

ALCIÊNIA SILVA ALBUQUERQUE

**ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO E EM
ESPÉCIES FLORESTAIS EM TOPOSEQUÊNCIA DE
FLORESTA SECA NO ARARIPE DE PERNAMBUCO, BRASIL**

RECIFE

Pernambuco - Brasil

Fevereiro - 2024

ALCIÊNIA SILVA ALBUQUERQUE

**ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO E EM
ESPÉCIES FLORESTAIS EM TOPOSSEQUÊNCIA DE
FLORESTA SECA NO ARARIPE DE PERNAMBUCO, BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), para obtenção do título de Doutora em Ciências Florestais.

Orientador:

Prof. Dr. Fernando José Freire

RECIFE

Pernambuco - Brasil

Fevereiro - 2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A345e

Albuquerque, Alciênia Silva

Estoques de Carbono e Nitrogênio no solo e em espécies florestais em topossequência de floresta seca no Araripe de Pernambuco, Brasil / Alciênia Silva Albuquerque. - 2024.

138 f. : il.

Orientador: Fernando Jose Freire.

Inclui referências.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Recife, 2024.

1. Fragmentos florestais. 2. Sazonalidade. 3. Solos florestais. 4. Carbono. 5. Nitrogênio. I. Freire, Fernando Jose, orient. II. Título

CDD 634.9

ALCIÊNIA SILVA ALBUQUERQUE

**ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO E EM
ESPÉCIES FLORESTAIS EM TOPOSSEQUÊNCIA DE FLORESTA
SECA NO ARARIPE DE PERNAMBUCO, BRASIL**

Banca examinadora:

Profa. Dra. Ane Cristine Fortes Da Silva

Departamento Ciências Agronômicas e Florestais, Universidade Federal Rural do Semi-
árido

Profa. Dra. Gabriela Salami

Departamento Ciências Agronômicas e Florestais, Universidade Federal Rural do Semi-
árido

Prof. Dr. Alexandre Tavares Da Rocha

Coordenação de Capacitação, Difusão e Transferência de Tecnologia, Universidade
Federal do Agreste de Pernambuco

Prof. Dr. Luiz Guilherme Medeiros Pessoa

Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco

Orientador:

Prof. Dr. Fernando José Freire

Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco

**RECIFE
Pernambuco - Brasil
Fevereiro 2024**

À DEUS, por ser luz nos meus caminhos e presença constante em minha vida; a minha mãe Maria da Guia Silva Albuquerque que por nunca me dar nada nas mãos, me induziu a encarar meus obstáculos, me desafiando a vencer barreiras que pareciam insuperáveis; a minha filha Iasmim Albuquerque Pires por majorar minha força de vontade em seguir adiante a almejar caminhos mais promissores.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por abençoar todos os dias da minha vida, iluminar meu caminho e me dar forças, saúde, sabedoria e discernimento para seguir sempre em frente. “Porque tudo o que é nascido de Deus vence o mundo; e esta é a vitória que vence o mundo, a nossa fé” São João 5:4.

Gratidão a minha mãe Maria da Guia Silva Albuquerque, minha tia Nilza Quintino e demais familiares pelo amor, incentivo, acolhimento e confiança a mim sempre dedicados além do apoio e cuidado em todos os dias da minha vida.

À minha filha Iasmim Albuquerque Pires, por ser meu MAIOR incentivo a seguir em frente e perceber que Deus nos dá a cada dia uma página nova no livro do tempo e o que escrevemos nessas páginas fica a nossa escolha, pois tudo é possível quando se tem foco e fé.

Ao meu orientador Dr. Fernando José Freire por ser um dos responsáveis pela minha titulação, agradeço pela confiança, amizade, paciência, disponibilidade, apoio e extraordinária orientação. O senhor é um exemplo de simplicidade, compreensão, competência e humanidade.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEPE pelo apoio financeiro.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE e ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais- PPGCF pela oportunidade de cursar o Doutorado em Ciências Florestais.

Ao Laboratório de Química do Solo (Departamento de Agronomia-UFRPE).

Ao LAMEP/ITEP, em especial a Wanderson dos Santos Sousa, pela confiança e disponibilização dos dados climatológicos utilizados na construção deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisa Agronômica – IPA Araripina pelo amparo e aos colaboradores Pedro Esdras e Daniel Marques pelo suporte e amizade nas coletas de dados no campo.

A todos os professores que fazem parte do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais. Aos meus amigos da Pós-Graduação, Adão Batista, Dennis Meirelles, Clarice Freire, Giovana Melo, Nathan Castro, Paulo Dias, Yasmim Yathiera pela troca de conhecimento, auxílio na condução desse trabalho e amizade.

Às demais pessoas que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho.

RE-AFIRMO: SOU VITORIOSA POR TER CONSEGUIDO CHEGAR ATÉ AQUI.

GRATIDÃO SENHOR!!!

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar.
As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito.” - Chico

Xavier -

Muito obrigada!

ALBUQUERQUE, A. S. ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO E EM ESPÉCIES FLORESTAIS EM TOPOSEQUÊNCIA DE FLORESTA SECA NO ARARIPE DE PERNAMBUCO, BRASIL. 2024. Orientador: Fernando José Freire.

RESUMO

O aumento das concentrações de dióxido de carbono (CO₂) e óxido nitroso (N₂O) na atmosfera tem provocado um elevado número de estudos, visando se obter estimativas sobre a contribuição dos ecossistemas na absorção do C e N. A capacidade que a vegetação tem em estocar esses elementos químicos é fundamental para auxiliar na compreensão do potencial de armazenamento e fluxos de C e N. Essa é uma condição típica da Chapada do Araripe em Pernambuco, que associada a essa variedade de situações ambientais, se insere uma exploração desenfreada da Caatinga para uso como energia para calcinar gipsita, muito explorada na região. Diante desse pressuposto, buscou-se responder algumas perguntas, tais como: Os gradientes de altitude influenciam na capacidade de acúmulo de C e N? Quais espécies tem maior capacidade de estocar C e N, numa mesma condição edafoclimática? Qual a relação dos aportes de C e N nas plantas e no solo em diferentes estações climáticas do ano? Assim, o objetivo desse estudo foi determinar os teores, estimar a biomassa aérea e quantificar o estoque de C e N em quatro espécies florestais e nos solos, além de correlacionar as variáveis das plantas e do solo mais relacionadas aos estoques desses elementos, sob diferentes condições edafoclimáticas de uma topossequência, nos períodos seco e úmido, no Araripe de Pernambuco, Brasil. A partir de um levantamento fitossociológico, escolheu-se as espécies florestais que se repetiam nos três ambientes de altitude para quantificação do estoque de C e N. As coletas das amostras de material vegetal e solo, ocorreram nos dois períodos extremos quanto a precipitação pluviométrica: úmido e seco. A primeira coleta foi realizada em março e a segunda em setembro de 2022. As espécies estudadas foram: *Annona leptopetala* (R.E.Fr.), *Bauhinia subclavata* Benth., *Guapira opposita* (Vell.) Reitz e *Combretum glaucocarpum* Mart. A estimativa da biomassa das folhas e do lenho por planta foi realizada por meio de equações alométricas. Para calcular os estoques de C e N, determinou-se o teor de C e N nas folhas e no lenho de cada espécie. Os estoques de C e N por indivíduo, foram calculados através do produto dos teores de C e N pela biomassa do indivíduo naquela fração vegetal. Para caracterização química dos solos foram retiradas, aleatoriamente, 20 amostras simples de solo, coletadas na profundidade de 0 – 20 cm, formando-se, posteriormente, uma amostra composta de solo, em cada um dos fragmentos dos ambientes de alta, média e baixa altitude. Nas amostras determinou-se os teores de C e N por via seca. Assim, foram coletadas amostras indeformadas e a densidade do solo mensurada pelo método do anel volumétrico. Os estoques de C e N se concentraram nas altitudes mais elevadas da Chapada do Araripe, que estocaram 92%. Essa é uma constatação importante, porque as áreas baixas da Chapada precisam ser mais preservadas, para qualquer que seja a ação antrópica da exploração da Caatinga. O estoque de C do solo só foi influenciado pelos ambientes de altitude, independente do período do ano, tendo o ambiente de média altitude se diferenciado do ambiente de alta altitude e apresentado o mais alto estoque de C do solo. O estoque de N do solo no período úmido foi menor que no período seco, indicando que a umidade do solo afeta a disponibilidade de N e, pode influenciar a quantidade de N armazenada no solo. Todas essas variações de teores e estoques de C e N e relação C/N podem ser consequência de fatores sazonais ou mudanças nas condições ambientais ao longo do tempo, sugerindo o monitoramento dos atributos do solo nos ambientes de altitude e da sazonalidade na Chapada do Araripe, de forma a se obter informações relevantes para a compreensão dos processos ecológicos e da dinâmica do solo nesse ecossistema.

Palavras-chave: Fragmentos florestais; Sazonalidade; Solos florestais, Carbono, Nitrogênio.

ALBUQUERQUE, A. S. CARBON AND NITROGEN STOCKS IN THE SOIL AND FOREST SPECIES IN A DRY FOREST TOPOSEQUENCE IN ARARIPE, PERNAMBUCO, BRAZIL. 2024. Advisor: Fernando José Freire.

ABSTRACT

The increase in concentrations of carbon dioxide (CO₂) and nitrous oxide (N₂O) in the atmosphere has provoked a large number of studies, aiming to obtain estimates on the contribution of ecosystems to the absorption of C and N. The capacity that vegetation has in storing these chemical elements is essential to help understand the storage potential and flows of C and N. This is a typical condition of Chapada do Araripe in Pernambuco, which, associated with this variety of environmental situations, is part of the unrestrained exploitation of the Caatinga for use as energy to calcine gypsum, which is widely exploited in the region. Given this assumption, we sought to answer some questions, such as: Do altitude gradients influence the accumulation capacity of C and N? Which species have the greatest capacity to store C and N, in the same soil and climate conditions? What is the relationship between C and N inputs in plants and soil in different climatic seasons? Thus, the objective of this study was to determine the levels, estimate the aboveground biomass and quantify the stock of C and N in four forest species and soils, in addition to correlating the plant and soil variables most related to the stocks of these elements, under different edaphoclimatic conditions of a toposequence, in dry and humid periods, in Araripe de Pernambuco, Brazil. From a phytosociological survey, forest species that were repeated in the three high-altitude environments were chosen to quantify the C and N stock. The collection of samples of plant material and soil occurred in the two extreme periods in terms of rainfall: wet and dry. The first collection was carried out in March and the second in September 2022. The species studied were: *Annona leptopetala* (R.E.Fr.), *Bauhinia subclavata* Benth., *Guapira opposita* (Vell.) Reitz and *Combretum glaucocarpum* Mart. The estimation of leaf and wood biomass per plant was carried out using allometric equations. To calculate C and N stocks, the C and N content in the leaves and wood of each species was determined. The C and N stocks per individual were calculated through the product of the C and N contents by the individual's biomass in that plant fraction. For chemical characterization of the soil, 20 simple soil samples were randomly taken, collected at a depth of 0–20 cm, subsequently forming a composite soil sample in each of the fragments from the high, medium and low altitude environments. The C and N contents were determined in the samples dryly. Thus, undisturbed samples were collected and soil density was measured using the volumetric ring method. C and N stocks were concentrated in the highest altitudes of Chapada do Araripe, which stored 92%. This is an important finding, because the low-lying areas of Chapada need to be better preserved, for any human action involved in the exploitation of the Caatinga. The soil C stock was only influenced by high-altitude environments, regardless of the period of the year, with the medium-altitude environment differing from the high-altitude environment and presenting the highest soil C stock. The soil N stock in the wet period was lower than in the dry period, indicating that soil moisture affects N availability and can influence the amount of N stored in the soil. All these variations in C and N contents and stocks and C/N ratio may be a consequence of seasonal factors or changes in environmental conditions over time, suggesting the monitoring of soil attributes in high-altitude environments and seasonality in Chapada do Araripe, in order to obtain relevant information for understanding the ecological processes and soil dynamics in this ecosystem.

Keywords: Forest fragments; Seasonality; Forest soils, Carbon, Nitrogen

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO GERAL	17
2. REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 FLORESTAS TROPICAIS SAZONALMENTE SECAS	20
2.2 CARBONO NA BIOMASSA FLORESTAL	22
2.3 CARBONO NO SOLO	27
2.4 TOPOGRAFIA E FATORES CLIMÁTICOS	31
2.5 NITROGÊNIO	34
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
CAPÍTULO I	47
CARBONO E NITROGÊNIO NA BIOMASSA AÉREA DE FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE SECA NO NORDESTE BRASILEIRO	47
RESUMO	48
ABSTRACT	49
1. INTRODUÇÃO	50
2. MATERIAL E MÉTODOS	52
2.1 ÁREA DE ESTUDO	52
2.2 FRAGMENTOS FLORESTAIS ESTUDADOS	54
2.3 PERÍODOS AVALIADOS	54
2.4 SELEÇÃO DAS ESPÉCIES VEGETAIS	56
2.5 ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA E CÁLCULO DOS ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO	57
2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	59
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
3.1 TEORES DE CARBONO E NITROGÊNIO DAS ESPÉCIES FLORESTAIS NOS DIFERENTES AMBIENTES DE ALTITUDE E NOS DIFERENTES PERÍODOS DO ANO	59
3.2 PERÍODO ÚMIDO	65
3.2.1 BIOMASSA DA PARTE AÉREA.....	65
3.2.2 ESTOQUES DE CARBONO.....	67
3.2.3 ESTOQUES DE NITROGÊNIO.....	70
3.3 PERÍODO SECO	73
3.3.1 ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO	73
3.3.2 ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO POR ÁREA	76
4. CONCLUSÃO	78
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
CAPÍTULO II	85

CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO EM ÁREA DE FLORESTA TROPICAL SECA NO NORDESTE BRASILEIRO	85
RESUMO	86
ABSTRACT	87
1. INTRODUÇÃO	88
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	91
2.1 ÁREA DE ESTUDO	91
2.2 FRAGMENTOS FLORESTAIS ESTUDADOS	93
2.3 PERÍODOS AVALIADOS	94
2.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS.....	96
2.5 ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO	97
2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	98
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
4. CONCLUSÃO	105
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
CAPÍTULO III.....	111
ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SISTEMA SOLO-VEGETAÇÃO EM ÁREA DE FLORESTA TROPICAL SECA NO NORDESTE BRASILEIRO	111
RESUMO	112
ABSTRACT	113
1. INTRODUÇÃO	114
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	116
2.1 ÁREA DE ESTUDO	116
2.2 FRAGMENTOS FLORESTAIS ESTUDADOS.....	118
2.3 PERÍODOS AVALIADOS	118
2.4 SELEÇÃO DAS ESPÉCIES FLORESTAIS	120
2.5 ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA E CÁLCULO DOS ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO	121
2.6 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS.....	123
2.7 ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO	123
2.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA	124
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	125
4. CONCLUSÕES	134
5. REFERÊNCIAS	135
6. CONCLUSÃO GERAL	137

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1.** Localização da Área de Proteção Ambiental (APA) na Chapada Do Araripe52
- Figura 2.** Variação da precipitação pluviométrica média e acumulada e da temperatura entre a série histórica de 2012 a 2022 e o ano de 2022, no Araripe em Pernambuco, Brasil55
- Figura 3.** Série histórica de 2012 a 2022 da precipitação pluviométrica, temperatura e umidade, mostrando a média acumulada da precipitação e a precipitação média dos períodos anuais definidos como, úmido e seco e suas transições: úmido-seco e seco-úmido, bem com a temperatura e a umidade relativa média, no Araripe em Pernambuco, Brasil 55
- Figura 4.** Comparação da precipitação pluviométrica média e acumulada nos períodos úmido e seco entre a série histórica de 2012 a 2022 e o ano de 2022, mostrando que esses períodos historicamente foram mais secos do que o ano de 2022, no Araripe em Pernambuco, Brasil. 56
- Figura 5.** Teor de carbono no lenho das espécies florestais nos períodos seco e úmido, independente do ambiente de altitude, no Araripe em Pernambuco, Brasil 61
- Figura 6.** Teor de nitrogênio nas folhas das espécies florestais independente do ambiente de altitude e do período do ano, no Araripe em Pernambuco, Brasil 63
- Figura 7.** Produção de biomassa de folha, do lenho e da parte aérea das espécies florestais arbóreas nativas em cada ambiente de altitude (a, c, e) e influência do ambiente de altitude na produção dessa biomassa (b, d, f), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil 66
- Figura 8.** Estoque de carbono na folha, no lenho e total na parte aérea das espécies florestais arbóreas nativas em cada ambiente de altitude (a, c, e) e influência do ambiente de altitude nos estoques desse carbono (b, d, f), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil 69
- Figura 9.** Estoque de nitrogênio no lenho das espécies florestais arbóreas nativas (a) e nos ambientes de altitude (b), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil 71
- Figura 10.** Estoque de nitrogênio na folha e total na parte aérea das espécies florestais arbóreas nativas em cada ambiente de altitude (a, c) e influência do ambiente de altitude nos estoques desse nitrogênio (b, d), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil. 72
- Figura 11.** Estoque de carbono e nitrogênio no lenho das espécies florestais arbóreas nativas em cada ambiente de altitude (a) e influência do ambiente de altitude nos estoques desse carbono e nitrogênio (b), em período seco, no Araripe em Pernambuco, Brasil 74
- Figura 12.** Estoque de nitrogênio nas folhas e no lenho (a, c, e, g), bem como carbono nas folhas e no lenho (b, d, f, h) por área das espécies florestais arbóreas nativas em cada ambiente de altitude, em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil 78
- Figura 13.** Distribuição percentual do estoque de nitrogênio e carbono das espécies florestais arbóreas nativas em cada ambiente de altitude, em período úmido, no Araripe Em Pernambuco, Brasil 79

