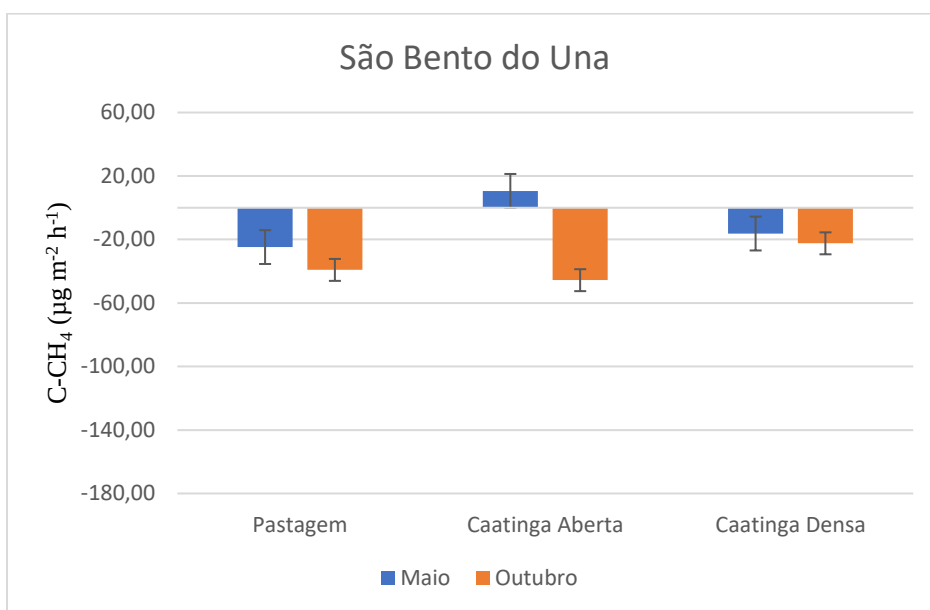


4.4.5. São Bento do Una

Em São Bento do Una houve emissão em apenas um estrato vegetal, caatinga aberta, em época chuvosa com valor de $10,63 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ enquanto todos os demais foram negativos com o mais expressivo ocorrendo em caatinga aberta na época seca de $-45,61 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Figura 19).

Podendo ser correlacionado como a situação encontradas em Arcoverde, a serrapilheira e a entrada de água podem ter representado influência para esse valor de emissão encontrado nesta cidade. Já que houve ocorrência de chuva no local próximo da data de coleta e considerando ainda que durante o mês de maio o acumulado de precipitação foi o segundo maior dentre os município com 73,77 mm.

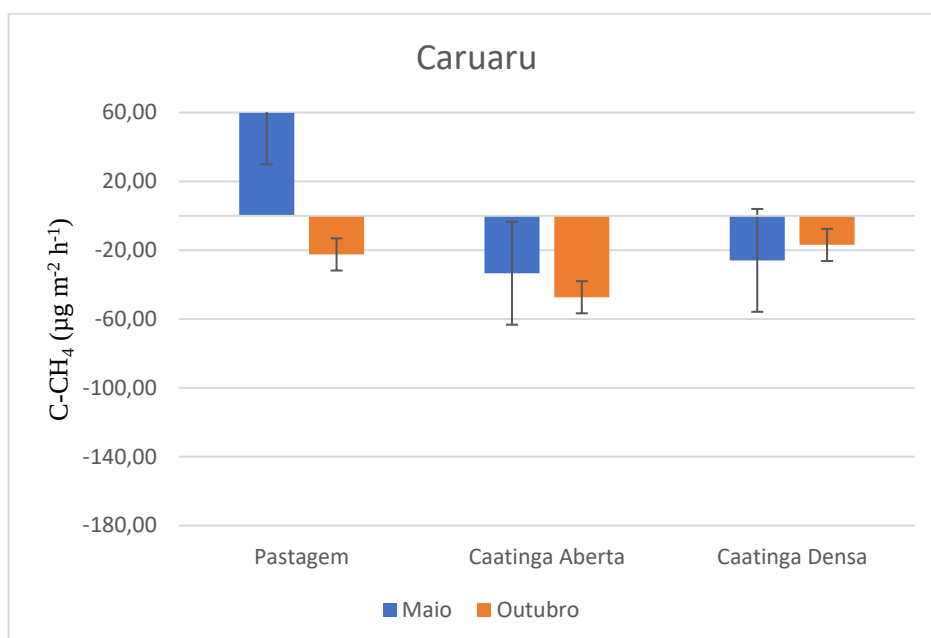
Figura 19: Emissões de CH_4 em São Bento do Una.



4.4.6. Caruaru

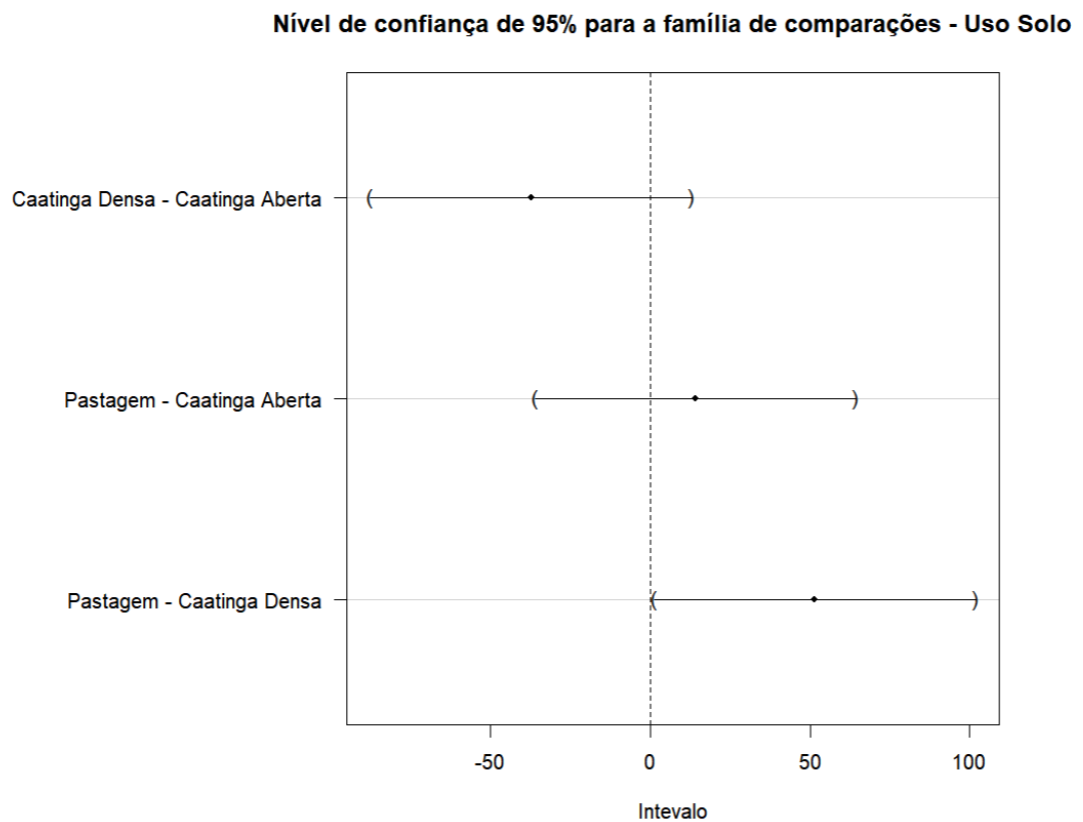
Em Caruaru houve emissão em pastagem na época chuvosa com valor de $59,78 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, enquanto nos outros usos do solo foram identificados apenas valores negativos (Figura 20). Vale ressaltar que na hora da coleta de gases na area de pastagem estava chovendo. Don et al. (2011) relata que áreas convertidas em pastagem geralmente provoca grandes emissões de GEE tanto em curto espaço de tempo, devido à combustão de biomassa florestal, mas também ao longo dos anos seguintes, devido à decomposição da materia orgânica do solo.

Figura 20: Emissões de CH_4 em Caruaru.



As diferenças estatísticas significativas encontradas no uso do solo para CH₄ entre pastagem e caatinga densa ($P= 0,0434$) (Figura 21). A dinâmica da emissão de CH₄ são pouco compreendidos, devido a complexidade dos fenômenos envolvidos nessa interação solo-atmosfera (BUSTAMANTE et al., 2009).

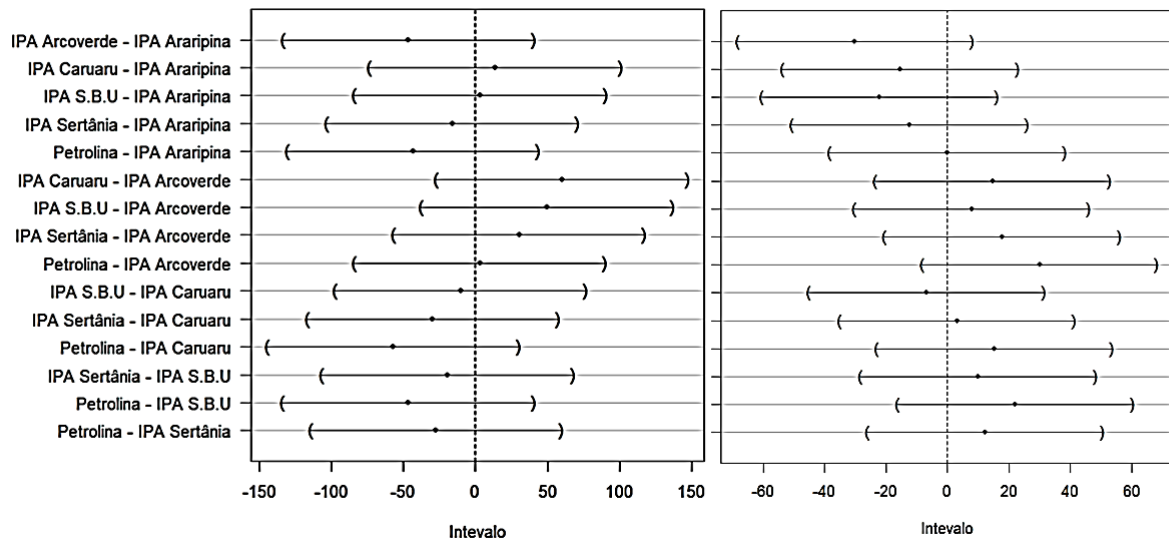
Figura 21: Teste de Tukey aplicado nas emissões de CH₄ em época chuvosa comparando entre o uso do solo.



Os solos dos municípios estudados, se mostraram como baixo emissor de CH_4 , de forma geral não emitiram metano para a atmosfera, na maioria dos casos chegando em atuarem como sumidouros de CH_4 (figura 22). Estudos mostram que solos das florestas tropicais secas geralmente se comportam como sequestradores de CH_4 (CARMO, et al., 2012; MCLAIN & MARTENS, 2006).

Figura 22: Teste de Tukey aplicado nas emissões de CH_4 em época chuvosa e seca em local.

Nível de confiança de 95% para família de comparações – Local época chuvosa e seca, respectivamente.



4.5. EMISSÕES DE N₂O

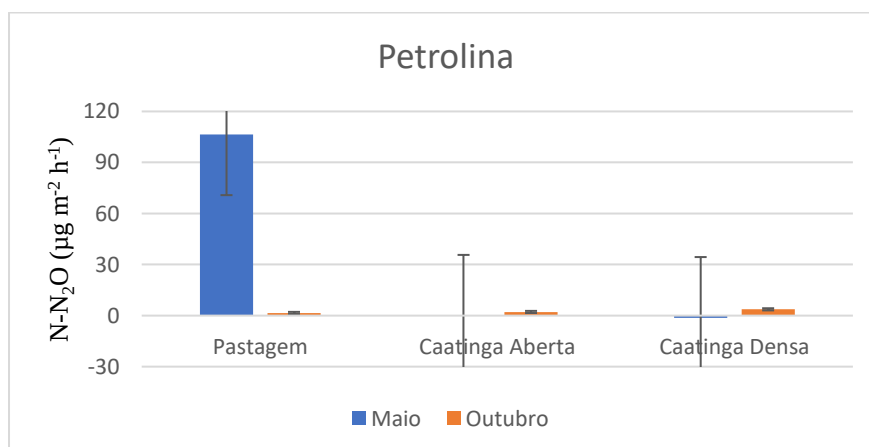
4.5.1. Petrolina

Para o N₂O em Petrolina a maior emissão em pastagem na época chuvosa com valor de 106,54 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, em dois usos do solo na época chuvosa teve ocorrência de valores negativos. Na época seca a maior emissão ocorreu em caatinga densa com valor de 3,69 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ e os menores valores ocorreram em pastagem 1,56 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ durante a época seca (Figura 23).

A temperatura e a umidade do solo são fatores que demonstram grande importância nos processos de nitrificação e desnitrificação, já que são responsáveis por determinar a atividade dos microrganismos. Para temperatura mais baixas, é demonstrado que a taxa de conversão de nitrogênio é consideravelmente pequena, apresentando aumento com o aumento da temperatura. Já para a umidade, quanto maior ela se apresentar, maior será a emissão de N₂O.

Os processos de nitrificação e desnitrificação demonstra relação com a umidade, quanto maiores forem os teores de umidade, a produção de N₂O tenderá a diminuir, com a ocorrência de alternâncias de umidade, períodos de umidade e períodos de seca, as emissões de N₂O aumentam, tendo relação com aumento da atividade microbiana, em contrapartida se os teores de umidade forem muito altos a atividade microbiana é inibida (SIGNOR & CERRI, 2013). Para Petrolina a pastagem apresentou uma alta quantidade de material vegetal sobre o solo o que pode ter influenciado em retenção mais a umidade desse solo e a faixa de temperatura ter sido adequada para produção e emissão de N₂O.