CAPÍTULO II

Figura 1. Localização da Área de Proteção Ambiental (APA) na Chapada do Araripe	92
Figura 2. Distribuição dos fragmentos de acordo com a posição no relevo.	94
Figura 3. Variação da precipitação pluviométrica média e acumulada e da temperatura entre a série histórica de 2012 a 2022 e o ano de 2022, no Araripe em Pernambuco, Brasil	95
Figura 4. Série histórica de 2012 a 2022 da precipitação pluviométrica, temperatura e umidade, mostrando a média acumulada da precipitação e a precipitação média dos períodos anuais definidos como, úmido e seco e suas transições: Úmido-seco e seco-úmido, bem como a temperatura e a umidade relativa média, no Araripe em Pernambuco, Brasil	95
Figura 5. Comparação da precipitação pluviométrica média e acumulada nos períodos úmido e seco entre a série histórica de 2012 a 2022 e o ano de 2022, mostrando que esses períodos historicamente foram mais secos do que o ano de 2022, no Araripe em Pernambuco, Brasil.	96
Figura 6. Teor de carbono (a), nitrogênio (b) e relação carbono/nitrogênio (c) no solo nos períodos seco e úmido, independente do ambiente de altitude, no Araripe em Pernambuco, Brasil.....	100
Figura 7. Estoque de carbono no solo nos diferentes ambientes de altitude, independente dos períodos seco e úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil.....	102
Figura 8. Densidade do solo nos diferentes ambientes de altitude, independente dos períodos seco e úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil	103
Figura 9. Estoque de nitrogênio no solo nos diferentes ambientes de altitude (a) e nos períodos seco e úmido (b), no Araripe em Pernambuco.....	104

CAPÍTULO III

Figura 1. Localização da Área de Proteção Ambiental (APA) na Chapada do Araripe.....	116
Figura 2. Variação da precipitação pluviométrica média e acumulada e da temperatura entre a série histórica de 2012 a 2022 e o ano de 2022, no Araripe em Pernambuco, Brasil.....	119
Figura 3. Série histórica de 2012 a 2022 da precipitação pluviométrica, temperatura e umidade, mostrando a média acumulada da precipitação e a precipitação média dos períodos anuais definidos como, úmido e seco e suas transições: Úmido-seco e seco-úmido, bem como a temperatura e a umidade relativa média, no Araripe em Pernambuco, Brasil.....	119
Figura 4. Comparação da precipitação pluviométrica média e acumulada nos períodos úmido e seco entre a série histórica de 2012 a 2022 e o ano de 2022, mostrando que esses períodos historicamente foram mais secos do que o ano de 2022, no Araripe em Pernambuco, Brasil.....	120
Figura 5. Correlações entre variáveis do solo e variáveis da planta, no Araripe em Pernambuco, Brasil.....	130
Figura 6. Agrupamento das variáveis relacionadas às espécies florestais, ambientes de altitude e períodos do ano, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Variáveis da planta: MF - Biomassa da folha (kg); MCG - Biomassa de caule e galhos (kg); MPA - Biomassa da parte aérea (kg); Cf - Teor de C da folha (%); Nf - Teor de N da folha (%); Cm- Teor de C do lenho (%); Nm	

- Teor de N no lenho (%); ECf - Estoque de C na folha (kg indivíduo-1); ENf - Estoque de N na folha (kg indivíduo-1); ECm - Estoque de C no lenho (kg indivíduo-1); ENm - Estoque de N no lenho (kg indivíduo-1); ECt - Estoque de C total (kg indivíduo-1); ENt - Estoque de N total (kg indivíduo-1). Espécies florestais: Bananinha, Mororo, Sipaubá e Pau piranha; Ambientes de altitude: Baixa, Média e Alta altitude; Períodos do ano: Úmido e seco.....131

Figura 7. Biplots das variáveis das plantas sob as espécies florestais, ambientes de altitude e períodos do ano, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Variáveis da planta: MF - Biomassa da folha (kg); MCG - Biomassa de caule e galhos (kg); MPA - Biomassa da parte aérea (kg); Cf - Teor de C da folha (%); Nf - Teor de N da folha (%); Cm - Teor de C do lenho (%); Nm - Teor de N no lenho (%); ECf - Estoque de C na folha (kg indivíduo-1); ENf - Estoque de N na folha (kg indivíduo-1); ECm - Estoque de C no lenho (kg indivíduo-1); ENm - Estoque de N no lenho (kg indivíduo-1); ECt - Estoque de C total (kg indivíduo-1); ENt - Estoque de N total (kg indivíduo-1). Espécies florestais: BAN -Bananinha; MOR - Mororo; SIP - Sipaubá; PPIR - Pau piranha; Ambientes de altitude: Baixa, Média e Alta altitude; Períodos do ano: U - Úmido; S - seco.....132

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

- Tabela 1.** Localização e características climáticas, vegetais e de solo dos ambientes de baixa, média e alta altitude em floresta tropical seca ao longo de um dos fragmentos de cada topossequência no Araripe em Pernambuco, Brasil 53
- Tabela 2.** Espécies florestais selecionadas de ocorrência simultânea em todos os ambientes de diferentes altitudes e suas respectivas distribuições nos fragmentos no Araripe em Pernambuco, Brasil..... 57
- Tabela 3.** Equações alométricas utilizadas para estimativa da biomassa aérea de folhas e lenho em floresta tropical seca de acordo com Silva; Sampaio (2008)..... 57
- Tabela 4.** Valores de F calculado na análise de variância (ANOVA) das espécies florestais arbóreas nativas e dos ambientes de altitude (alta, média e baixa) em relação aos teores de carbono nas folhas (Cf) e no lenho (Cm) e nitrogênio nas folhas (Nf) e no lenho (Nm), no Araripe em Pernambuco, Brasil 60
- Tabela 5.** Teor de carbono no lenho das espécies florestais em função do ambiente de altitude e do período do ano, no Araripe em Pernambuco, Brasil..... 62
- Tabela 6.** Teor de nitrogênio no lenho das espécies florestais em função do ambiente de altitude e do período do ano, bem como do ambiente de altitude em função do período do ano, no Araripe em Pernambuco, Brasil..... 64
- Tabela 7.** Valores de F calculado na análise de variância (ANOVA) das espécies florestais arbóreas nativas e dos ambientes de altitude (alta, média e baixa) em relação a produção de biomassa de folhas (MF), lenho (MCG) e parte aérea (MPA), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil..... 65
- Tabela 8.** Valores de F calculado na análise de variância (ANOVA) das espécies florestais arbóreas nativas e dos ambientes de altitude (alta, média e baixa) em relação aos estoques de carbono nas folhas (ECf), lenho (ECm) e parte aérea (ECt), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil..... 68
- Tabela 9.** Valores de F calculado na análise de variância (ANOVA) das espécies florestais arbóreas nativas e dos ambientes de altitude (alta, média e baixa) em relação aos estoques de nitrogênio nas folhas (ENf), lenho (ENm) e parte aérea (ENt), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil..... 70
- Tabela 10.** Valores de F calculado na análise de variância (ANOVA) das espécies florestais arbóreas nativas e dos ambientes de altitude (alta, média e baixa) em relação aos estoques de carbono no lenho (ECm) e nitrogênio no lenho (ENm), em período seco, no Araripe em Pernambuco, Brasil..... 73

CAPÍTULO II

- Tabela 1.** Localização e características climáticas, vegetais e de solo dos ambientes de baixa, média e alta altitude em floresta tropical seca ao longo de um dos fragmentos de cada topossequência no Araripe em Pernambuco, Brasil 93
- Tabela 2.** Atributos químicos dos solos dos diferentes ambientes de altitude 97
- Tabela 3.** Valores de F calculado na análise de variância (ANOVA) dos ambientes de altitude (alta, média e baixa) e períodos do ano (úmido e seco) em relação aos teores de carbono (C), nitrogênio (N), relação carbono/nitrogênio (C/N), estoque de carbono (ECs) e estoque de nitrogênio (ENs) no solo, no Araripe em Pernambuco, Brasil 99

CAPÍTULO III

Tabela 1. Localização e características climáticas, vegetais e de solo dos ambientes de baixa, média e alta altitude em floresta tropical seca ao longo de um dos fragmentos de cada topossequência no Araripe em Pernambuco, Brasil	117
Tabela 2. Espécies florestais selecionadas de ocorrência simultânea em todos os ambientes de diferentes altitudes e suas respectivas distribuições nos fragmentos no Araripe em Pernambuco, Brasil.....	121
Tabela 3. Equações alométricas utilizadas para estimativa da biomassa aérea de folhas e lenho em floresta tropical seca de acordo com Silva; Sampaio (2008).....	121
Tabela 4. Atributos químicos dos solos dos diferentes ambientes de altitude	123
Tabela 5. Matriz de correlação das variáveis relacionadas com a vegetação e os solos, no Araripe em Pernambuco, Brasil.....	127
Tabela 6. Coeficientes canônicos entre o material vegetal e o solo, no Araripe em Pernambuco, Brasil.....	128

1. INTRODUÇÃO GERAL

O desmatamento e a transformação de áreas naturais em áreas de uso agrícola, influenciam diretamente os fluxos biogeoquímicos, do C e, especialmente, do N, ocasionando mudanças climáticas e modificando o funcionamento e a manutenção dos ecossistemas.

No bioma Caatinga, está inserida uma das mais extensas formações de florestas secas do mundo, que se estende praticamente por todo o semiárido brasileiro, constituindo-se num mosaico de cactos, arbustos espinhosos e árvores lenhosas, com frequentes períodos secos. Trata-se de um ambiente com grande importância para a conservação da biodiversidade, devido a sua peculiaridade biológica e elevado endemismo, além de representar uma das florestas mais vulneráveis do mundo, devido a sua dependência por precipitação pluviométrica (CUNHA *et al.*, 2020).

O aumento das concentrações de dióxido de carbono (CO₂) e óxido nitroso (N₂O) na atmosfera tem provocado um elevado número de estudos, visando se obter estimativas sobre a contribuição dos ecossistemas na absorção do C e N. A capacidade que a vegetação tem em estocar esses elementos químicos é fundamental para auxiliar na compreensão do seu potencial de armazenamento e fluxos. Dentre os ecossistemas terrestres, as florestas são as mais produtoras de biomassa, tornando-as altamente atraentes no contexto da mitigação da mudança climática (NABUURS *et al.*, 2007).

É na biomassa vegetal que ocorre a fotossíntese, processo que retira CO₂ da atmosfera e estoca C nessa biomassa. Esse estoque de C nas florestas é um dado essencial nas estimativas de absorção de C do ambiente, além de se tratar de um parâmetro básico no estudo das trocas gasosas entre o ambiente e a atmosfera (WANG *et al.*, 2001). Isso pode ser utilizado no planejamento de manejos florestais sustentáveis, principalmente em florestas secas, em que a produção de biomassa é mais reduzida, limitando os estoques de C na vegetação e no solo. Em regiões secas do mundo, como no Araripe do Brasil, em que a pressão antrópica sob a vegetação é muito elevada, devido ao uso da madeira para geração de energia, os estoques de C na vegetação e no solo têm se reduzido, ainda mais.

A capacidade de armazenamento de C e N das plantas e do solo apresenta-se como medida mitigadora aos efeitos das mudanças climáticas, e para isso, a quantificação do estoque de C e N na biomassa dos ecossistemas é fundamental para desenvolver estratégias sustentáveis. Para tanto, a biomassa deve ser estimada de forma adequada, para que não

haja inconsistência na quantificação do C fixado (SANQUETTA; BALBINOT, 2004).

Assim como o C, o N é usualmente utilizado como indicativo da qualidade dos solos, desempenhando na planta papel fundamental para o desenvolvimento, já que é um dos nutrientes exigidos em maior quantidade pelas plantas, constituindo de 2 a 5% da matéria seca da planta, e ser fundamental na composição de aminoácidos e proteínas, constituinte de macromoléculas e enzimas (FAQUIN, 2005).

O N entra nos ecossistemas através do solo, via deposição dos gases atmosféricos ou resíduos de animais, e por meio da fixação biológica, através das bactérias que vivem associadas às raízes das plantas, principalmente das leguminosas ou as bactérias de vida livre no solo (CHAPIN *et al.* 2011).

Por outro lado, nas regiões secas, como na Chapada do Araripe, o relevo influencia na variabilidade climática ao longo da área de abrangência (NASCIMENTO, 2017). Devido às difíceis condições climáticas, associadas a presença de solos rasos, geralmente, a vegetação em baixas altitudes, apresenta baixa diversidade com relação a vegetação em mais altas altitudes, ocorrendo uma notável variedade de fitofisionomias e diferentes estruturas e composições vegetais (SANTOS, 2019). De acordo com Neves *et al.* (2016), independente dos níveis de precipitação pluviométrica, o solo foi o principal condicionador dos diferentes tipos de vegetação.

No entanto, pouco se busca avaliar as diferenças vegetacionais em diferentes altitudes, e quando se trata de estoque de C e N em topossequência, o déficit de estudos é ainda maior. Sabe-se que a densidade da biomassa varia espacial e temporalmente de acordo com os tipos de ecossistema e a maioria das áreas florestais estão acumulando continuamente C, embora, geralmente, em taxas mais baixas à medida que envelhecem (HOUGHTON *et al.*, 2009).

Por outro lado, a vegetação retrata a principal fonte de deposição de matéria orgânica no solo e seu fluxo é determinado a partir do equilíbrio existente entre a entrada de material orgânico e a saída de CO₂ para o ambiente (COSTA *et al.*, 2013).

Sendo assim, é esperado que os estoques de C e N na biomassa aérea e no solo em áreas de caatinga, sofram variação quanto à tipologia vegetal, os gradientes de altitude, bem como as características do solo. A capacidade que a vegetação tem em estocar elementos químicos é uma condição típica da Chapada do Araripe, que associada a essa variedade de situações ambientais, se insere uma exploração desenfreada para uso como fonte de energia para calcinar gipsita, muito explorada na região.

Diante desse pressuposto, para a região da chapada do Araripe, buscou-se responder

algumas perguntas: Os gradientes de altitude influenciam na capacidade de acúmulo de C e N? Quais espécies tem maior capacidade de estocar C e N, em uma mesma condição edafoclimática? Qual a relação dos aportes de C e N nas plantas e no solo em diferentes estações climáticas do ano?

Além do mais, ainda são escassos estudos de teores de C e N de espécies da Caatinga (DALLA LANA *et al.*, 2019; VIEIRA *et al.* 2009; PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2022) e pelo nível de exploração considerado na região, é importante o desenvolvimento de estudos técnicos científicos que forneçam diagnósticos da capacidade de armazenamento e estoque do C e N nas espécies arbóreas da região. Essas informações são necessárias, para melhorar a compreensão da dinâmica do C e N no complexo solo-vegetação, levando em consideração as diferenças topográficas, inferindo ainda sobre quanto C é estocado nas diferentes espécies da Caatinga e quanto é acumulado ao longo desse período como incremento, subsidiando políticas governamentais de exploração antrópica da madeira na região do Araripe em Pernambuco.