Figura 23: Emissões de N₂O em Petrolina.

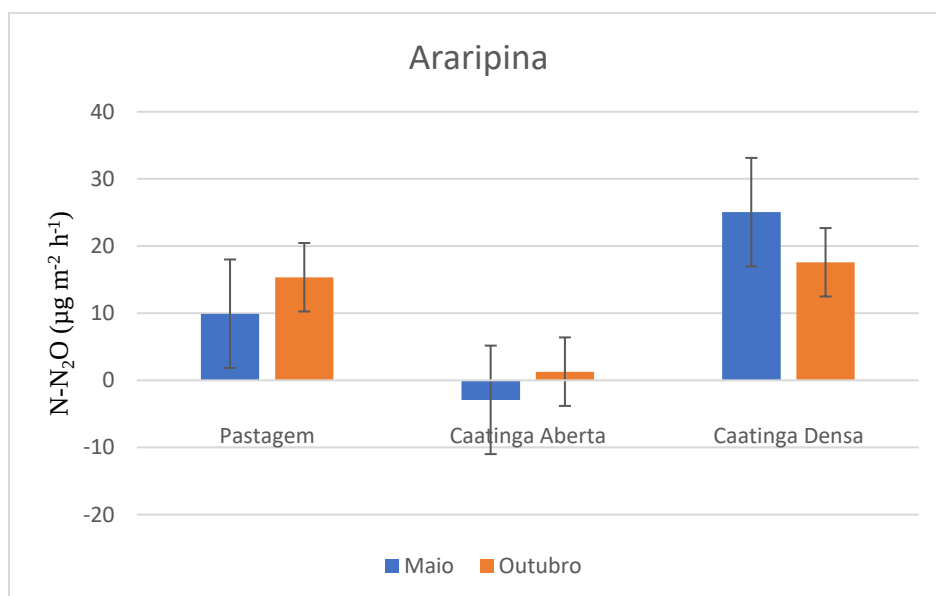


4.5.2. Araripina

As emissões ocorreram em cinco das cidades com o maior valor ocorrendo em caatinga densa com valor de $25,05 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ e menor valor ocorrendo em caatinga aberta, mas na época seca com valor de $1,29 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, demonstrado na Figura 24 abaixo. Em Araripina encontramos como solo o Latossolo que em estudo realizado por Keller et al. (2005), apresentou emissão com maiores valores na época chuvosa e emissões menores na época seca, como apresentados em caatinga densa nesta cidade.

Segundo Chapuis-Lardy (2007), o pH do solo interfere de uma forma direta na quantidade de N_2O produzido no solo, já que é um fator que pode influenciar as enzimas que fazem parte das reações de formação de N_2O no solo, já que a enzima responsável por reduzir N_2O a N_2 tem sua função diminuída em baixo pH e na presença de O_2 , desta forma, quando o pH encontra-se baixo a emissão de N_2O será maior. O pH encontrado em Araripina estava na faixa de 4, sendo o pH mais baixo entre todas os municípios estudados, podendo relacionar este fator aos maiores valores de emissão nesta cidade.

Figura 24: Emissões de N_2O em Araripina.

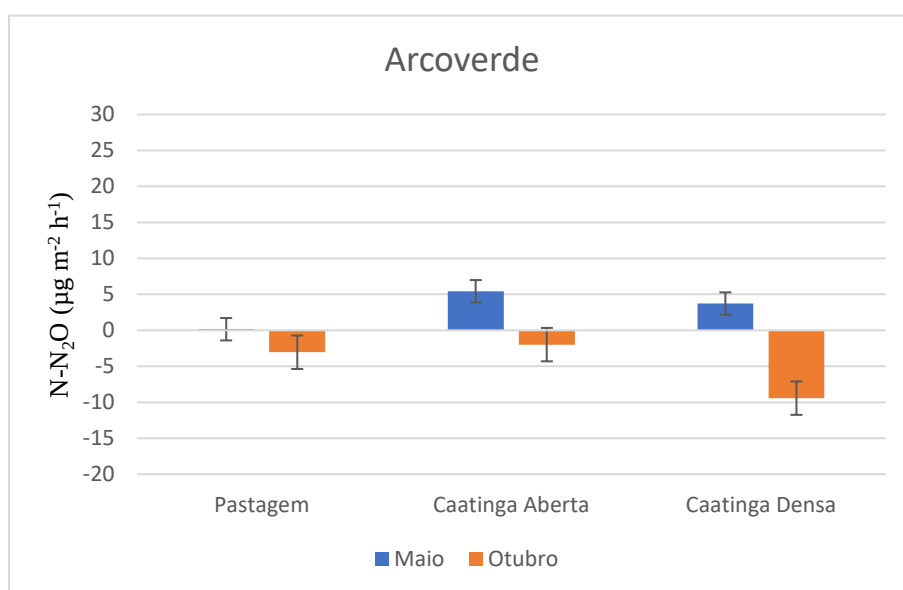


4.5.3. Arcoverde

As emissões nesta município ocorreram apenas em época chuvosa com maior valor de $5,43 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ em caatinga aberta e menor valor em $0,15 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, na (Figura 25), na época seca todos os dados foram negativos.

As emissões de N_2O em Arcoverde podem estar relacionadas com a umidade, neste município a maior umidade ocorreu em caatinga densa e caatinga aberta que foram os usos do solo que mais ocorreram emissões na época chuvosa, consequentemente o uso do solo com menor umidade ocorreu menor emissão na época chuvosa. Na época seca onde a umidade foi baixa com porcentagem menor que 4%, não ocorreram emissões. Liu et al. (2011) identificou em seu estudo que as emissões de N_2O apresentaram aumento e posteriormente diminuição com o aumento da umidade do solo.

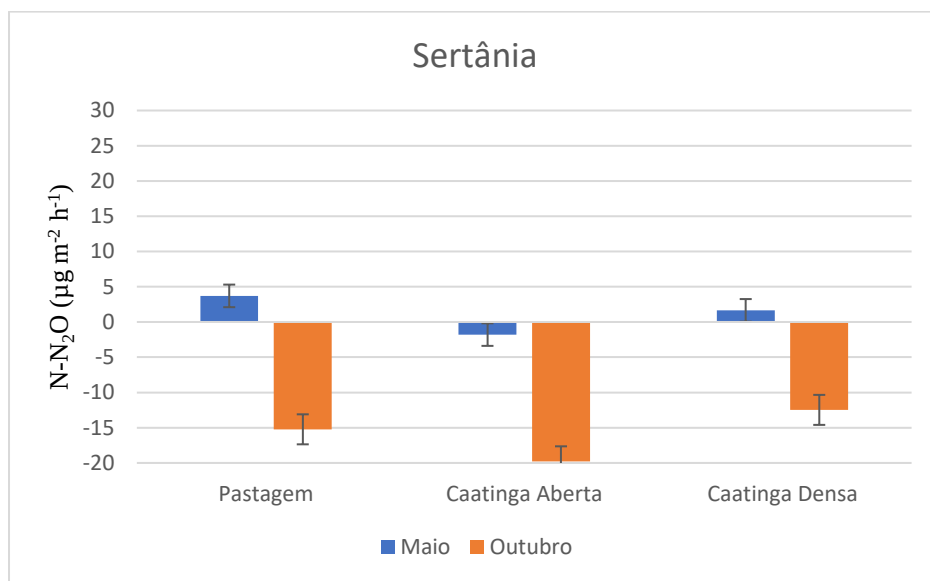
Figura 25: Emissões de N_2O em Arcoverde.