Diante do exposto, esse trabalho teve como objetivo determinar os teores, estimar a biomassa aérea e quantificar o estoque de C e N em quatro espécies florestais e nos solos, além de correlacionar as variáveis das plantas e do solo mais relacionadas aos estoques desses elementos, sob diferentes condições edafoclimáticas de uma topossequência, nos períodos seco e úmido, no Araripe de Pernambuco, Brasil.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FLORESTAS TROPICAIS SAZONALMENTE SECAS

As florestas são responsáveis pela cobertura de 31% da superfície da Terra, além de serem o habitat natural de grande parte da biodiversidade terrestre. Quase metade da área florestal do mundo permanece, relativamente, preservada e, pouco mais de um terço, é formada por florestas de formação primária, enquanto que, 9% dessa cobertura encontra-se fragmentada com pouca ou nenhuma conectividade (FAO; ITPS, 2015).

Localizadas em regiões com estações climáticas bem definidas, as Florestas Tropicais Sazonalmente Secas são adaptadas a estações secas que podem variar de 2 a 6 meses e com ocorrência de precipitação pluviométrica inferior a 1000 mm (ALLEN *et al.*, 2017).

Distribuídas de forma desuniforme pelo planeta, é no Brasil, Canadá, China, Federação Russa e Estados Unidos da América que encontramos mais da metade das formações florestais no mundo (FAO; ITPS, 2015).

No Brasil, a região semiárida, que se localiza, em sua maior parte na região Nordeste, abrange uma área de 1.548.672 km² (IBGE, 2012) e possui características heterogêneas nos aspectos de clima e solo, originando como resultado diferentes biomas. O bioma Caatinga, é o mais extenso, ocupando uma área de aproximadamente 844.453 km², cerca 54,53% da região Nordeste e 9,92% do território nacional, abrangendo parcialmente os estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais (BRASILEIRO, 2009; IBGE, 2012).

A Caatinga é uma das mais extensas formações de florestas tropicais sazonalmente secas, sendo considerada a mais rica em espécies da América Latina, entretanto, é erroneamente classificada como vegetação arbustiva ao invés de Floresta Tropical Sazonalmente Seca, acarretando na exclusão de pesquisas e relatórios relevantes, a exemplo das estatísticas sobre desmatamento (BLACKIE *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2018). As Florestas Tropicais Sazonalmente Secas de ocorrência no território brasileiro e em outras regiões do mundo, possuem características peculiares e importantes do ponto de vista biológico (FRANCA-ROCHA *et al.*, 2007). A importância dessa vegetação não se restringe apenas à sua elevada diversidade biológica e inúmeros endemismos, mas também por sua irregular climatologia, característica importante em estudos de plantas,

invertebrados e vertebrados, que se adaptam a um regime de chuvas altamente variável e estressante (FERREIRA, 2011).

De ocorrência nas Américas, as Florestas Tropicais Sazonalmente Secas, abrangem o Nordeste brasileiro, região leste da Bolívia, parte da América Central, norte da Colômbia, da Argentina e da Venezuela e oeste do Paraguai (DRYFLOR *et al.*, 2016; QUEIROZ *et al.*, 2017). No Brasil, essa formação florestal é conhecida como de Domínio Fitogeográfico da Caatinga, caracterizando a mais contínua e maior área de Floresta Tropical Sazonalmente Seca, situada no semiárido brasileiro (MORO *et al.*, 2016; ANDRADE *et al.*, 2020). As condições edafoclimáticas das regiões de Florestas Tropicais Sazonalmente Secas foram impactadas por altas densidades populacionais e a uma demanda crescente por energia, aumentando a degradação (BLACKIE *et al.*, 2014; RITO *et al.*, 2017; SCHULZ *et al.*, 2018).

As florestas secas, observadas sob uma perspectiva global, apresentam uma tipologia vegetal que sustenta parte das pessoas mais carentes economicamente do planeta (WAEBER *et al.*, 2012). Além disso, oferecem uma diversidade de serviços ecossistêmicos, subsidiando os sistemas agrícolas e a subsistência de milhões de agricultores, tornando a expansão agrícola a principal causa do desmatamento e da fragmentação florestal e, conseqüentemente, das perdas da biodiversidade florestal (CHIDUMAYO; GUMBO, 2010; FAO; ITPS, 2015).

Constitui a vegetação do tipo Savana, predominante na região Nordeste, que se caracteriza por apresentar um clima tropical semiárido. O semiárido brasileiro apresenta precipitação anual média de 800 mm, temperaturas médias anuais variando de 23°C a 27°C e é marcada pela forte insolação, temperaturas relativamente altas e regime de chuvas escassas, concentradas em curto período de tempo (ZANELLA, 2014).

É dividida em pelo menos seis tipos e 12 subtipos de vegetação, que representam gradientes de estrutura física, riqueza e diversidade de espécies, relacionados às condições fisiográficas, climáticas e antrópicas (ANDRADE-LIMA, 1981), com espécies, em geral, do extrato herbáceo arbustivo, do tipo lenhosa, cactáceas e bromeliáceas, que em condições de aridez se adaptam morfológica e/ou fisiologicamente, reduzindo a área foliar, ocasionando a caducifolia, ativando os mecanismos de fechamento dos estômatos e fazendo o controle osmótico (SILVA *et al.*, 2004; RAMALHO *et al.*, 2009).

As espécies desta formação vegetal apresentam comportamento fisiológico específico em relação ao ambiente. Seus processos biológicos selecionam características adaptativas,

que favorecem a flora e apresentam resistência às condições climáticas severas da região (TROVÃO *et al.*, 2007). A disponibilidade de água e elevadas temperaturas são fatores determinantes na adaptação das espécies, sendo o estresse hídrico fator limitante à distribuição geográfica das espécies vegetais (COSTA *et al.*, 2010), ou seja, a diversidade dessa cobertura vegetal está, em grande parte, determinada pelos atributos climáticos, topográficos e geológicos que, em suas inúmeras interações, ocorrem em ambientes ecológicos muito variados (RODAL *et al.*, 2008). Numa área amostrada correspondente a 41% da Caatinga (TABARELLI *et al.*, 2000), os botânicos identificaram quase 600 espécies lenhosas do total de 1.356 espécies de plantas (MAIA, 2004), em que pelo menos 318 são endêmicas (MMA, 2002).

O desenvolvimento florestal e o crescimento dos indivíduos sofrem são influenciados por características peculiares de cada espécie e suas interações com o ambiente, como: competição, idade, sazonalidade estacional, condições ambientais edáficas e climáticas e os efeitos topográficos (ZANON; FINGER, 2010). Além disso, a dinâmica das florestas ocorre em função dos processos naturais e dos processos ocasionados pelas perturbações antrópicas ao longo do tempo (GHALANDARAYESHI *et al.*, 2017). Dessa forma, essas interferências influenciam na formação das estruturas arbóreas, forma e tamanho, afetando o crescimento das raízes, fustes e galhos, influenciando na formação e crescimento das árvores (KERSHAW Jr. *et al.*, 2017).

As florestas secas são ricas em biodiversidade e fundamentais na demanda por serviços ambientais, segurança alimentar, pecuária, subsistência rural, fornecimento de energia e combustível. Assim, a conservação da biodiversidade destas florestas ou qualquer formação florestal, dependem inteiramente de práticas de manejo baseadas em conhecimentos sobre os recursos e resultados desejáveis e alcançáveis de acordo com cada tipologia de floresta (BLACKIE *et al.*, 2014).

2.2 CARBONO NA BIOMASSA FLORESTAL

As formações florestais responsáveis pelo armazenamento de diferentes quantidades de C em sua biomassa são aliadas no processo de estocagem do C atmosférico e esses ecossistemas podem contribuir substancialmente no combate às mudanças climáticas, mitigando o efeito estufa e, conseqüentemente, o aquecimento global, reduzindo os Gases de Efeito Estufa (GEEs) através da absorção do C (AZEVEDO *et al.*, 2018; MARTINS *et al.*, 2020; MEIRA *et al.*, 2020; VERES *et al.*, 2020).

Essa absorção de C pela vegetação, é uma alternativa que visa reduzir a concentração CO₂ na atmosfera, que oferece ao Brasil uma oportunidade de recuperar os distúrbios antrópicos e movimentar a economia, já que é um país detentor de muitos biomas florestais (VERES *et al.*, 2020), como a Caatinga.

As tipologias climáticas, vegetacionais e de solo que condicionam a composição da região semiárida no Brasil merecem atenção diferenciada, visto que, prognósticos de mudanças climáticas indicam que as alterações de clima serão mais impactantes em ambientes quentes e secos (PARMESAN *et al.*, 2013; SÁ *et al.*, 2017).

Ambientes semiáridos, com florestas secas como o bioma Caatinga, além de contribuir na conservação do solo e da água e oferecer recursos naturais, são significativos no sequestro de C. Além disso, no ambiente de caatinga, ocorre uma variabilidade nos fluxos de C em função da temperatura e da precipitação pluviométrica, sendo a perda de CO₂ para atmosfera razoavelmente baixa, inferindo que a eficiência do uso do C é alta e a fixação de CO₂ é equivalente à algumas florestas tropicais úmidas como a da Amazônia (MENDES *et al.*, 2020). Embora sejam consideradas de grande importância na compreensão dos fluxos globais de C e eficientes como sumidouro de C, mesmo em períodos prolongados de estiagem, as florestas secas consistem em ecossistemas pouco estudados (EAMUS *et al.*, 2013; MENDES *et al.*, 2021; MENEZES *et al.*, 2021).

A biomassa vegetal exerce o importante papel da fotossíntese retirando CO₂ da atmosfera e estocando em sua biomassa. Esse estoque de C nas florestas é um dado essencial nas estimativas de absorção e emissão de C para determinado ambiente, além de se tratar de um parâmetro básico no estudo das trocas gasosas entre o ambiente e a atmosfera (ROCHA *et al.*, 2017).

Dados de biomassa e de estoques de nutrientes, podem ser utilizados no planejamento de manejos florestais sustentáveis, principalmente em florestas secas, em que a produção de biomassa é mais reduzida, limitando os estoques de C na vegetação e no solo. Em regiões secas do mundo, em que a pressão antrópica sob a vegetação é muito elevada, devido ao uso da madeira para geração de energia, os estoques de C na vegetação e no solo têm se reduzido ainda mais. Além disso, o balanço de C está fortemente relacionado à escassez das chuvas e ao aquecimento noturno, ocasionando a intensificação da respiração, inferindo a vulnerabilidade de florestas tropicais em um futuro mais quente (MENDES *et al.*, 2020).

A avaliação dos estoques de C e a ciclagem deste elemento em florestas visa limitar o desmatamento, como estratégia de mitigação das mudanças atmosféricas globais

e redução das taxas de emissões de CO₂, visto que, a maior fonte de emissões de GEEs, são os desmatamentos e a degradação florestal, principalmente nos países tropicais (CHATURVEDI *et al.*, 2011). Por outro lado, a biomassa viva das árvores possui grande quantidade de C armazenado, sendo diretamente impactada por esses desmatamentos (GIBBS *et al.*, 2007).

Os ecossistemas tropicais, tanto emitem quanto absorvem o CO₂ atmosférico, sendo assim, estão diretamente associados ao ciclo global do C, e qualquer perturbação nesses ecossistemas, decorrente de distúrbios naturais e antrópicos, acarretará mudanças nos fluxos de C para a atmosfera, em níveis que irão variar com a intensidade do distúrbio (PAIVA *et al.*, 2011). Dependendo do estado em que se encontra, a floresta deixa de atuar como sumidouro e passa a ser fonte desse C para a atmosfera.

Como o volume de biomassa na floresta é o fator de controle do estoque de C, sua quantificação é necessária para entender a produtividade, concentração e alocação de nutrientes, bem como, o ciclo do C em indivíduos ou ecossistemas (HIGUCHI; CARVALHO, 1994; SILVEIRA *et al.*, 2008), ao mesmo tempo que serve de suporte para futuras avaliações e previsões sobre alterações climáticas (ROIK *et al.*, 2020).

A determinação da concentração de C retida em um único indivíduo ou em florestas naturais e povoamentos florestais é realizada a partir da quantificação da biomassa, seguida de sua concentração de C (CALDEIRA *et al.*, 2015). O estoque de C, por sua vez, é determinado a partir da multiplicação da biomassa total das plantas pelas concentrações de C nos tecidos vegetais das espécies (SILVA *et al.*, 2021).

Existem questionamentos sobre essa quantificação dos estoques de C em diferentes formações florestais, bem como, quanto a outros aspectos metodológicos, podendo ser estes os principais entraves científicos para se incluir integralmente a questão florestal na convenção sobre as mudanças climáticas (VERES *et al.*, 2020). Outro questionamento é sobre o valor predeterminado de 50% (500 g kg⁻¹) para o teor de C em tecidos vegetais, que pode não representar os níveis reais nas florestas tropicais, já que as concentrações de C podem ser diferentes em cada compartimento das plantas, superestimando e afetando os estudos globais de sequestro de C (SILVA *et al.*, 2021).

A quantidade de C sequestrado e concentrado na vegetação é estimada a partir da biomassa e teor de carbono, podendo estes dois parâmetros serem coletados em qualquer compartimento das árvores (THOMAS; MARTIN, 2012), seja na biomassa viva (tronco, galhos e folhas), biomassa subterrânea (raízes), biomassa morta ou na matéria orgânica do solo. Os dois parâmetros de quantificação de C apresentam dificuldade para obter um nível

de confiança bom e preciso, exigindo estimativas robustas e confiáveis (DALLA LANA *et al.*, 2019). Para Rocha *et al.* (2017) o compartimento vegetal de estoque de C mais fácil de ser mensurado é o da biomassa aérea viva, o qual pode ser determinado a partir de métodos diretos e indiretos.

Cabe destacar que as variações nos estoques de C não ocorrem apenas em função dos diferentes métodos de quantificação e intensidade amostral, mas também, devido às diferentes tipologias, ecossistemas e histórico de manejo florestal (LIPINSKI *et al.*, 2017), sendo o teor de C em povoamentos florestais, normalmente, afetado pela biomassa, devido a sua correlação (SANQUETTA *et al.*, 2015).

As condições ambientais e características morfofisiológicas são condicionantes para a fixação de C nas espécies (SILVA *et al.*, 2021). A biomassa por sua vez, é variável diante as diferentes tipologias florestais e influenciada pelo estágio de sucessão, onde formações florestais com indivíduos de grande porte tendenciosamente acumulam maior quantidade de biomassa, enquanto florestas em estágios iniciais apresentam um menor acúmulo (VERES *et al.*, 2020). Sendo assim, diferentes formações florestais, refletem variações na composição da comunidade arbórea, estágio sucessional, características climáticas, edáficas e históricos de perturbação, que por sua vez, inferem sobre o potencial de fixação de C em cada ambiente (MEIRA *et al.*, 2020).

Nas florestas nativas, ocorre uma alta variação no tamanho dos indivíduos e na densidade da madeira, além da elevada heterogeneidade de espécies, havendo ainda árvores tortas, com copas de grande dimensão e pequeno fuste, características que refletem na alta variação da biomassa e, conseqüentemente, nos totais de C (VERES *et al.*, 2020). Veres *et al.* (2020) afirmam, ainda, que em florestas pioneiras, a quantidade de C estocado não é tão grande quanto em florestas em avançado estágio de sucessão, mas, os processos dinâmicos são mais proeminentes nas formações em estágio inicial em que o crescimento célere de espécies pioneiras, alta mortalidade e recrutamento, propiciam uma maior aptidão para o acúmulo de C, constituindo-se em almejavéis sumidouros de CO₂.

Estudos apontam que a variabilidade na biomassa e, portanto, no estoque de C, ocorrem em decorrência de fatores, como: tempo, estágio vegetativo, manejo, espécies, condições geológicas e edafoclimáticas, dentre outros.

A idade do indivíduo e o ambiente no qual ele se desenvolve são fatores influentes na biomassa das espécies (KHAN *et al.*, 2018). Em reflorestamentos, constatou-se que ocorre o incremento no estoque de C na biomassa aérea total de acordo com o gradiente crescente de idade dos plantios (AZEVEDO *et al.*, 2018).

Quanto a variabilidade da biomassa e C em decorrência do estágio da vegetação, estudos apontam que em uma floresta estacional semidecídua em estágio médio/inicial houve um menor acúmulo de biomassa e C na maioria dos componentes avaliados, inferindo que formações em estágios mais avançados de sucessão acumulam mais biomassa e C (VERES *et al.*, 2020). Possivelmente porque, tanto a biomassa quanto o estoque de C, dependem da composição estrutural da floresta. Então, se a densidade de indivíduos for maior, ocorrerão os maiores estoques (LIPINSKI, *et al.*, 2017). Em uma unidade de conservação na Mata Atlântica, observou-se que o grupo das secundárias tardias apresentaram a maior concentração de C por indivíduo, resultando em um grupo com maior potencial de fixação de CO₂ (SILVA; SOUZA, 2018). Em uma área de reflorestamento em estágio de sucessão inicial, o total de C retido na biomassa aérea foi considerado baixo, provavelmente por se tratar de uma área em processo de restauração. Mesmo assim, observou-se um incremento de biomassa e C à medida que aumentou a idade do plantio, mostrando a tendência de aumento do estoque de C com o tempo (MEIRA *et al.*, 2020).