4.5.4. Sertânia

Apresenta emissão em apenas dois usos do solo em época chuvosa, com maior valor de $3,71 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ em pastagem e o menor valor de $1,65 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ em caatinga densa, os demais valores foram negativos incluindo todos da época seca (Figura 26). A pastagem e a caatinga densa apresentaram a maior temperatura dos usos do solo em época chuvosa, o que pode ter influenciado para as emissões que ocorreram, já que a temperatura pode ser relacionado com a atividade dos microrganismos. Já que em temperaturas muito baixas as taxas de conversão de nitrogênio são baixas, aumentando com o aumento da temperatura (SIGNOR & CERRI, 2013).

Figura 26: Emissões de N_2O Sertânia.

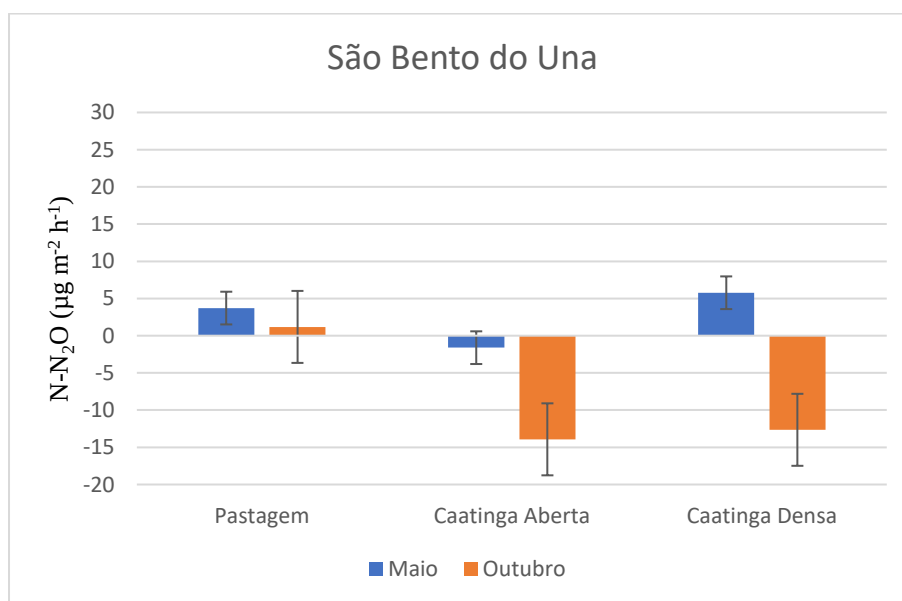


4.5.5. São Bento do Una

As emissões ocorreram em três locais sendo dois época chuvosa e um em época seca, desses valores o maior foi em caatinga densa época chuvosa, $5,77 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e menor em pastagem época seca com valor de $1,18 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, as demais apresentaram valores negativos (Figura 27).

Um fator que pode ter relação com a quantidade de N_2O que será produzida no solo e a relação C/N, já que os solos com baixa relação C/N tem predomínio de processos de mineralização do nitrogênio em relação a imobilização, o que favorece para o aumento da quantidade do nutriente disponível, podendo ser absorvido ou ficar disponível para os processos microbianos como nitrificação e desnitrificação (SIGNOR, 2010). Em São Bento do Una a relação C/N apresentou valores baixos que podem ter influenciado na emissão do N_2O .

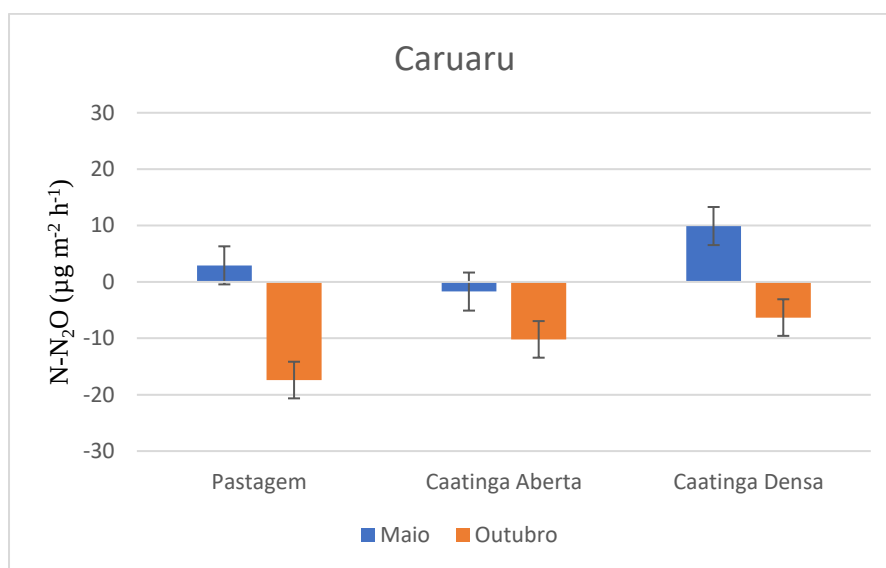
Figura 27: Emissões de N_2O em São Bento do Una.