Quanto às demais diferenças que influenciam nos valores de biomassa e C, estudos mostraram que o manejo, as características climáticas do local de ocorrência dos indivíduos, o tipo de espécie, a família e o compartimento da planta influenciaram nas estimativas de C nas espécies florestais (SILVA *et al.*, 2021). Em uma floresta Ombrófila Mista, foi verificado que em decorrência da mortalidade e baixa taxa de crescimento dos indivíduos recrutados, algumas famílias deixaram de acumular biomassa e C (LIPINSKI *et al.*, 2017). Quanto ao tipo de manejo, estudo em área de restauração na Mata Atlântica, apontou que o estoque de C em matas nativas, são, consideravelmente, maiores do que os observados em áreas de reflorestamento (AZEVEDO *et al.*, 2018). Em uma floresta comercial no Amazonas, constatou-se que após 17 anos sem exploração, a floresta submetida ao corte funcionou como sumidouro, sendo eficaz no sequestro de C da atmosfera (VASCONCELOS *et al.*, 2016).

Na Caatinga, observou-se que a influência de atividades antrópicas apresentou um menor valor de sequestro de C e no que se refere a variação espaço-tempo, o sequestro de C se mostrou maior nos períodos de chuva e em áreas de Caatinga preservada (MORAIS *et al.*, 2017). Ainda na Caatinga, observou-se uma igualdade estatística para o teor de C, nos compartimentos de seis espécies, com um valor médio de 46,4%, e mostrando um resultado que permite estimar o potencial de sequestro de C para o bioma (DALLA LANA *et al.*, 2019).

Assim, ao se estimar o quanto um ecossistema estoca e sequestra C, obtêm-se informações que auxiliam no entendimento do comportamento do ecossistema, bem como na forma como o ambiente responde aos fenômenos naturais e intervenções antrópicas. Além disso, os biomas e as diferentes espécies dentro do mesmo bioma são capazes de armazenar quantidades diferentes de C em sua biomassa (SANTOS *et al.*, 2016; SILVA; SOUZA, 2018).

O conhecimento sobre os teores de C, sobretudo nas espécies e compartimentos, retrata um indicativo de espécies com potencial na fixação de C, além de ser um importante aliado nas estimativas precisas e acuradas dos estoques de C em ecossistemas florestais, evitando por sua vez, resultados tendenciosos (SILVA *et al.*, 2014).

É importante o uso dos grupos ecológicos na determinação do estoque de C, já que esse estoque em uma floresta depende principalmente do seu tempo de existência (AZEVEDO *et al.*, 2018), além disso, favorecem o reconhecimento de espécies com potencial de fixação, tratando-se de indicador relevante nos estudos de recomposição florestal e subsidiando a venda de créditos de C.

Os ecossistemas florestais, através do potencial de imobilizar o CO₂, são uma alternativa de sequestro de C, através da utilização de serviços ambientais, visando por consequência a manutenção dessas áreas e conservação da biodiversidade, bem como, subsidiando projetos de pagamentos de serviços ambientais (SILVA *et al.*, 2018).

Portanto, propostas que almejam aumentar os valores do sequestro e estoque de C, devem incluir a conservação e o reflorestamento, mostrando, assim, a importância dessas formações florestais no sequestro de C atmosférico.

2.3 CARBONO NO SOLO

As principais fontes de C são os oceanos, atmosfera, ecossistemas terrestres (biota e solo) e as formações geológicas, através dos fósseis e minerais. Os ecossistemas terrestres, por sua vez, são importantes no balanço GEEs e apresentam relevantes contribuições na mitigação das mudanças climáticas.

A vegetação retrata a principal fonte de deposição de matéria orgânica no solo e seu fluxo é determinado a partir do equilíbrio existente entre a entrada de material orgânico e a saída de CO₂ para o ambiente (COSTA *et al.*, 2013). Sendo assim, os estoques de C na biomassa e no solo, podem sofrer variação quanto à tipologia vegetal, os gradientes de

altitude, bem como as características do solo.

Um aspecto importante sobre a dinâmica do C no solo está diretamente ligado à produção de biomassa nos ecossistemas, já que proporciona maior ou menor estoque de C ao longo do tempo. Assim como as florestas, o solo consiste em um importante reservatório de C e pode atuar como fonte ou sumidouro de CO₂, dependendo, portanto, do seu uso e gestão (GONÇALVES *et al.*, 2019).

A biomassa acima do solo, biomassa abaixo do solo (raízes), matéria orgânica do solo, madeira morta e serrapilheira, consistem em reservatórios de C nos ecossistemas terrestres, sendo a madeira morta e a serrapilheira definidos como necromassa (IPCC, 2006). Essa necromassa, apesar de pouco estudada, consiste em um incremento importante na deposição de matéria orgânica, que é essencial no ciclo do C nos ecossistemas florestais (MAAS *et al.*, 2020). O solo armazena cerca de 45% do C em ambientes florestais, sendo a partir da decomposição da necromassa obtido o balanço do estoque de C nos solos, representando cerca de 10% do C armazenado nas comunidades florestais (IPCC, 2006; BERG; MCCLAUGHERTY, 2014).

A matéria orgânica, por sua vez, armazena a maior quantidade de C nos ecossistemas terrestres e, o principal meio que gera acúmulo dessa matéria orgânica, são os solos florestais (D'ANDRÉA *et al.*, 2010)

Mudanças na dinâmica da compartimentação da matéria orgânica no solo podem ser compreendidas a partir da agregação das partículas e distribuição do C orgânico nas classes de agregados do solo, inferindo que a adoção de práticas de manejo florestal interfere na dinâmica do C orgânico do solo, reduzindo seus teores (SANTOS *et al.*, 2021).

Dessa forma, para determinação do teor de C, é necessária a conversão das substâncias orgânicas presentes no resíduo orgânico em CO₂. Esse procedimento de conversão pode ser feito através de metodologias utilizando a combustão seca ou úmida, oxidação, titulometria, digestão, volumetria e outros procedimentos metodológicos (GATTO *et al.*, 2009).

É na matéria orgânica morta que se encontra o equivalente a 98% do C total, constatando que a maior parte do C orgânico está no solo (BATJES, 1999). Fatores como classe e profundidade de solo, temperatura do ambiente, índices pluviométricos e tipologia da vegetação influenciam a repartição do estoque de C no solo. No Brasil ambientes de clima tropical e

altitudes elevadas favorecem os estoques de C, enquanto regiões áridas com vegetação xerófila apresentam os estoques mais baixos (GOMES *et al.*, 2019). Além disso, tem se observado que a incidência de radiação solar e as variações térmicas do ar e do solo interferem na taxa de CO₂ ao longo do dia (MEDEIROS *et al.*, 2020).

Outro fator de influência nos estoques de C do solo é o manejo adotado. A adoção de práticas irregulares e intensivas no solo provoca a degradação e, conseqüentemente, a perda de C, inferindo na necessidade do uso de sistemas menos intensivos, através do uso dos resíduos gerados pelas culturas e redução da intensidade no preparo do solo, a fim de que ao longo dos anos, ocorra um acréscimo nos estoques de C (PRASAD *et al.*, 2016).

Estudos envolvendo as estimativas de estoques de C nos solos do Nordeste brasileiro ainda são escassos (JESUS *et al.*, 2019). Além do mais, a compreensão dos fatores que influenciam as perdas desses estoques para atmosfera, consiste em um desafio não apenas em escala regional, mas para todos os ecossistemas (D'ANDRÉA *et al.*, 2010).

A recuperação do estoque de C do solo é um processo que ocorre de forma gradativa, dependendo principalmente da região e destinação à que o solo é submetido, já que o manejo inadequado associado a baixa produção de biomassa vegetal em áreas de florestas secas, contribuem, consideravelmente, para redução do C do solo (SACRAMENTO *et al.* 2013).

Dependendo do uso e das condições ambientais a que é submetido, o solo atuará como fonte ou dreno de C, sendo seu fluxo para atmosfera dependente da razão entre produção e consumo e a difusão do gás no solo. Neste contexto, a atividade microbiológica da matéria orgânica e a respiração edáfica, em conjunto com os fatores ambientais passam a ser determinantes na dinâmica do C do solo, influenciando na produção e emissão do CO₂, uma vez que, a evolução do CO₂ liberado passa a ser analisado como um parâmetro de entendimento dos distúrbios ecológicos ocorridos em determinados ambientes (VALENTINI *et al.*, 2015; COSTA *et al.*, 2018a; MEDEIROS *et al.*, 2020). A velocidade do fluxo do C no meio edáfico, é, portanto, afetada pelos fatores bióticos e abióticos ou qualquer agente que altere as condições do solo (ARAÚJO, 2011) em que, quanto mais organismos presentes na biota, mais intensa é a liberação de CO₂ do solo, impactando na camada de ozônio da atmosfera (MEDEIROS *et al.*, 2020)

Tecnologias como, agricultura de conservação, têm se desenvolvido para aumentar os estoques de C e reduzir as emissões de GEEs (MAAS *et al.*, 2017). A adoção de práticas de gestão de conservação, bem como, o plantio direto, fazem com que haja um aumento

continuado do C orgânico do solo, indicando uma ferramenta promissora para majorar o sequestro de C em solos subtropicais (GONÇALVES *et al.*, 2018; GONÇALVES *et al.*, 2019), além de retratar um meio de mitigação das emissões de GEEs (PACHAURI *et al.*, 2014).

Estudos demonstraram a variação dos estoques e fluxo de C, diante de diferentes condições. Com relação a profundidade, Gomes *et al.* (2019) relataram que as camadas mais superficiais funcionaram como fonte de matéria orgânica e, conseqüentemente, estocavam maior quantidade de C e maiores profundidades do solo sofreram interferência dos fatores climáticos ao longo do tempo, reduzindo o estoque de C (ASSEFA *et al.*, 2017; GRINAND *et al.*, 2017; SANTANA *et al.*, 2019), corroborando com os resultados obtidos por Aquino *et al.* (2017) ao avaliar o estoque de C do solo em uma floresta de caatinga manejada com desbaste, observando maiores estoques na camada superficial e menores estoques em profundidade.

Observou-se também que fatores como a textura e o tipo de solo influenciaram nos estoques de C. Mesmo em áreas com vegetação densa, os estoques de C em Planossolos foram menores que os estoques em Argissolos e Latossolos (ALTHOFF *et al.*, 2018b). Quanto ao tipo de manejo, em áreas com vegetação densa, houve maiores estoques, quando comparado a áreas de agricultura e de vegetação aberta (SANTANA *et al.*, 2019), corroborando com os resultados de Jesus *et al.* (2019), quando constataram áreas de Caatinga aberta com 51% de C a menos que na vegetação densa. Áreas preservadas desse bioma, obtiveram 30% a mais de C no solo quando comparado a áreas regenerantes após 20 anos sem cortes (ALTHOFF *et al.*, 2018a).

Formações florestais, além de inferir significativamente nas entradas de matéria orgânica no solo, via deposição da serrapilheira, apresentam espécies com potencialidade de prestação de serviço ambiental, no sentido de estocar e sequestrar C na biomassa aérea, bem como no aporte de C para o solo (FERREIRA *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2021).

Portanto, atividades de recuperação de áreas degradadas consistem numa alternativa para projetos de Redução de Emissões do Desmatamento e da Degradação Florestal (REDD), assim como, estudos sobre as estimativas de estoques de C nos compartimentos aéreos e camadas do solo em ambientes florestais, podem ser usados como referência para elaboração de projetos de neutralização de C na esfera do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (AZEVEDO *et al.*, 2018).

2.4 TOPOGRAFIA E FATORES CLIMÁTICOS

A fixação de C, é uma variável que sofre influência direta em meio às diferentes condições ambientais e características morfofisiológicas intrínsecas, de forma que a alocação do C entre compartimentos e espécies é distribuída com base na posição do relevo e condições climáticas do local de ocorrência do indivíduo (SILVA *et al.*, 2021). Além disso, a cobertura florestal é fator determinante para o estoque de C do solo.

Gradientes topográficos em escala local são analisados em estudos como mecanismos determinantes na preferência ecológica de plantas (SHAOLIN *et al.*, 2008; PUNCHI-MANAGE *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2018). Com base na topografia, pode-se obter condições ambientais heterogêneas, as quais oferecem habitats extremamente diversificados e favoráveis a diversidade de plantas (NICHOLS *et al.*, 1998; TEWS *et al.*, 2004), ocasionando uma variabilidade de clima, solo, vegetação e impulsionando as características fisiológicas dos indivíduos, como exemplo a capacidade de captação do C e conversão em biomassa.

O modo como estas múltiplas condições são arranjadas no espaço moldam pequenos gradientes microclimáticos, projetados pela declividade, propriedades físicas e químicas do solo (umidade, pH e nutrientes), influenciando aspectos da flora e fauna (SCHLAGHAMERSKÝ *et al.*, 2014). Assim, esses fatores são considerados causas factuais do incremento da biodiversidade.

A topografia em escala local, quando correlacionada com as propriedades do solo em florestas tropicais sazonalmente secas têm sido alvo de estudos, concentrando-se boa parte em gradientes topográficos (KHOMO *et al.*, 2011; DAS *et al.*, 2015; PULLA *et al.*, 2016). Na Caatinga, a heterogeneidade de ambientes edáficos desempenha aspectos-chave na origem, manutenção e estruturação das espécies (MORO *et al.*, 2015; SILVA; SOUZA, 2018).

A Chapada do Araripe está localizada no interior da região Nordeste do Brasil, entre os limites dos estados do Piauí (ao oeste), Ceará (ao norte) e Pernambuco (ao sul). Devido a série evolutiva com depósitos de sedimentos interpostos horizontalmente no sentido da base para o topo, sua dimensão espacial está associada a um gradiente de elevação, formando uma superfície de planalto sedimentar.

Em florestas tropicais úmidas, os gradientes de declividade em escalas locais criam heterogeneidade de habitats moldados pela hidrologia, alterando o microclima local com

maior umidade nas áreas de menor elevação (ALLIÉ *et al.*, 2015).

As formações geomorfológicas de maiores altitudes no semiárido brasileiro possuem papel essencial na modulação do relevo, sendo a elevação positivamente associada à precipitação, e negativamente à temperatura, devido em grande parte aos efeitos orográficos (SILVA; SOUZA, 2018). Esses mecanismos interagem com fatores edáficos, moldando a heterogeneidade dos níveis de aridez (SAMPAIO, 2010). A distribuição das espécies, representa uma das respostas mais evidentes das variações na disponibilidade hídrica (LOPES *et al.*, 2017). O conjunto desses condicionantes climáticos pode esclarecer padrões ecológicos semelhantes àqueles já relatados ou até mesmo distintos, sendo esse conhecimento, imprescindível para diretrizes de manejo e criação de áreas prioritárias para a conservação.

Em regiões de florestas secas como a do Araripe, regidas por mudanças topográficas, tem se observado que os melhores preditores das propriedades do solo foram o pH, elevação e os constituintes físicos do solo, de modo que todas as variáveis do solo aumentaram com a elevação, exceto o pH que atingiu o pico em elevações intermediárias. Os nutrientes foram menores nos solos de baixas altitudes com textura fina e maiores teores em posições mais elevadas com solos franco areno-argilosos (PULLA *et al.*, 2016).

A posição topográfica em alguns estudos consistiu em um fator importante para o controle do pH, aumentando do topo em direção às partes mais baixas (LIPPOK *et al.*, 2013), e correlacionado negativamente com a declividade (SEIBERT *et al.*, 2007). É provável que os componentes químicos sejam transportados, fazendo com que as posições de menor elevação sejam enriquecidas de íons e matéria orgânica (CAMPOS *et al.*, 2010). A topografia direciona o curso da água e a distribuição dos constituintes da erosão; sais solúveis, colóides minerais e matéria orgânica. Por outro lado, interações envolvendo outros componentes edáficos podem gerar um desarranjo nessa compreensão, e os mecanismos associados a fatores climáticos, aspectos da vegetação e geomorfológicos do relevo também podem impulsionar as propriedades edáficas (ALI *et al.*, 2019).

As regiões áridas e semiáridas são caracterizadas pelas temperaturas elevadas, invernos curtos e irregulares e baixa produção de biomassa (ALTHOFF *et al.*, 2018). Estas regiões são marcadas pelos fatores limitantes de clima e solo favorecendo às ações antrópicas como o desmatamento e queimadas, fatores incisivos nos estoques de C da vegetação e do solo.