4.5.6. Caruaru

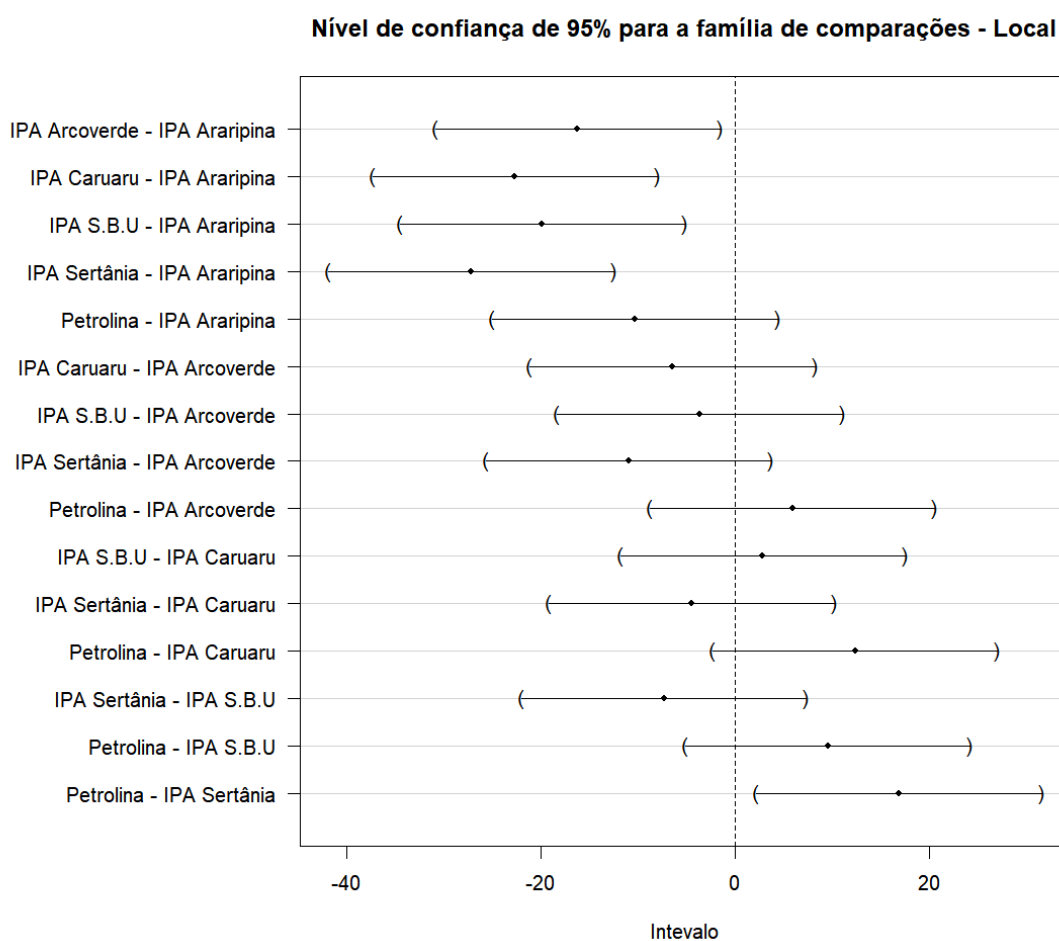
As emissões de N_2O em Caruaru só ocorreram em dois usos do solo na época chuvosa sendo a maior em caatinga densa, $9,91 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, em pastagem o valor foi de $2,94 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, e em caatinga aberta o valor foi de $-1,71 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Figura 28). Vale ressaltar que na hora da coleta da caatinga densa, essa emissão pode estar correlacionado com esse evento, já que na hora da coleta da caatinga aberta não tivemos nenhuma forma de precipitação. Burtebach – Bahl et al., (2013) relata que a emissão de N_2O pode estar relacionada a diversos fatores ambientais, incluindo a umidade do solo, uma vez que é responsável pela regulação do oxigênio disponível para os microorganismos presentes no substrato.

Figura 28: Emissões de N_2O em Caruaru.



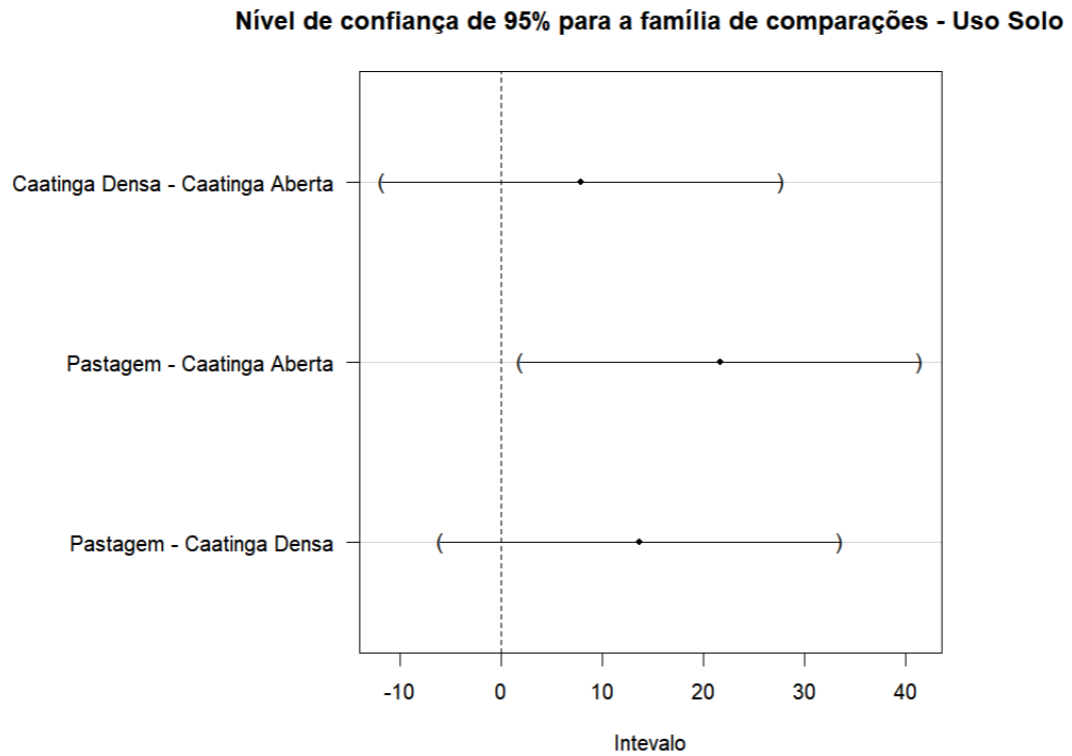
Para época chuvosa não foi identificado diferenças significativas para o local e o N_2O em época chuvosa. Na época seca foi possível identificar que houve diferenças significativas quanto ao local nas cidades de Arcoverde e Araripina ($P= 0,02135$), Caruaru e Araripina ($P= <0,001$), São Bento do Una e Araripina ($P= 0,00213$), Sertânia e Araripina ($P= <0,001$), Petrolina e Sertânia ($P= 0,01475$) (Figura 29).

Figura 29: Teste de Tukey aplicado nas emissões de N_2O em época seca comparando com o local.



Para N_2O foi identificado diferenças significativas no uso do solo entre a pastagem e a caatinga aberta ($P= 0,0287$), para época chuvosa (Figura 30).

Figura 30: Teste de Tukey aplicado nas emissões de N_2O em época chuvosa comparando com o uso do solo.



4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As diferenças edafoclimáticas tiveram influência nos resultados das emissões para os gases CO₂, N₂O e CH₄. A pastagem e caatinga densa interferem mais na dinâmica das emissões de CO₂ e CH₄, e para o N₂O foi entre pastagem e caatinga aberta. As características edafoclimáticas encontradas nos municípios são diferentes entre si, o que pode justificar as diferenças de encontradas nas emissões entre as cidades. Das emissões de CO₂ quantificadas o maior resultado foi de 832,54 mg m⁻² h⁻¹ que ocorreu em pastagem. As emissões de CH₄ o maior valor foi de 59,78 µg m⁻² h⁻¹ em pastagem, mas de uma forma geral as áreas apresentaram comportamento que pode ser associado a consumo deste gás. E o N₂O apresentou o maior valor de 106,54 µg m⁻² h⁻¹ em pastagem em época chuvosa, em época seca as emissões foram menores.