As tipologias climáticas, vegetacionais e de solo que condicionam a composição da

região semiárida no Brasil merecem atenção diferenciada, visto que, prognósticos de mudanças climáticas indicam que as alterações de clima serão mais impactantes em ambientes quentes e secos (PARMESAN *et al.*, 2013; SÁ *et al.*, 2017).

Sendo assim, as mudanças climáticas causadas pelo aumento dos GEEs, consistem em uma ameaça a prestação dos serviços ambientais, principalmente nas regiões mais áridas em que a vegetação apresenta menor área foliar, o solo menor quantidade de biomassa e os déficits hídricos, influenciam fortemente no balanço do C. Silva *et al.* (2021) afirmam que, as condições ambientais e características morfofisiológicas são condicionantes para a fixação de C nas espécies florestais.

Alterações no ambiente e no clima oscilando entre abundância e escassez influenciam no comportamento da vegetação como um todo (MEDEIROS *et al.*, 2020) e estas alterações associadas aos fatores bióticos e abióticos, interferem nos fluxos de C, ocasionando oscilações nas taxas de concentração do C (ARAÚJO, 2011).

No Brasil ambientes de clima tropical e altitudes elevadas favorecem os estoques de C, enquanto em regiões áridas com vegetação xerófila apresentam estoques mais baixos (GOMES *et al.*, 2019). Entretanto, tem se observado que a incidência de radiação solar e as variações térmicas do ar e do solo interferem na taxa de emissão de CO₂ ao longo do dia (MEDEIROS *et al.*, 2020).

Ambientes semiáridos, com florestas secas, como o bioma Caatinga, além de contribuir na conservação do solo e da água e oferecer recursos naturais, são significativos no sequestro de C. Além disso, no ambiente de Caatinga, ocorre uma variabilidade nos fluxos de C em função da temperatura e da precipitação pluviométrica, sendo a perda de CO₂ para atmosfera razoavelmente baixa, inferindo que a eficiência do uso do C é alta e a fixação de CO₂ é equivalente à algumas florestas tropicais úmidas, como a da Amazônia (MENDES *et al.*, 2020). Na vegetação de Caatinga, tem-se observado que o sequestro de C se mostra maior nos períodos de intensidade hídrica e em áreas de Caatinga preservada, onde a incidência solar sobre a vegetação é maior (MORAIS *et al.*, 2017). Estudos apontaram ainda sobre o potencial das florestas secas no sequestro de C, constatando-se igualdade estatística para o teor de C nos compartimentos de espécies, com valor médio de C de 46,4% para o vegetação da caatinga (DALLA LANA *et al.*, 2019).

Quanto aos solos, as regiões áridas e semiáridas apresentam solos de uso contínuo que se tornam mais susceptíveis a erosão, que em conjunto com as alterações climáticas, altera as taxas de adição e decomposição do C, e conseqüentemente, modifica os teores do

C armazenado (FERREIRA *et al.*, 2020).

Estudos nestas áreas, comprovaram que a temperatura influencia nos processos metabólicos do solo e, conseqüentemente, no fluxo de C. Com a elevação da temperatura e condições ótimas de umidade, ocorre aumento na respiração do solo e, conseqüentemente, um aumento nos teores de CO₂ (SOUTO *et al.*, 2009; ARAÚJO, 2011). Em contrapartida, Souto *et al.* (2013), avaliando atividade microbiana em uma área de caatinga, observaram que durante a noite, quando o solo atinge temperaturas inferiores, ocorreu uma maior atividade microbiana, favorecendo a maior liberação do CO₂.

Em conjunto com as características climáticas, o material vegetal que é aportado sobre o solo também é um indicativo da quantidade de C no ambiente. Souto *et al.* (2013) observaram que a textura das folhas em espécies do Bioma Caatinga é um fator limitante no processo de decomposição, por serem mais rígidas e absorverem menos umidade dificultam a ação dos organismos em períodos secos. Resultado este, que demonstra a importância da temperatura e umidade na decomposição do material vegetal e teores de C dos solos nessas regiões.

Embora pouco explorados no sentido dos fluxos de C, os solos da Caatinga podem ser considerados depósitos expressivos de C, que através da sazonalidade climática e mudanças na umidade e temperatura, têm seus fluxos afetados, sendo representativos nas reduções de CO₂ (SOUZA *et al.*, 2019). Esses mesmos autores relataram, ainda, que o período seco apresentou maiores estoques de C no solo, inferindo na influência das temperaturas elevadas e incidência solar na superfície do solo, reduzindo os estoques de C através de sua oxidação.

Diante do exposto, conclui-se que, fatores climáticos limitantes nas regiões áridas e semiáridas, são também influenciadores consideráveis nos estoques de C dessas regiões. Mesmo com variações de clima, temperatura, incidência solar e disponibilidade de água, as áreas de florestas secas atuam como sumidouros de C.

2.5 NITROGÊNIO

O N constitui o elemento mais abundante na Terra, correspondendo a 78% da atmosfera. Entretanto, trata-se de um elemento escasso na forma disponível para as plantas, sendo um fator determinante no seu crescimento, quando considerado junto com a luz do sol e a água (SMILL, 1999; GRAHAM, 2003). Em ecossistemas naturais, as quantidades

adequadas do N nos compartimentos vegetais, são condicionadas pela capacidade do indivíduo em fixar o N, principalmente através da fixação simbiótica (ALLEN; ALLEN, 1981).

As espécies da família Leguminosae, em sua maioria, formam associações com bactérias do gênero *Rhizobium* quando se encontram em solos deficientes de N, como os solos da Caatinga, formando nódulos radiciais, que convertem o N livre do ar em N fixado para assimilação ou estoque na planta, conferindo as espécies dessa família sucesso ecológico em relação às demais espécies, através do suprimento das leguminosas em N (ALLEN; ALLEN, 1981). Trata-se ainda, de um elemento passivo de diversos processos de perda no sistema solo- planta, o que lhe confere uma baixa capacidade de recuperação (FAGERIA, 2007),

O N é usado na avaliação da qualidade do solo, faz parte do material genético das plantas e desempenha função na maioria das atividades metabólicas da planta, como atividades enzimáticas, níveis de aminoácidos e suprimento de carboidratos, além de ser o elemento mais limitante da produção agrícola (MOSIER *et al.*, 2002; LADHA; REDDY, 2003; REN *et al.*, 2015). Para a produção de alimentos, a agricultura depende da adição de fontes nitrogenadas, usando anualmente cerca de 120 milhões de toneladas de fertilizantes sintéticos (FAO; ITPS, 2015).

Nesses sistemas agrícolas, os modelos extensivos com a inserção de leguminosas, favorece a capacidade de fixação biológica de N, acrescentando uma alternativa de prevenção à degradação do meio ambiente e segurança alimentar. Entretanto, no modelo de agricultura de subsistência, a fertilização nitrogenada dificilmente ocorre, inviabilizando a agricultura de sequeiro e causando a dependência das culturas apenas no N mineralizado da matéria orgânica do solo (SAMPAIO *et al.*, 1995).

O maior reservatório de N do solo encontra-se na forma orgânica, representando 95% do N existente no solo, já o N mineral, além de facilmente perdido por processos ambientais, varia entre 3 e 8% do N total (LADHA, 2016).

Por outro lado, o interesse sobre os ciclos biogeoquímicos do N e C nos ecossistemas terrestres, vem crescendo em função das emissões de seus óxidos, que contribuem de forma significativa para o aumento do aquecimento global (FU *et al.*, 2010). Além disso, processos bióticos e abióticos do solo podem ser alterados pelos óxidos de C e nitroso, influenciando na biota do solo, retenção de água e ciclagem de nutrientes nas plantas (TIAN *et al.*, 2013; CHEN *et al.*, 2014).

As emissões de N, geradas a partir das mudanças do uso da terra, combustão de

combustíveis fósseis e uso de fertilizantes nitrogenados excedem as emissões produzidas naturalmente pelos sistemas naturais terrestres, ocasionando impactos substanciais nos ecossistemas e serviços ecossistêmicos (PENG *et al.*, 2017).

O comportamento do C e N do solo após a conversão de florestas em agricultura e pastagens sofrem variações de acordo com as características de clima, topografia, práticas de manejo, quantidade de biomassa, relação C/N, teor de lignina e matéria orgânica, visto que, as diferenças no armazenamento destes elementos são conferidas a variações no tipo e idade da cobertura e nos atributos físicos dos solos (OSHER *et al.*, 2003; MCLAUCHLAN, 2006a; DON *et al.*, 2010; SARIYILDIZ *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2018a; BARROS *et al.*, 2019).

Os estoques de N do solo representam um importante componente na sua ciclagem, visto que a deposição de N no sistema, eleva a produção de serrapilheira, aumentando simultaneamente a quantidade de matéria orgânica do solo, através do acúmulo dos resíduos em superfície e das mudanças nas taxas de decomposição a longo prazo, inferindo positivamente no sequestro de C em ecossistemas terrestres (DE VRIES *et al.*, 2009; ZHONG *et al.*, 2017).

Embora as estimativas sobre estoques de N sejam necessárias para a compreensão do ciclo, estudos nesse contexto em escala regional representa uma tarefa desafiadora, visto que o elemento não apresenta uma distribuição espacial uniforme, já que se correlaciona com a variabilidade climática, diferentes práticas de manejo, distintas classes de solo, cobertura vegetal e usos da terra (SARIYILDIZ *et al.*, 2016; MARTY *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2018; BARROS *et al.*, 2019).

Vários estudos têm mostrado que mudanças nos tipos de uso da terra envolvem mudanças no C do solo (ALTHOFF *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2018a; GOMES *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2019). Entretanto, estudos sobre estoques de N são escassos em regiões tropicais e secas, observando-se que são realizados com mais frequência em regiões temperadas e úmidas (KOOHAFKAN; STEWART, 2008).

Assim, sabe-se que a dinâmica do N do solo é complexa quando ocorrem mudanças no uso da terra e, provavelmente, é afetada por múltiplos fatores, mas, o conhecimento sobre os efeitos dessas mudanças sob os estoques de N segue escassos, desconhecendo-se ao certo se são maiores, menores ou semelhantes em terras agrícolas e florestais (MOGES *et al.*, 2013; ZITER; MACDOUGALL, 2013; CHEN *et al.* 2016).

A magnitude desse déficit de conhecimento se torna ainda mais considerável nos solos do semiárido brasileiro, já que diferem muito quanto a profundidade e uso (SILVA,

2000; SALCEDO; SAMPAIO, 2008).

Dessa forma, o conhecimento sobre a dinâmica do N, especialmente nas regiões semiáridas, é fundamental para o entendimento e gestão sustentável dos recursos da região, e também pode favorecer o entendimento dos ciclos do C e do N (DENG *et al.*, 2016).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, A. *et al.* Climatic water availability is the main limiting factor of biotic attributes across large-scale elevational gradients in tropical forests. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 647, n.10, p.1211-1221, 2019.

ALLEN, O.N.; ALLEN, E.K. The Leguminosae: a source book of characteristics use and nodulation. **Wisconsin**, University of Wisconsin Press, 812p, 1981.

ALLEN, K. *et al.* Will seasonally dry tropical forests be sensitive or resistant to future changes in rainfall regimes? **Environmental Research Letters**, v.12, n.2, p.230 01.

ALLIÉ, E.; *et al.* Pervasive local-scale tree-soil habitat association in a tropical forest community. **Plos one**, Califórnia, v. 10, n. 4, p. 0141488, 2017.

ALTHOFF, T. D. *et al.* Adaptation of the century model to simulate C and N dynamics of Caatinga dry forest before and after deforestation. **Agriculture, ecosystems & environment**, v.254, p.26-34, 2018a

ALTHOFF, T. D. *et al.* Simulation of aboveground biomass production under different rainfall scenarios and soil types in the Caatinga Biome, Brazil. **Revista Geama**, v. 4, n.2, p. 13- 18, 2018b.

ALTHOFF, T. D. *et al.* Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. **Forest Ecology And Management**, v. 360, p.367-375, jan. 2016.

ASSEFA, D. *et al.* Deforestation and land use strongly effect soil organic carbon and nitrogen stock in Northwest Ethiopia. **Catena**, v.153, p. 89–99, 2017.

AZEVEDO, A. D. *et al.* Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica. Floresta, Curitiba, PR, v. 48, n. 2, p. 183-194, 2018.

BARROS, J. A. Human disturbance affects enzyme activity, microbial biomass and organic carbon in tropical dry sub-humid pasture and forest soils. **Archives of Agronomy Soil Science**, v. 66, p. 1-19, jan, 2019.

BERG, B.; MCCLAUGHERTY, C. Serapilheira - decomposição, formação de húmus, sequestro de carbono. 3 ed. **Springer** 338p, 2014.

- BLACKIE, R., *et al.* As florestas tropicais secas: O estado de conhecimento global e recomendações para futuras pesquisas. **Environmental Research Letters**, Documento de discussão do CIFOR Bogor, Indonésia: Centro de Pesquisa Florestal Internacional (CIFOR), 2014. <http://dx.doi.org/10.17528/cifor/005241>
- BLACKIE, K. A. *et al.* Will seasonally dry tropical forests be sensitive or resistant to future changes in rain fall regimes? **Environmental Research Letters**, comendações para futuras pesquisas. Documento para discussão. Bogor, Indonésia: CIFOR. v.12, n.2, p.23001, 2017.
- CALDEIRA, M.V.W. *et al.* Biomassa e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Ciência Florestal**, v. 25, n 4, p. 1027-1034, 2015.
- CAMPOS, M. C. C. *et al.* Segmentos de vertente e atributos do solo de uma topossequência na região de Manicoré, AM1. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 501-510, 2010
- CHATURVEDI, R.K. *et al.* Leaf attributes and tree growth in a tropical dry forest. **Journal of Vegetation Science**. 2011. doi:10.1111/j.16541103.2011.01299.x.
- CHEN, H. *et al.* Assessment of climate change impacts on soil organic carbon and crop yield based on long-term fertilization applications in Loess Plateau, China. **Plant and Soil**, v. 390, n. 1-2, p.401-417, 2014.
- CHEN, W. *et al.* Multiple mechanisms contributed to the reduced stability of Inner Mongolia grassland ecosystem following nitrogen enrichment. **Plant and Soil**, v. 409, n. 1-2, p.283-296, 22 jun, 2016.
- COSTA, E. M. *et al.* Matéria orgânica do solo e seu papel na manutenção e produtividade de sistemas agrícolas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 1842-1860, 2013.
- COSTA, J. M. F. *et al.* (2018a). Dinâmica de carbono do solo em unidade de conservação do cerrado brasileiro sob diferentes fitofisionomias. **Rev. Gestão Sustentável Ambiental**, v. 7, n. 4, p. 306-323, 2018a.
- COSTA, J. M. F. *et al.* (2018b). Geração de créditos de carbono na queima de metano na carbonização. **Brazilian Journal of Wood Science**, v. 10, n. 1, p. 48-56.
- D'ANDRÉA *et al.* Variabilidade espacial do fluxo de CO₂ do solo em povoamento de Eucalipto. **FLORESTA**, v. 41, n. 2, p. 407-422, 2011.
- DE VRIES, W. *et al.* The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration by European forests and heathlands. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 8, p.1814-1823, 2009.
- DIAS, B.O. *et al.* Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification. **Biores. Technol.**, v.101, p. 1239-1246, 2010.
- DON, A. *et al.* A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta- analysis. **Global Change Biology**, v. 17, n. 4, p.1658- 1670, 2010.

- EAMUS, D. *et al.* Carbon and water fluxes in an arid-zone Acacia savanna woodland: an analysis of seasonal patterns and responses to rainfall events. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182-183, p. 225–238, 2013.
- FAGERIA, N. K. Soil quality vs. environmentally-based agricultural management practices. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n. 13-14, p.2301-2329, 2007.
- FAO end ITPS. Status of the World's Soil Resources: Main Report. 2015. Disponível em: <<https://www.fao.org/documents/card/en/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/>>. Acesso em: 27 ago. 2022.
- FERREIRA, P. I. *et al.* Estrutura populacional, padrão espacial e estoque de carbono em bracingais no Planalto Sul Catarinense. **Floresta**, v. 46, n. 2, p. 227 – 234, 2016.
- FERREIRA, C. D. *et al.* Soil organic carbon in a toposequence in the semiarid of Paraíba, Brazil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 5, e164953365, 2020.
- FILHO, F. B. J. S.; SILVA, T. T. A. Créditos de carbono e a extrafiscalidade: uma saída para o desenvolvimento sustentável no Brasil. **Revista Jurídica UNI7**, v. 14, n. 1, p. 59 – 71, 2017.
- FU, X. *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China. **Geoderma**, v. 155, n. 1-2, p.31-35, 2020.
- GATTO, A. *et al.* Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1069-1079, 2010.
- GRINAND, C. *et al.* Estimating temporal changes in soil carbon stocks at ecoregional scale in Madagascar using remote-sensing. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 54, p. 1-14, 2017.
- GUERRA, J.G.M.; SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CAMARGO, F.A.O. (2008). Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole.
- GIBBS, H.K. *et al.* Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. **Environmental Research Letters** 2, 045023, 2007.
- GHALANDARAYESHI, S. *et al.* Spatial patterns of tree species in Suserup Skov – a seminatural forest in Denmark. **Forest Ecology and Management**, v. 406, p. 391-401, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.020>.
- GOMES, L. C. *et al.* Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma**, v. 340, p. 337-350, 2019.
- GONÇALVES, D. R. P. *et al.* Soil carbon inventory to quantify the impact of land use change to mitigate greenhouse gas emissions and ecosystem services. **Environmental Pollution**, v. 243, 2019.