As condições climáticas das regiões semiáridas impactam diretamente na atividade dos microorganismos e emissões dos GEE. A Caatinga apresentou potencial como sumidouro de CH₄, o que demonstra a importância de realização de projetos afim de agregar mais conhecimento sobre o comportamento dos GEE neste Bioma, que de forma global é extremamente importante, já que as áreas de semiárido global são expressivas.

REFERÊNCIAS

- ABREU, N. L. **Mudanças De Uso Da Terra E Emissão De Gases De Efeito Estufa Na Amazônia Legal**. Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 100p. 2023.
- AGOSTINETTO, D.; FLECK, N. G.; RIZZARDI, M. A.; JUNIOR- BALBINOT, A. A. Potencial De Emissão De Metano Em Lavouras De Arroz Irrigado. **Ciência Rural**, v.32, n.6, p.1073-1081, 2002.
- ALMARAZ, M.; GROFFMAN, P. M.; SILVER, W.L.; HALL, S. J.; LIN, Y.; O'CONNELL, C.; PORDER, S. Dinitrogen emissions dominate nitrogen gas emissions from soils with low oxygen availability in a moist tropical forest. **Biogeosciences**, v. 128, 2023.
- ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. Tese Doutorado. São Paulo: ESALQ/USP. 105 p., 2008.
- ALMEIDA, R. F.; NAVES, E. R.; SILVEIRA, C. H.; WENDLING, B. Emissão de óxido nitroso em solos com diferentes usos e manejos: Uma revisão. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.8, n.2, p. 441-461, 2015.
- ALVES, J. J. A.; ARAÚJO, M. A.; NASCIMENTO, S. S.; Degradação da Caatinga: Uma Investigação Ecogeográfica. **Revista Caatinga**, vol. 22, n. 3, 2009.
- ARAÚJO, C. S. F.; SOUSA, A. N. Estudo do processo de desertificação na caatinga: uma proposta de educação ambiental. **Ciência & Educação**, Bauru, v.17, n.4, p. 975-986, 2011.
- ARAÚJO, K. D.; PARENTE, H. N.; CORREIA, K. G.; ANDRADE, A. P.; DANTAS, R. T.; PEREIRA, W. E. Emissões de CO₂ sob área de caatinga no semi-árido da Paraíba. **Geoambiente on-line**. N° 10, 2008.
- ARAÚJO FILHO, J. A. **Manejo pastoril sustentável da caatinga**. Recife: Projeto Dom Helder Câmara, p. 200, 2013.
- ARAÚJO-FILHO, J. A.; CRISPIM, S. M. A. Pastoreio combinado de bovinos, caprinos e ovinos em áreas de caatinga no nordeste do Brasil. I Conferência Virtual Global sobre Produção Orgânica de Bovinos de Corte, **Embrapa**, 2002.
- BALDOTTO, M. A.; VIEIRA, E. M.; SOUZA, D. O.; BALDOTTO, L. E. B. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. **Rev.Ceres**, v. 62, n.3, p. 301-309, 2015.
- BARTON, L.; MURPHY, D. V.; BUTTERBACH-BAHL, K. Influence of crop rotation and liming on greenhouse gas emissions from a semi-arid soil. Agriculture, **Ecosystems and Environment**, 167, 23–32, 2013.

BAYER, C.; GOMES, J.; VIEIRA, F. C. B.; ZANATTA, J. A.; PICCOLO, M. C.; DIECKOW, J. Methane emission from soil under long-term no-till cropping systems. **Soil & Tillage Research**, 2012.

BESSEN, M. R.; RIBEIRO, R. H.; MONTEIRO, A. N. T. R.; IWASAKI, G. S.; PIVA, J. T. Práticas conservacionistas do solo e emissão de gases do efeito estufa no Brasil. **Scientia Agropecuaria**, vol. 9, nº 3, 2018.

Blackie, R.; Baldauf, C.; Gautier, D.; Gumbo, D.; Kassa, H.; Parthasarathy, N.; Paumgarten, F.; Sola, P.; Pulla, S.; Waeber, P.; Sunderland, T. As Florestas Tropicais Secas: O estado de conhecimento global e recomendações para futuras pesquisas. **Centro de Pesquisa Florestal Internacional (CIFOR)**, 2014.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Coordenação Geral do Clima. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 5. **Ed. Brasília**, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2020.

BREMNER, J.M. & MULVANEY, C.S. Nitrogen total. In: PAGE, A.L., ed. Methods of soil analysis, part 2. 2.ed. Madison, **Soil Science Society of America**, 1982. p.595-624. CARNEIRO, J. L.; LIMA, T. N. S.; BEZERRA, D. K. L.; DANTAS, R. L. Cactáceas da Caatinga: Estratégias de Agregação de Valor como Meio de Conservação da sua Biodiversidade. **Terra - Mudanças Climáticas e Biodiversidade**, 2019.

BUTTERBACH-BAHL, K.; BAGGS, E. M.; DANNENMANN, M.; ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, R. K. S. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, v. 368, n. 1621, 2013-07-05, 2013.

BUSTAMANTE, M. M. C.; KELLER, M.; SILVA, D. A. **Fontes e sumidouros de gases traço na Amazônia e Cerrado**. Amazonia and Global Change Geophysical Monograph Series 186, 2009.

CARMO, J. B.; SOUSA-NETO, E. R.; DUARTE-NETO, P. J.; OMETTO, J. P. H. B.; MARTINELLI, L. A. Conversion of the coastal Atlantic forest to pasture: Consequences for the nitrogen cycle and soil greenhouse gas emissions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, vol. 148, p. 37-43, 2012.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; MARX LEANDRO NAVES SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**, 34:277-289, 2010.

CERRI, C. C.; MOREIRA, C. S.; ALVES, P. A.; TOLEDO, F. H. R. B.; CASTIGIONI, B. A.; RODRIGUES, G. A. A.; CERRI, D. G. P.; CERRI, C. E. P.; TEIXEIRA, A. A.; CANDIANO, C. A. C.; REIS, M. R.; D'ALESSANDRO, S. C.; TURELLO, L. Estoques de Carbono e Nitrogênio no Solo Devido a Mudança do Uso da Terra em Áreas de Cultivo de Café em Minas Gerais. **Coffee Science**, v. 12, n. 1, p. 30 - 41, 2017.

CHAPUIS-LARDY, L.; WRAGE, N.; METAY, A.; CHOTTE, J.; BERNOUX, M. Soil, a sink for? A review. **Global Change Biology**, v. 13, n. 1, p. 1-17, 2007.

COSTA, F. S.; GOMES, J.; BAYER, C. MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação das emissões de gases de efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, v.36, n.2, p. 693-700, 2006.

DAI, Z.; YU, M.; CHEN, H.; ZHAO, H.; HUANG, Y.; SU, W.; XIA, F.; CHANG, S. X.; BROOKES, P. C.; DAHLGREN, R. A.; XU, J. Elevated temperature shifts soil N cycling from microbial immobilization to enhanced mineralization, nitrification and denitrification across global terrestrial ecosystems. **Global Change Biology**, 2020.