- GONÇALVES, D. R. P. *et al.* Conservation agriculture based on diversified and high-performance production system leads to soil carbon sequestration in subtropical environments. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 136 -147, 2019.
- GRAHAM, P.H.; VANCE, C.P. Legumes: importance and constraints to greater use. **Plant Physiology**, 131: 872-877, 2013.
- HELLVIG, E. L.; FLORES-SAHAGUN, T. H. S. Desenvolvimento Sustentável para empresas brasileiras: a nova proposta da Economia Hipocarbônica como estratégia de obtenção de lucros através dos créditos de carbono. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 25456-25472, 2020.
- HIGUCHI, N.; CARVALHO, J. A. J. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: Seminário Emissão x Sequestro de CO₂ - Uma nova oportunidade de negócios para o Brasil, Rio de Janeiro, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD/FBDS.
- HORST, D. J.; JÚNIOR, P. P. A. Uma revisão sistemática sobre os mecanismos de monitoramento e captura, regulação de emissões e créditos de carbono. **Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 45, p. 51 - 62, 2020.
- HUA, G.; CHENG, T. C. E.; WANG, S. Managing carbon footprints in inventory management. **International Journal of Production Economics**, v. 132, n. 2, p. 178-185, 2011.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro, IBGE. 275p, 2012.
- INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento dos focos ativos por bioma: comparação do total de focos ativos detectados pelo satélite de referência em cada mês, no período de 1998 até 31/10/2020**. 2020. Disponível em: [http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/ estatisticas_estados/](http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_estados/). Acesso em: 10/09/2021.
- IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). (2006). Diretrizes para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa. Agricultura, silvicultura e outros usos do solo. Instituto de Estratégias Ambientais Globais (IGES).
- JIMÉNEZ, E.I.; GARCÍA, P. Evaluation of city refuse compost maturity: **A review**. **Biol. Wastes**, v. 27, p. 115-142, 1989.
- JESUS, K. N. *et al.* Estoques de carbono em solos de Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n.3, p. 714-721, 2019.
- KHAN, N.I. *et al.* Allometric relationships of stem volume and standlevel carbon stocks at varying stand density in *Swietenia macrophylla* King plantations, Bangladesh. **Forest Ecology and Management**, v.430, p.639-648, 2018).
- KERSHAW JR, J. A. *et al.* Determination of tree volume, weight, and biomass. **Forest mensuration**, p. 135-183, 2017.
- KHOMO, L. *et al.* Impact of rainfall and topography on the distribution of claysand major cations in granitic catenas of southern Africa. **Catena**, v. 87, n.1, p. 119-128, 2011.

- KOOHAFKAN, P.; STEWART, B. A. **Water and Cereals in Drylands**. London: The Food And Agriculture Organization Of The United Nations And Earthscan. 105 p, 2008.
- LADHA, J. K.; REDDY, P. M. Nitrogen fixation in rice systems: state of knowledge and future prospects. **Plant and Soil**, v. 252, n. 1, p.151-167, 2003.
- LAMENZA, A.; PEREIRA, R. S.; JUNIOR, S.B. Comercialização e gestão de projetos de créditos de carbono no brasil. **Revista de Administração da UNIMEP**, v.15, n.1, 2017.
- DALLA LANA, M. et al. Carbon Content in Shrub-tree Species of the Caatinga. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 26, n. 2, e20170617, 2019.
- LIPINSKI, E. T. *et al.* Dinâmica da biomassa e carbono arbóreo entre 1995-2012 em floresta Ombrófila Mista Montana. **Floresta**, v. 47, n. 2, p. 197 – 206, 2017.
- LOPES, H. L. **Modelagem de parâmetros biofísicos para avaliação de risco à desertificação**. 118 f. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- LOPES, S. F. *et al.* The role of mountains as refugia for biodiversity in brazilian caatinga: conservationist implications. **Tropical Conservation Science, local**, v.10, n. 1, p.1-12, 2017.
- LORENA, R. B. *et al.* Emissões de dióxido de carbono advindas do corte de árvores isoladas na Fazenda Barreiro no município de Limeira do Oeste-MG. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 6, n. 1 p. 54-61, 2021.
- MAAS, G. C. B. *et al.* Quantification of carbon in forest necromass: state of the art. **Cerne**, v. 26, n. 1, 2020.
- MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. São Paulo: Leitura & Arte, 413 p, 2004.
- MARTINS, J. F. C. *et al.* Carbono nos componentes da biomassa de *Acacia mearnsii* De Wild. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5 n. 1 p. 32-38, 2020.
- MARTY, C. *et al.* The relationships of soil total nitrogen concentrations, pools and C: N ratios with climate, vegetation types and nitrate deposition in temperate and boreal forests of eastern Canada. **Catena**, v. 152, p.163-172, 2017.
- MCLAUCHLAN, K. K. The Nature and Longevity of Agricultural Impacts on Soil Carbon and Nutrients: A Review. **Ecosystems**, v. 9, n. 8, p.1364-1382, 2006a.
- MEDEIROS, A. S. *et al.* (2020). Análise de metodologia da cinética de evolução do CO₂ sob influência da temperatura e umidade do solo. Em: **A produção do conhecimento interdisciplinar nas ciências ambientais 3**. Ponta Grossa, PR: Atena.
- MEIRA, A. C. S. Estimativas de biomassa e carbono em área de Mata Atlântica, implantada por meio de reflorestamento misto. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 130- 134, 2020.
- MENDES, K. R. *et al.* Assessment of SITE for CO₂ and Energy Fluxes Simulations in a

Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga Ecosystem). **Forests**, v. 12, n. 86, 2021.

MENDES, K. R. *et al.* Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Scientific Reports**, v.10, n. 9454, 2020.

MENEZES, R. S. C. *et al.* Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. **Geoderma**, v. 390, n. 114943, 2021.

MOGES, A. *et al.* Land Use Effects on Soil Quality Indicators: A Case Study of Abo-Wonsho Southern Ethiopia. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2013, p.1-9, 2013.

MORAIS, Y. C. B *et al.* Análise do Sequestro de Carbono em Áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 585-599, 2017.

MORO, M. F. *et al.* The role of edaphic environment and climate in structuring phylogenetic pattern in seasonally dry tropical plant communities. **Plos One**, California, s/v., p. 1-18, 2015.

MOSIER, A. R. *et al.* Policy implications of human-accelerated nitrogen cycling. **The Nitrogen Cycle at Regional to Global Scales**, v. 57, n. 1, p.477-516, 2002.

MUSAVI, T. *et al.* Stand age and species richness dampen interannual variation of ecosystem-level photosynthetic capacity. **Nature Ecology e Evolution**, v. 1, n. 0048, 2017.

NDC. **Pretendida contribuição nacionalmente determinada**. 2016. Disponível em: http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf. Acessado em: 15 set 2021, 2016.

NICHOLS, W. F. *et al.* The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity II. A landscape perspective. **Conservation Biology**, Washington, v.12, n.2, p.371-379, 1998.

NUNNENKAMP, C.H.; CORTE, A.P.D. (2017). Emissão de gases de efeito estufa e proposta de projeto para compensação: um estudo de caso e-commerce. **BIOFIX Scientific Journal**, v.2, n.1, p.69-77.

OLIVEIRA, D.L. *et al.* Mercado de carbono no Brasil. **Revista Estudos**, v.38, n.2, p.249-299, 2011.

OSHER, L. J.; MATSON, P. A.; AMUNDSON, R. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii. **Biogeochemistry**, v. 65, n. 2, p.213-232, 2003.

PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. **IPCC**, Geneva, Switzerland, 151 pp.

PARMESAN, C. *et al.* (2013). Beyond climate change attribution in conservation and ecological research. **Ecology Letters**, v. 16, p. 58–71, 2013.

- PENG, Y. *et al.* Soil biochemical responses to nitrogen addition in a secondary evergreen broad-leaved forest ecosystem. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p.1-11, 2017.
- PRASAD, J. V. N. S. *et al.* Effect of ten years of reduced tillage and recycling of organic matter on crop yields, soil organic carbon and its fractions in Alfisols of semiarid tropics of southern India. **Soil and Tillage Research**, v. 156, p.131-139, 2016.
- PULLA, S. *et al.* Controls of Soil Spatial Variability in a Dry Tropical Forest. **Plos one**, Califórnia, v.11, n. 4, p.0153212, 2016.
- PUNCHI-MANAGE, R. *et al.* Effect of spatial processes and topography on structuring species assemblages in a Sri Lankan dipterocarp forest. **Ecology**, Tempe, v.95, n.2, p.376-386, 2014.
- RAWHOUSER, H. *et al.* Sustainability Standards and Stakeholder Engagement: Lessons from Carbon Market. **Organization and Environment**, v.31, n.3, p.263-282, 2018.
- REN, H. *et al.* Do sheep grazing patterns affect ecosystem functioning in steppe grassland ecosystems in Inner Mongolia? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 213, p.1-10, 2015.
- ROCHA, W. O. *et al.* Estimativa de biomassa vegetal e sequestro de carbono no Parque Natural Municipal Flor do Ipê, Várzea Grande, MT. **Multítemas**, v. 22, n. 51, p. 179-195, 2017.
- ROIK, M. *et al.* Aboveground biomass and Organic Carbon of native *Araucaria Angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Forest Management**, v. 27, n. 3, 2020.
- SÁ, J.C.D.M. *et al.* Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102–112, 2017.
- SACRAMENTO, J. A. A. S. *et al.* Soil carbon and nitrogen stocks in traditional agricultural and agroforestry systems in the semiarid region of Brazil. *Revista Brasileira Ciências do Solo*, v.37, n.3. 2013.
- SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Matéria orgânica do solo no bioma caatinga. In: SANTOS, Gabriel de A. *et al.* **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre. p. 419-441, 2008.
- SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R. Metodologias para determinação de biomassa florestal. In: **SIMPÓSIO LATINO AMERICANO SOBRE FIXAÇÃO DE CARBONO**, 2., Curitiba. Anais... Curitiba: Metodologias. 205p, 2004.
- SANQUETTA, C.R. *et al.* Carbon stock and removal of CO₂ in young stands of forest restoration in Rondônia. **Floresta**, v. 50, n. 1, p. 991 – 1000, 2020.
- SANQUETTA, C.R. *et al.* (2014). Floresta com araucária e suas transições: pesquisas ecológicas de longa duração. Curitiba: **Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD/CNPq)**.
- SAMPAIO, E. V. S. B. Overview of the Brazilian caatinga. In: BULLOCK, Stephen H.; MOONEY, Harold A.; MEDINA, Ernesto. **Seasonally Dry Tropical Forests**. California:

Cambridge University Press, 1995. p. 35-53, 1995.

SAMPAIO, E. V. S. B. Caracterização do bioma caatinga. In: GARIGLIO, M.A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. (Eds.), **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga**. Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, 48p, 2010.

SANQUETTA, C.R. *et al.* Comparison for data mining and allometric model in estimation of tree biomass. **BMC bioinformatics**, v.16, n.1, p.247-256, 2015.

SANTANA, M. DA S. *et al.* Carbon and nitrogen stocks of soils under different land uses in Pernambuco state, Brazil. **Geoderma Regional**, v.16, 2019.

SANTOS, M. O. *et al.* Efeito do manejo florestal da caatinga no estoque de carbono orgânico em agregados do solo. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 129, 2021.

SANTOS, R.C. *et al.* Estoques de volume, biomassa e carbono na madeira de espécies da Caatinga em Caicó, RN. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.36, n.85, p.1-7, 2016.

SANTOS, J. N. B. *et al.* Diversity and structure of the arbor component in ravine and flat land environmental conditions: A case study in tropical rainforest, Brazil. **Journal of Agriculture and Ecology Research International**, local, v.15, n. 2, p. 1- 18, 2018.

SANTOS, U. J. *et al.* (2018a). Land use changes the soil carbon stocks, microbial biomass and fatty acid methyl ester (FAME) in Brazilian semiarid area. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, p. 1-15, 2018a.

SANTOS, J. P. O.; EL-DEIR, S. G. Produção de gesso no araripe pernambucano: impactos ambientais e perspectivas futuras. **Revista AIDIS**, v.12, p.496-509, 2019.

SANTOS, U. J. *et al.* Soil organic carbon fractions and humic substances are affected by land uses of Caatinga forest in Brazil. **Arid Land Research and Management**, v. 1, p. 1-19, 2019.

SANTOS, W. B. **Vegetação lenhosa em altitudes no semiárido pernambucano: estrutura, potencial energético e fatores ambientais**. 182 f. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Florestais – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SARIYILDIZ, T.; SAVACI, G.; KRAVKAZ, I. S. K. Effects of tree species, stand age and land-use change on soil carbon and nitrogen stock rates in northwestern Turkey. **Iforest - Biogeosciences and Forestry**, v. 9, n. 1, p.165-170, 2016.

SCHLAGHAMERSKÝ, J. *et al.* Soil fauna across Central European sandstone ravines with temperature inversion: From cool and shady to dry and hot places. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.83, p.30-38, 2014.

SENADHEERA, D. K. L. *et al.* Livelihood and ecosystem benefits of carbon credits through rainforests: A case study of Hiniduma Bio-link, Sri Lanka. **Ecosystem Services**, v. 37, n. 100933, 2019.

SERENO, L.G.F.; ANDRADE, D.C. Perfil regional e setorial das emissões brasileiras de gases de efeito estufa entre 1990 e 2017. **Revista Iberoamericana de Economía**

Ecológica, v.32, n.1, p.22-46, 2020.

SHAOLIN, P. *et al.* Special ecological effects of ravines in Danxia Landform, China. **Acta Ecologica Sinica**, Pequim, v.28, n.7, p. 2947-2953, 2008.

SEIBERT, J.; STENDAHL, J.; SØRENSEN, R. Topographical influences on soil properties in boreal forests. **Geoderma**, Amsterdam, v. 141, n. 2, p.139-148, 2007.

SEIFFERT, M. E. B. (2009). **Mercado de carbono e Protocolo de Quioto**. São Paulo: Atlas.

SILVA, A. C. F. *et al.* Carbon in forest species of the Atlantic Forest as na indicator of stocks and quality. **Floresta**, v. 51, n. 3, p. 630-638, 2021.

SILVA, A.C.F. *et al.* Teores de carbono em espécies florestais da Caatinga. **Ciencias Florestais**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 71-85, 2022.

SILVA, B. B. *et al.* Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo - PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 57-64, 2013.

SILVA, C. A.; SOUZA, A. F. Aridity drives plant biogeographical sub regions inthe Caatinga, the largest tropical dry forest and woodland block in South America. **Plos one**, Califórnia, v. 13, n. 4, p. 0196130. 2018.

SILVA, D. V.; CRUZ, C. B. Tipologias de Caatinga: Uma Revisão em Apoio a Mapeamentos Através de Sensoriamento Remoto Orbital e GEOBIA. **Revista Do Departamento De Geografia**, v.35, p.113-120. 2018b.

SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. Caatinga:The larges ttropical dry forestr egiotin South America. [s.l:s.n.]. **Springer**. 2018.

SILVA, S.A. *et al.* Teores de Carbono Médios para Compartimentos e Espécies Florestais. **Enciclopédia Biosfera**, v.10, n.19, p.2990-3007, 2014.

SILVEIRA, P. *et al.* O estado da arte a estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v.38, n. 1, p. 185-206, 2008.

SOUTO, P. C. *et al.* Cinética da respiração edáfica em dois ambientes distintos no Semi-árido da Paraíba, Brasil. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 3, p. 52-58, 2009.

SOUTO, P. C.; *et al.* Taxa de decomposição da serapilheira e atividade microbiana em área de Caatinga. **Cerne**, v. 19, n. 4, p. 559-565, 2013.

SOUZA, B. V. *et al.* Carbon in soil in different phisionomies of Caatinga in Paraíba, Brazil. **Floresta**, v. 49, n. 2, p. 287-296, 2019.

TEWS, J. *et al.* Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/ diversity: the importance of keystone structures. **Journal of Biogeography**, Oxford, v.31, n.1, p.79-92, 2004.

TIAN, J. *et al.* Integrated management systems and N fertilization: effect on soil organic

- matter in rice-rapeseed rotation. **Plant and Soil**, v. 372, n. 1-2, p.53-63, 2013.
- THOMAS, S. C.; MARTIN, A. R. Carbon Content of Tree Tissues: A Synthesis. **Forests**, v. 3, p.332-352, 2012.
- VALENTINI, C. M. *et al.* Respiração do solo como bioindicador em áreas degradadas. **Revista Internacional de Ciências**, v.5, n.2. 2015.
- VERES, Q. J. I. *et al.* Estimativas de biomassa e carbono em fragmento de floresta estacional semidecidual no Oeste do Paraná. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5 n. 1 p. 23-31, 2020.
- WANG, B. *et al.* Estimating soil organic carbon stocks using different modelling techniques in the semi-arid rangelands of eastern Australia. **Ecological Indicators**, v. 88, p.425-438, 2018.
- ZANELLA, M.E. Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, n.36, Volume Especial, p. 126-142, 2014.
- ZANON, M. L.B.; FINGER, C. A. G. Relação de variáveis meteorológicas com o crescimento das árvores de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em povoamentos implantados. **Ciência Florestal**, v.20, n.3, p.467-476, 2010. <https://doi.org/10.5902/198050982061>.
- ZITER, C.; MACDOUGALL, A. S. Nutrients and defoliation increase soil carbon inputs in grassland. **Ecology**, v. 94, n. 1, p.106-116, 2013.
- ZHONG, X. *et al.* Physical protection by soil aggregates stabilizes soil organic carbon under simulated N deposition in a subtropical forest of China. **Geoderma**, v. 285, p.323-332, 2017.
- ZHU, X. *et al.* Interactions between earthworms and mesofauna effects CO₂ and N₂ emission from soils under long-term conservation tillage. **Geoderma**, v.332, p.153, 2018.

CAPÍTULO I

CARBONO E NITROGÊNIO NA BIOMASSA AÉREA DE ESPÉCIES DA FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE SECA NO NORDESTE BRASILEIRO

RESUMO

Estimativas do estoque de C e N em florestas favorecem o planejamento de manejos florestais sustentáveis, principalmente em florestas secas, em que a produção de biomassa é mais reduzida, limitando os estoques de C e N na vegetação, como é o caso de regiões secas do mundo, como a do Araripe no Brasil, principalmente pela elevada pressão antrópica sob a vegetação, em busca de madeira para geração de energia. Nessa região, é comum também uma sazonalidade climática e diferentes gradientes altimétricos, que afetam o desenvolvimento das espécies florestais. Assim, o objetivo deste estudo foi determinar os teores, estimar a biomassa aérea e quantificar o estoque de C e N em quatro espécies florestais distribuídas numa topossequência, em dois períodos do ano, no Araripe de Pernambuco, Brasil. O estudo foi realizado em nove fragmentos de floresta tropical sazonalmente seca localizados em três gradientes de altitude em uma topossequência, sendo três fragmentos em cada nível de altitude. As áreas dos fragmentos estão localizadas na região do Polo Gesseiro do Araripe, na Área de Proteção Ambiental da Chapada do Araripe, Sertão de Pernambuco. Em cada fragmento foram abertas 20 parcelas, totalizando 180 unidades amostrais retangulares, a partir dessa amostragem, realizou-se o levantamento fitossociológico, no qual determinaram-se as espécies que se repetem em todas as altitudes do relevo e que foram utilizadas nesse estudo para quantificação do estoque de C e N na vegetação. As coletas das amostras de material vegetal, ocorreram nos dois períodos extremos quanto a precipitação pluviométrica: úmido e seco (a primeira coleta foi realizada em março e a segunda em setembro de 2022). As espécies vegetais foram selecionadas com base na ocorrência dessas espécies em todos os ambientes de altitude. As espécies estudadas foram: *Annona leptopetala* (R.E.Fr.), *Bauhinia subclavata* Benth., *Guapira opposita* (Vell.) Reitz e *Combretum glaucocarpum* Mart. A estimativa da biomassa das folhas e do lenho por planta foi realizada por meio de equações alométricas e a biomassa por área foi obtida, utilizando-se os dados de densidade absoluta das espécies. Para calcular os estoques de C e N, determinou-se o teor de C e N nas folhas e no lenho. Os estoques de C e N por indivíduo, foram calculados através do produto dos teores de C e N pela biomassa do indivíduo naquela fração vegetal. Para o estoque total de C e N por área, calculou-se o produto do estoque individual pela densidade absoluta de cada espécie. Não houve diferença nos teores de C nas folhas das espécies, mas ocorreu para os teores de N, a *Guapira opposita* apresentou o maior teor de N. No entanto, tanto para C, como para N, esses teores não foram influenciados pelo ambiente de altitude nem pelo período do ano. As espécies florestais concentraram mais C no lenho no período úmido e mais N no período seco, tendo também concentrado mais C e N nas áreas de topo. A produção de biomassa de lenho foi de oito a dez vezes maior do que a biomassa de folhas, principalmente nos ambientes mais altos, destacando-se as espécies *Guapira opposita* e *Combretum glaucocarpum*. As espécies estocaram mais N nas folhas e C no lenho. Os estoques de C e N nas espécies *Guapira opposita* e *Combretum glaucocarpum* foram mais elevados. Portanto, planos de manejo na Chapada do Araripe devem monitorar o uso dessas espécies pela capacidade delas de armazenar, principalmente C. Os estoques de C e N se concentraram nas altitudes mais elevadas da Chapada do Araripe, que estocaram 92%, tanto do C, como do N. As áreas baixas da Chapada precisam ser mais preservadas, para qualquer que seja a ação antrópica da exploração da Caatinga.

Palavras-chave: Teor de N de espécies florestais; Teor de C de espécies florestais; Biomassa de folhas; Biomassa de lenho; Estoque de N; Estoque de C.

ABSTRACT

Estimates of C and N stocks in forests favor the planning of sustainable forest management, especially in dry forests, where biomass production is lower, limiting C and N stocks in vegetation, as is the case in dry regions of the country. world, such as Araripe in Brazil, mainly due to the high human pressure on the vegetation, in search of wood for energy generation. In this region, climatic seasonality and different elevation gradients are also common, which affect the development of forest species. Thus, the objective of this study was to determine the levels, estimate the aboveground biomass and quantify the stock of C and N in four forest species distributed in a toposequence, in two periods of the year, in Araripe de Pernambuco, Brazil. The study was carried out in nine fragments of seasonally dry tropical forest located in three altitude gradients in a toposequence, with three fragments at each altitude level. The fragment areas are located in the Araripe Gesseiro Pole region, in the Chapada do Araripe Environmental Protection Area, Sertão de Pernambuco. In each fragment, 20 plots were opened, totaling 180 rectangular sampling units. From this sampling, a phytosociological survey was carried out, in which the species that are repeated in all altitudes of the relief and that were used in this study for quantification were determined. of C and N stock in vegetation. The collection of samples of plant material took place in two extreme periods in terms of rainfall: wet and dry (the first collection was carried out in March and the second in September 2022). Plant species were selected based on the occurrence of these species in all high-altitude environments. The species studied were: *Annona leptopetala* (R.E.Fr.), *Bauhinia subclavata* Benth., *Guapira opposita* (Vell.) Reitz and *Combretum glaucocarpum* Mart. The biomass of leaves and wood per plant was estimated using allometric equations and the biomass per area was obtained using the absolute density data of the species. To calculate C and N stocks, the C and N content in leaves and wood was determined. The C and N stocks per individual were calculated through the product of the C and N contents by the individual's biomass in that plant fraction. For the total stock of C and N per area, the product of the individual stock and the absolute density of each species was calculated. There was no difference in C content in the leaves of the species, but there was a difference in N content, *Guapira opposita* had the highest N content. However, for both C and N, these levels were not influenced by the high altitude environment. nor by the period of the year. Forest species concentrated more C in wood in the wet period and more N in the dry period, also concentrating more C and N in the top areas. The production of wood biomass was eight to ten times greater than the biomass of leaves, especially in the highest environments, highlighting the species *Guapira opposita* and *Combretum glaucocarpum*. The species stored more N in leaves and C in wood. C and N stocks in the species *Guapira opposita* and *Combretum glaucocarpum* were higher. Therefore, management plans in Chapada do Araripe must monitor the use of these species due to their capacity to store, mainly C. C and N stocks were concentrated in the highest altitudes of Chapada do Araripe, which stored 92% of both C, as well as the N. The low-lying areas of Chapada need to be better preserved, for any human action involved in the exploitation of the Caatinga.

Keywords: N content of forest species; C content of forest species; Leaf biomass; Wood biomass; N stock; C stock.

1. INTRODUÇÃO

O Nordeste brasileiro abrange uma área de 1,55 milhões km², que corresponde a 18% do território nacional (IBGE, 2022). É nesta região que se localiza o Semiárido com uma extensão de 969.589 km², em que a sazonalidade da precipitação, bem como períodos marcados pela escassez das chuvas, ocasionando secas periódicas, é marcante, o que mantém uma relação direta com o comportamento da vegetação e dos solos.

O Araripe, situado nessa região, abrange os municípios de Araripina, Bodocó, Trindade, Ouricuri, Ipubi, Exu, Granito, Moreilândia, Santa Cruz e Santa Filomena em Pernambuco e é caracterizado pela presença do polo gesso, responsável por cerca de 95% da produção nacional de gesso minerado (IBGE, 2023). O Polo gesso do Araripe, agrupa 42 mineradoras, 174 calcinadoras e 748 fábricas de pré-moldados, totalizando 964 empresas que geram uma receita de R\$ 1,4 bilhão/ano para região, tendo como principal fonte de energia a biomassa florestal (SANTOS; EL-DEIR, 2019).

As florestas tropicais secas (FTS) que ocorrem no Araripe são bem adaptadas às condições de seca prolongadas, estando geralmente bem próximas dos limites biológicos para sustentação de suas fisionomias e apresentam considerável biomassa (ALLEN *et al.*, 2017; RITO *et al.*, 2017; AGUIRRE-GUTIÉRREZ *et al.*, 2019; CASTANHO *et al.*, 2020).

Entretanto, estudos têm demonstrado perdas dessa cobertura vegetal, em decorrência dos processos de exploração mineral da gipsita, além de atividades intensas de agricultura e pecuária que são desenvolvidas na região (SILVA; CRUZ, 2018), corroborando com o observado na região do Araripe, que tem sido afetada por fortes impactos ambientais, como poluição do ar e da água, além da degradação dos solos, como resultado da industrialização do gesso (SANTOS; EL-DEIR, 2019). Essa devastação ocorre devida a uma elevada demanda por biomassa para geração de energia, que é utilizada para calcinação do gesso mineral, muito utilizado na indústria da construção civil, resultando numa acelerada ação antrópica sobre a vegetação nativa, ocasionando a degradação de áreas e acelerando processos, que podem ocasionar a rápida desertificação desta região (SANTOS *et al.*, 2016). Além disso, esse bioma da Caatinga é responsável por um grande reservatório de C em sua biomassa acima do solo (MENEZES *et al.*, 2021).

No entanto, com a exploração intensa dessa vegetação nativa, precisa-se conhecer como as diferentes espécies desse ambientes estocam C, o que poderá auxiliar o desenvolvimento de futuros planos de manejo, que preservem as espécies mais

responsáveis pelos estoques de C.

Além da expressiva exploração destes ambientes, as FTS são marcadas pela complexa condição climática, em decorrência da distribuição irregular das chuvas e ocorrência de secas prolongadas, acarretando uma variabilidade da estrutura vegetal relacionada às condições edafoclimáticas, apontando a necessidade de estudos acerca da influência dessa sazonalidade sob esse tipo de formação vegetal; uma vez que, previsões de mudanças climáticas extremas em vários biomas tropicais podem acarretar no aumento da aridez nos próximos anos (HUANG *et al.*, 2017; XU *et al.*, 2019).

Além disso, esses fatores climáticos, principalmente, precipitação e temperatura também influenciam diretamente os estoques de C da biomassa acima do solo, sendo determinantes para esses estoques (ÁLVAREZ-DÁVILA *et al.*, 2017; DINTWE; OKIN, 2018; WIESMEIER *et al.*, 2019; CASTANHO *et al.*, 2020). Na região do Araripe, essa variação climática é influenciada pela topografia. As posições de topo (alta altitude), intermediárias (média altitude) e de planícies (baixa altitude) apresentam, geralmente, um gradiente de precipitação decrescente da alta para a baixa altitude, enquanto que a temperatura apresenta-se crescente nessa mesma topossequência. A combinação dessas diferentes altitudes e dos períodos úmidos e secos, podem diferenciar o desenvolvimento das espécies e, conseqüentemente, os estoques de C.

Nesse contexto, essas FTS apresentam elevado potencial para estocar C, consistindo em uma ferramenta altamente importante no contexto das mitigações climáticas, já que contribuem significativamente para absorção do C, estocando esse nutriente em sua biomassa e influenciando os fluxos de C atmosférico. Em consonância com o C, os estoques de N também são importantes nesses ambientes florestais, porque são reguladores de crescimento e muito relacionados com a produção de biomassa.

Dessa forma, como a biomassa vegetal retira CO₂ da atmosfera através da fotossíntese estocando em seu material vegetal, torna-se essencial estimar a biomassa e, conseqüentemente, sua capacidade de absorção de CO₂, principalmente nesses ambientes impactados pela exploração dessa vegetação. Por outro lado, o N absorvido pelas plantas através de suas raízes consiste em um indicativo da qualidade do solo e do ambiente.

Assim, estimativas do estoque de C e N em florestas, favorecem o planejamento de manejos florestais sustentáveis, principalmente em florestas secas, em que a produção de biomassa é mais reduzida, limitando os estoques de C e N na vegetação, como é o caso de regiões secas do mundo, como a do Araripe no Brasil, principalmente pela elevada pressão antrópica sob a vegetação, em busca de madeira para geração de energia.

A hipótese desse estudo é que o período com maior umidade tenha influência nos estoques de C e N das espécies e, que a altitude seja um fator chave nos estoques, sendo o ambiente com altitude mais elevada o que apresenta os maiores estoques desses elementos, considerando as melhores condições climáticas desse ambiente.

Diante do exposto, objetivou-se determinar os teores, estimar a biomassa aérea e quantificar o estoque de C e N, em dois períodos do ano, em quatro espécies florestais distribuídas numa topossequência, no Araripe de Pernambuco, Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em nove fragmentos de floresta tropical sazonalmente seca localizados em três gradientes de altitude numa topossequência, sendo três fragmentos em cada nível de altitude. As áreas dos fragmentos estão localizadas na região do Polo Gesseiro do Araripe, na Área de Proteção Ambiental (APA) da Chapada do Araripe, Sertão de Pernambuco (Figura 1).

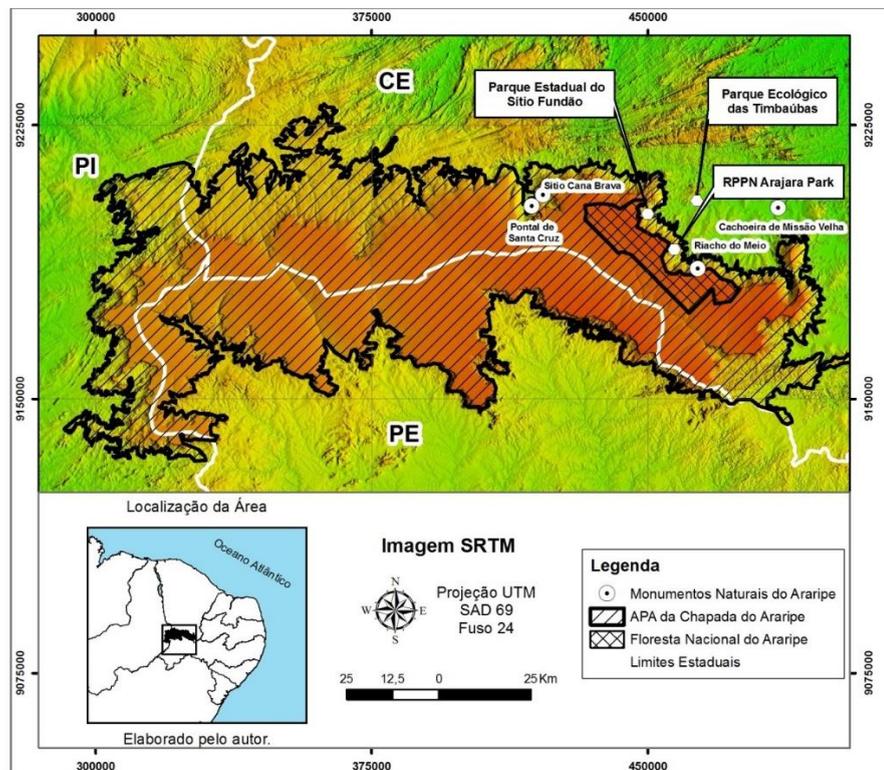


Figura 1. Localização da Área de Proteção Ambiental (APA) na Chapada do Araripe. Fonte: Bastos et al. (2016).