DAVID, C.; LEMKE, R.; HELGASON, W.; FARREL, R. E. Current inventory approach overestimates the effect of irrigated crop management on soil-derived greenhouse gas emissions in the semi-arid Canadian Prairies. **Agricultural Water Management**, 208, 19–32, 2018.

DON, A.; SCHUMACHER, J.; & FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks—a meta-analysis. **Global Change Biology**, 17(4), 1658-1670, 2011.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de análise química dos solos, plantas e fertilizantes. **Embrapa Solos**, 370p. 1999.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Brasília, DF: **Embrapa Solos**, 627p. 2009.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Brasília, DF: **Embrapa Solos**, 2012.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Bioma Caatinga: oportunidades e desafios de pesquisa para o desenvolvimento sustentável. **Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE)**, p. 65-80. 2019.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Protocolo para medição de fluxos de gases de efeito estufa do solo. **Embrapa Florestas**, 2014.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Estimativa da emissão de gases de efeito estufa provenientes de rebanhos de caprinos e ovinos no bioma Caatinga, Semiárido Brasileiro, em cenários de atuação do FIDA. **Embrapa Caprinos e Ovinos**, 2022.

FERNANDES, M. F.; QUEIROZ, L. P. Vegetação e flora da Caatinga. **Ciência e cultura**, vol.70 (4), p.51-56, 2018.

FONSECA, C. R.; ANTONGIOVANNI, M.; MATSUMOTO, M.; BERNARD, E.; VENTICINQUE, E. M. Oportunidades de conservação na Caatinga, **Ciência e cultura**, Vol.70 (4), p.44-51, 2018.

GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. Methods

of soil analysis. Physical methods. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, Part 4., p.255-293, 2002.

GIULIETTI, A. M.; BOCAGE NETA, A. L.; CASTRO, A. A. J. F.; GAMARA-ROJAS, C. F. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; VIRGÍNIO, J. F.; QUEIROZ, L. P.; FIQUEIREDO, M.A.; RODAL, M. J. N.; BARBOSA, M. R. V.; HARLEY, R. M. Diagnóstico da vegetação nativa do bioma Caatinga. Pp. 47-90. In: SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; FONSECA, M. T.; LINS, L. V (Orgs.). Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação. Brasília, **Ministério do Meio Ambiente**, p. 47-90, 2004.

GOMES, S. O., LIMA, V. N., CANDEIAS, A. L. B., & SILVA, R. R. (2017). Uso e cobertura dos solos de Petrolândia utilizando MAPBIOMAS. In Anais do XXVII **Congresso Brasileiro de Cartografia e do XXVI Exposicarta**, Rio de Janeiro, RJ (pp. 805-808).

GUO, M.; WANG, X-F.; LI, J.; YI, K-P.; ZHONG, G-S.; WANG, H-M.; TANI, H. Spatial distribution of greenhouse gas concentrations in arid and semi-arid regions: A case study in East Asia. **Journal of Arid Environments**, 91, 119-128, 2013.

GUSMÃO, L. F. P.; QUEIROZ, L. P.; QUIJANO, F. R. B.; JUNCÁ, F. A.; OLIVEIRA, R. P.; BASEIA, I. G. Caatinga: Diversidade na adversidade do Semiárido brasileiro. In: PEIXOTO, A. L.; LUZ, J. R. P.; BRITO, M. A. Conhecendo a biodiversidade. **Brasília: MCTIC/CNPq/PPBio**, p. 101-111, 2016.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). Methods of soil analysis. **Soil Science Society of America Journal**, pt. 4, p.201-225, 2002.

GUOJU, X.; YANBIN, H.; QIANG, Z.; JING, W.; MING, L. Impact of cultivation on soil organic carbon and carbon sequestration potential in semiarid regions of China. **Soil Use Manage**, 36:83–92, 2020.

HENRIQUES, F. S. O futuro incerto das florestas tropicais. **Revista de Ciências Agrárias**, v.33, n.2, 2010.

JUNIOR-LIMA, R. N. C.; OLIVEIRA, M. M.; CORRÊA, S. M.; SARAIVA, V. B. Caracterização da Emissão de Gases de Efeito Estufa do Lixão em Cabo Frio, RJ. **Revista Internacional de Ciências**, v. 12, n 01, p. 26 – 40, 2022.

JIA, G.; YANG, Q.; YANG, H.; JIANG, Y.; LIU, W.; WU, T.; MAO, H.; SU, T.; TAN, Z.; WANG, X.; LI, J. . Non-microbial methane emissions from tropical rainforest soils under different conditions. **PLoS ONE** 16(8): e0255725. 2021.

LAL, R. Agricultural activities and the global carbon cycle. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 70, p. 103–116, 2004.

LIMA, B. G. **Caatinga: espécies lenhosas e herbáceas**. Mossoró: UFERSA, p. 316, 2012.

LIMA, F. F.; DUDA, G. P.; MEDEIROS, E.; MARQUES, M. C.; COSTA, D. P.; SANTOS,

C. H. U. J. Land use regulates microbial biomass and activity in highly degraded soil from Brazilian dry tropical forest. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 69:9, 1519-1534, 2022.

LIMA, J. R. S.; SOUZA, R. M. S.; SANTOS, E. S.; SOUZA, E. S.; OLIVEIRA, J. E. S.; MEDEIROS, E. V.; PESSOA, L. G. M.; ANTONINO, A. C. D.; HAMMECKER, C. Impacts of land-use changes on soil respiration in the semi-arid region of Brazil. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, 44, 2020.

LIU, C., WANG, K., MENG, S., ZHENG, X., ZHOU, Z., HAN, S., ... & YANG, Z. Effects of irrigation, fertilization and crop straw management on nitrous oxide and nitric oxide emissions from a wheat–maize rotation field in northern China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 140(1-2), 226-233, 2011.

KARHU, K.; AUFFRET, M. D.; DUNGAIT, J. A. J.; HOPKINS, D. W.; PROSSER, J. J.; SINGH, B. K.; SUBKE, J. A.; WOOKEV, P. A.; ÅGREN, G. I.; SEBASTIÀ, M. T.; GOURIVEAU, F.; BERGKYIST, G.; MEIR, P.; NOTTINGHAM, A. T.; SALINAS, N.; HARTLEY, I. P. Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. **Nature**, v. 513, n. 7516, p. 81-84, 2014.

KELLER, M.; VARNER, R.; DIAS, J. D.; SILVA, H.; CRILL, P.; OLIVEIRA- JUNIOR, R. C.; ASNER, G. P. Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, nitric oxide, methane, and carbon dioxide in logged and undisturbed forest in the Tapajos National Forest, Brazil. **Earth Interactions**, v. 9, n. 23, p. 1-28, 2005. ISSN 1087-3562.

MAIA, J. M.; SOUSA, V. F. O.; LIRA, E. H. A.; LUCENA, A. M. A. Motivações socioeconômicas para a conservação e exploração sustentável do bioma Caatinga. **Desenvolv. Meio Ambiente**, v. 41, p. 295-310, 2017.

MCHUGH, T. A.; MORRISSEY, E. M.; REED, S. C.; HUNGATE, B. A.; SCHWARTZ, E. Water from air: an overlooked source of moisture in arid and semiarid regions. **Scientific reports**, v. 5, 2015.

MCLAIN, J. E.; MARTENS, D. A. Moisture controls on trace gas fluxes in semiarid riparian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 367-377, 2006.

MCDANIEL, M. D.; SAHA, D.; DUMONT, M. G.; HERNANDEZ, M.; ADAMS, M. A. The Effect of Land-Use Change on Soil CH₄ and N₂O Fluxes: A Global Meta-Analysis. **Ecosystems**, 22: 1424–1443, 2019.

MEGONIGAL, J. P.; GUENTHER, A. B. Methane emissions from upland forest soils and vegetation. **Tree physiology**, v. 28, n. 4, p. 491-498, 2008. ISSN 0829-318X.

MENEZES, R. S. C.; SALES, A. T.; PRIMO, D. C.; ALBUQUERQUE, E. R. G. M.; JESUS, K. N.; PAREYN, F. G. C.; SANTANA, M. S.; SANTOS, U. J.; MARTINS, J. C. R.; ALTHOFF, T. D.; NASCIMENTO, D. M.; GOUVEIA, R. F.; FERNANDES, M. M.; LOUREIRO, D. C.; ARAÚJO-FILHO, J. C.; GIONGO, V.; DUDA, G. P.; ALVES, B. J. R.; IVO, W. M. P. M.; ANDRADE, E. M.; PINTO, A. S.; SAMPAIO, E. V. S. B. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. *Geoderma*, 2021.

NETO, M. S.; PICCOLO, M. C.; COSTA JUNIOR, C.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Emissão de gases do efeito estufa em diferentes usos da terra no Bioma Cerrado. **R. Bras.Ci. Solo**, 35:63-76, 2011.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Emissões do setor de agropecuária: 2018 documento de análise, período 1970 – 2016. 2018.

OBSERVATORIO DO CLIMA. Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 - 2021. 2023.

OERTEL, C.; MATSCHULLAT, J.; ZURBA, K.; ZIMMERMANN, F.; ERASMI, S. Greenhouse gas emissions from soils—A review. **Chemie der Erde**, 2016.

POTENZA, R. F.; QUINTANA, G. O.; CARDOSO, A. M.; TSAI, D. S.; CREMER, M. S.; SILVA, F. B.; CARVALHO, K.; COLUNA, I.; SHIMBO, J.; SILVA, C.; SOUZA, E.; ZIMBRES, B.; ALENCAR, A.; ANGELO, C.; AZEVEDO, T. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020. **SEEG**, 2021.

QUEIROZ, L. P. Flowering plants of the Brazilian semi-arid. In: QUEIROZ, L. P.; RAPINI, A.; GIULIETTI, A. M. (Ed.). Towards greater knowledge of the Brazilian semi-arid biodiversity. **Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia**, p. 49-53, 2009.

REIS, A. P. L.; SENA SILVA, M. A. F.; MAIA, A. L. V.; SILVA JÚNIOR, J. M. T.; & DE SABÓIA, L. R. M. Levantamento florístico das espécies nativas da caatinga do estado do Ceará. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, 4(3), 3060-3078, 2021.

RIBEIRO, M. R.; SAMPAIO, E. V. S. B.; GALINDO, I. C. L. Os solos e o processo de desertificação no semiárido brasileiro. In: RIBEIRO, M. R.; NASCIMENTO, C. W. A.; RIBEIRO FILHO, M. R.; CANTALICE, J. R.B. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 6, p. 414-459, 2009.

RIBEIRO, K.; SOUSA-NETO, E. R.; CARVALHO-JUNIOR, J. A.; LIMA, J. R. S.; MENEZES, R. S. C.; DUARTE-NETO, P. J.; GUERRA, G. S.; OMETTO, J. P. H. B. Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. **Science of The Total Environment**, v. 571, p. 1048-1057, 2016.

RIBEIRO, K. **Mudança no Uso do Solo e Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em Diferentes Coberturas Vegetais na Caatinga Brasileira**. 59 f. Dissertação Mestrado, Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017.

RUGGIERI, A. C.; CARDOSO, A. S. Balanço de carbono em sistemas de produção animal: fontes de emissão e opções de mitigação. **Archivos Latinoamericanos de Producción Animal**. Vol. 25(1-2): 37 – 44, 2017.

SAMPAIO, E. V. S. B. Características e potencialidades. In: GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga. 2º ed. **Brasília: Serviço Floresta**

Brasileiro, p. 29-42, 2010.

SCHRÖDER, J. M.; RODRÍGUEZ, L. P. Á.; GÜNTER, S. Research trends: Tropical dry forests: The neglected research agenda? **Forest Policy and Economics**, v. 122, p. 102333, 2021.

SIGNOR, D., & CERRI, C. E. P. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 43, 322-338, 2013.

SIGNOR, D.; MEDEIROS, T. A. F.; MORAES, S. A.; CORRÊA, L. C.; TOMAZI, M.; MOURA, M. S. B.; DEON, M. Soil greenhouse gases emissions in a goat production system in the Brazilian semiarid. **region. Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 52, e72371, 2022.

SIGNOR, D.; MORAES, S. A. Emissão De Gases De Efeito Estufa Em Sistemas Produtivos No Nordeste Brasileiro. **Solos sustentáveis para a agricultura no Nordeste**, cap. 5, 2021.

SILVA, C. M. S.; BEZERRA, B. G.; MENDES, K. R.; MUTTI, P. R.; RODRIGUES, D. T.; COSTA, G. B.; OLIVEIRA, P. E. S.; REIS, J.; MARQUES, T. V.; FERREIRA, R. R.; CAMPOS, S.; RAMOS, T. M.; VIEIRA, M. M. L.; OLIVEIRA, A. C. C. F.; SILVA, C. L. C.; SILVA, A. C.; ANTONINO, A. C. D.; MENEZES, R. S. C. Rainfall and rain pulse role on energy, water vapor and CO₂ exchanges in a tropical semiarid environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 345, 2024.

SIMON, C. P. **Emissão de gases de efeito estufa do solo em áreas de Blowdown na Amazônia Central**. Universidade de São Paulo. Tese de doutorado, 98 p., 2023.

SNYDER, J.D.; TROFYMOW, J. A. A rapid accurate wet oxidation diffusion procedure for determining organic and inorganic carbon in plant and soil samples. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v.15, n.5, p.587-597, 1984.

SOUZA, M. T. C.; SILVA, M. E. F.; DE PAULO, P. F. M.; RIBEIRO, A. B.; ANDRADE, A. P.; CASSUCE, M. R. Caracterização climática e o efeito do estresse hídrico sob as plantas nativas da caatinga. **Pubvet**, 8, 0001-0083, 2015.