A região apresenta o clima do tipo BSh', quente e seco segundo a classificação de Köppen (1984), caracterizado como tropical zona equatorial, semiárido (ALVARES *et al.*, 2013). As altitudes variam, entre 400 e 1100 m, temperatura anual variável de 24 °C a 26 °C, chegando a 18 °C no mês mais frio. A precipitação anual é em torno de 500 mm e a estação seca chega a se prolongar de 7 a 10 meses, com estação chuvosa iniciando-se entre setembro e outubro (LOPES, 2005). A semiaridez é acentuada na parte mais baixa da Chapada do Araripe, onde os totais anuais precipitados variam entre 400 e 500 mm, enquanto que na parte mais alta, as precipitações atingem médias entre 700 e 800 mm (TORRES, 2018).

A formação vegetal do Araripe pernambucano apresenta fisionomias florestais distintas, e a formação vegetal da região é classificada como Caatinga do tipo Savana Estépica, que apresenta variações originadas pelos gradientes de altitudes e em área de transição denominada ecótono ecológico (IBGE, 2012; SANTOS *et al.*, 2020a.).

Observou-se na Chapada do Araripe variação edafoclimática das áreas de estudo, como fatores determinantes nas formações da tipologia vegetal para cada ambiente (alta altitude, média altitude e baixa altitude (Tabela 1).

Tabela 1. Localização e características climáticas, vegetais e de solo dos ambientes de baixa, média e alta altitude em floresta tropical seca ao longo de um dos fragmentos de cada topossequência no Araripe em Pernambuco, Brasil

Ambiente	Baixa altitude	Média altitude	Alta altitude
Localização	(07°46'58,28"S e 40°27'13,73"O)	(07°31'9,16"S e 40°30'54,01"O)	(07°25'36,28"S e 40°25'44,71"O)
Clima¹	BShw'	BShw'	BShw'
Altitude	540 m	664 m	847 m
Precipitação²	400-500 mm	400-500 mm	700-800 mm
Temperatura¹	24 a 26 °C	24 a 26 °C	24 a 26 °C
Domínio³	FTS ⁴	FTS	FTS
DA (ni ha⁻¹)⁵	872	1.688	1.288
H' (nats ha⁻¹)⁶	2,45	2,33	2,32
Solo	Argissolo Vermelho-	Neossolo	Latossolo Amarelo
Classificação	Amarelo ⁷	Litólico ⁷	distrófico ^{7,8}

¹Clima das estepes quentes de baixa latitude e altitude ou clima semiárido quente (ALVARES *et al.*, 2013); ²LOPES (2005); ³IBGE (2012); ⁴Floresta Tropical Seca; ⁵Densidade absoluta (número de indivíduos ha⁻¹); ⁶Índice de diversidade de Shannon-Wiener; ⁷EMBRAPA (2013); ⁸REZENDE (2017). FONTE: Freire (2018).

2.2 FRAGMENTOS FLORESTAIS ESTUDADOS

Os fragmentos florestais estudados foram previamente alocados de acordo com a sua posição no relevo e distribuídos em três diferentes altitudes, seguindo a seguinte nomenclatura: Ambiente de baixa altitude (BA), representado pelos fragmentos florestais com até 600 m de altitude; Ambiente de média altitude (MA), representado pelos fragmentos com altitude entre 600 e 750 m; e Ambiente de alta altitude (AA), representado pelos fragmentos com mais de 750 m de altitude, conforme proposto por Cunha (2017). Para cada uma dessas altitudes os fragmentos florestais foram previamente selecionados, tendo como principal critério, o bom estado de conservação das florestas nativas. Em cada altitude, selecionou-se três fragmentos, considerando-se como as repetições experimentais.

Em cada fragmento foram abertas 20 parcelas permanentes alocadas sistematicamente a 25 m uma das outras, totalizando 180 unidades amostrais retangulares, com dimensões de 10 x 25 m, somando uma área amostral de 4,5 ha, sendo 1,5 ha por altitude. A partir dessa amostragem, realizou-se o levantamento fitossociológico, no qual determinaram-se as espécies que se repetem em todas as altitudes do relevo e que foram utilizadas nesse estudo para quantificação do estoque de C e N na vegetação (SANTOS *et al.*, 2020).

2.3 PERÍODOS AVALIADOS

Foram obtidos dados de precipitação anual e mensal, provenientes da base de dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e temperatura do ar, proveniente da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estes dados foram disponibilizados pelo Laboratório de Meteorologia do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (LAMEP/ITEP) e permitiram calcular a precipitação pluviométrica dos últimos 10 anos (2012-2022), demonstrando uma irregularidade no regime hídrico da região, cujo acumulado mensal oscilou entre 140 mm (março) e quase zero mm (agosto/setembro), sendo os meses de janeiro a março os mais chuvosos e agosto e setembro os mais secos, com temperatura média de 26,0 °C, sendo os meses de janeiro/novembro/dezembro os mais quentes e junho/julho/setembro os meses mais frios (Figura 2A). Também foi possível observar uma irregularidade no regime hídrico da região em 2022, ano de coleta dos dados, cujo acumulado mensal oscilou entre 200 mm (março)

e 6 mm (agosto/setembro), sendo os meses de janeiro e março os mais chuvosos e agosto e setembro os mais secos, com temperatura média de 27,0 °C, com os meses de setembro e outubro os mais quentes e junho/julho os meses mais frios (Figura 2B).

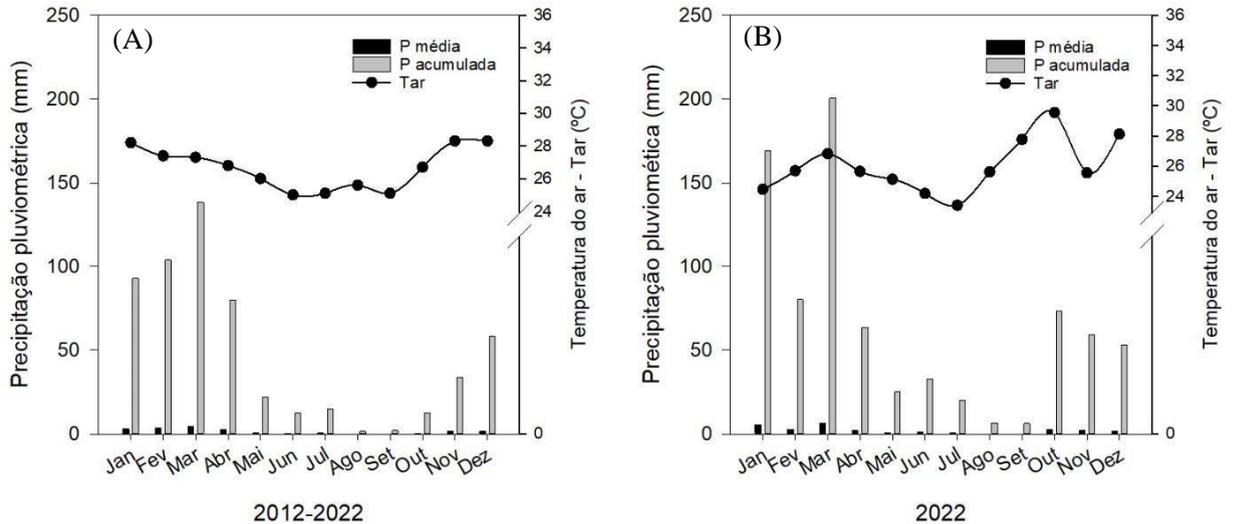


Figura 2. Variação da precipitação pluviométrica média e acumulada e da temperatura entre a série histórica de 2012 a 2022 e o ano de 2022, no Araripe em Pernambuco, Brasil.

De posse dos dados de pluviosidade e temperatura da série histórica, foram definidos quatro períodos: Úmido, seco e de transição úmido-seco e seco-úmido (Figura 3). Sendo considerado os meses de janeiro a março como período úmido, cuja precipitação acumulada foi em média 110 mm; Junho a setembro como período seco, com precipitação acumulada média de 10 mm; e os períodos de transição: Úmido-seco representado pelos meses de abril e maio; e Seco-úmido representado pelos meses outubro a dezembro com médias de 48 mm, respectivamente.

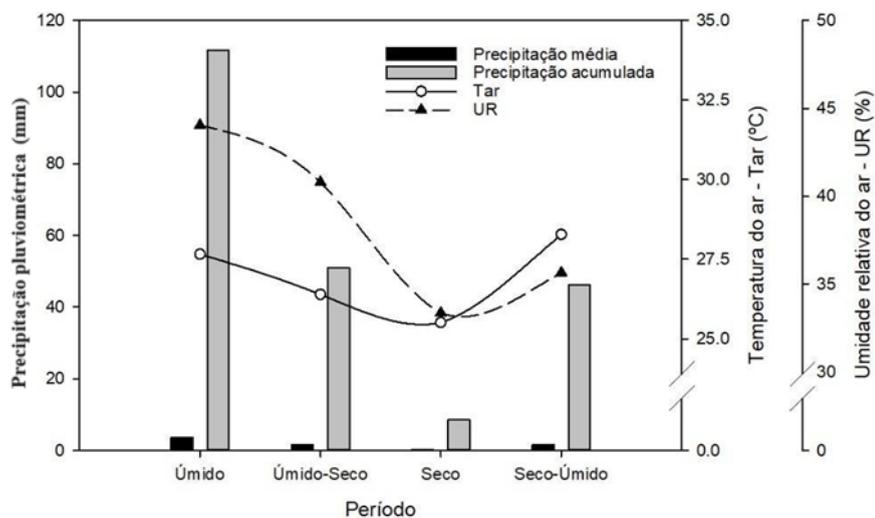


Figura 3. Série histórica de 2012 a 2022 da precipitação pluviométrica, temperatura e

umidade, mostrando a média acumulada da precipitação e a precipitação média dos períodos anuais definidos como, úmido e seco e suas transições: Úmido-seco e seco-úmido, bem com a temperatura e a umidade relativa média, no Araripe em Pernambuco, Brasil.

As coletas das amostras de material vegetal ocorreram nos dois períodos extremos quanto à precipitação pluviométrica: Úmido e Seco. A primeira coleta foi realizada em março e a segunda em setembro de 2022. A determinação dos períodos de transição foram para caracterizar melhor os períodos úmido e seco e garantir que a amostragem fosse realizada apenas nessas condições hídricas. Assim, notou-se que tanto para a precipitação média mensal do período, quanto para o acumulado da precipitação, a média histórica de precipitação do período seco dos últimos dez anos foi inferior ao ano de 2022 (Figura 4A e B), caracterizando uma maior condição histórica de umidade na região em 2022, sendo esse ano, portanto, mais úmido do que a média histórica. Entretanto, como a coleta desse período ocorreu em setembro, pode-se dizer que setembro/2022 não foi diferente do setembro dos últimos dez anos.

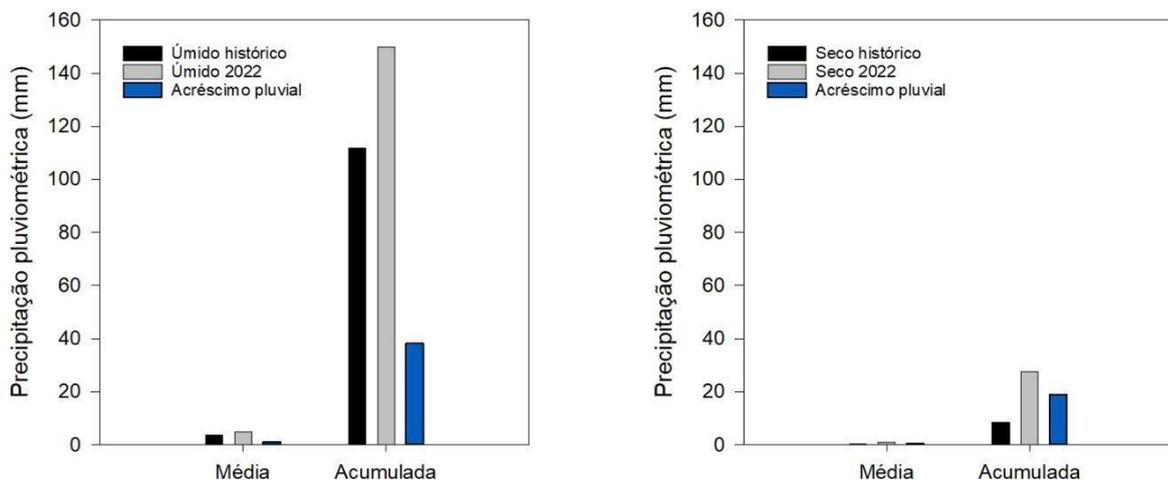


Figura 4. Comparação da precipitação pluviométrica média e acumulada nos períodos úmido (A) e seco (B) entre a série histórica de 2012 a 2022 e o ano de 2022, no Araripe em Pernambuco, Brasil.

2.4 SELEÇÃO DAS ESPÉCIES VEGETAIS

As espécies vegetais foram selecionadas com base na sua ocorrência em todos os ambientes de altitude, ou seja, foi critério de escolha das espécies vegetais essa condição de ocorrer simultaneamente nas três condições de diferentes altitudes na toposequência. Essa escolha foi possível porque se utilizou os dados do levantamento florístico e

fitossociológico de indivíduos adultos realizado por Santos (2019), nos três ambientes de diferentes altimetrias. Assim, foram selecionadas espécies de diferentes famílias botânicas e com diferentes densidades absolutas (Tabela 2).

Tabela 2. Espécies florestais selecionadas de ocorrência simultânea em todos os ambientes de diferentes altitudes e suas respectivas distribuições nos fragmentos no Araripe em Pernambuco, Brasil

Espécie	Nome popular	Família	Altitude		
			Baixa	Média	Alta
			Densidade absoluta (ind. ha⁻¹)		
<i>Annona leptopetala</i> (R.E.Fr.)	Bananinha	Annonaceae	110	42	126
<i>Bauhinia subclavata</i> Benth.	Mororo	Fabaceae	64	26	12
<i>Guapira opposita</i> (Vell.) Reitz	Pau Piranha	Nyctaginaceae	48	160	434
<i>Combretum glaucocarpum</i> Mart.	Sipaúba	Combretaceae	16	956	62

2.5 ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA E CÁLCULO DOS ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO

A estimativa da biomassa das folhas (MF) e do lenho (MCG) por planta foi realizada por meio de equações alométricas ajustadas por Silva; Sampaio (2008), em espécies lenhosas com diâmetro a altura do peito (DAP) igual ou maior a 3,0 cm, através do método não destrutivo, levando em consideração as medidas da altura à 1,30 m do solo (CAP) em todos os indivíduos das quatro espécies arbóreas selecionadas. Essas equações alométricas foram desenvolvidas para espécies vegetais em floresta tropical seca, como na região do Araripe (Tabela 3).

Tabela 3. Equações alométricas utilizadas para estimativa da biomassa aérea de folhas e lenho em floresta tropical seca de acordo com Silva; Sampaio (2008)

Partes da planta	Equação
¹ Lenho (² DAP > 10,0 cm)	³ $\bar{Y} = 0,0082 \times \text{DAP}^{2,8151}$
Lenho (5.1 < DAP ≤ 10,0 cm)	$\bar{Y} = 0,1331 \times \text{DAP}^{1,5784}$
Lenho (1.1 ≤ DAP ≤ 5,0 cm)	$\bar{Y} = 0,5737 \times \text{DAP}^{1,6847}$
Folhas	$\bar{Y} = 0,1900 \times \text{DAP}^{2,0515}$

¹Lenho = caule + galhos; ²DAP = Diâmetro à altura do peito (cm); ³ \bar{Y} = Biomassa (kg).

A estimativa da biomassa da parte aérea (MPA) composta pelas folhas (MF) e lenho (MCG), em cada espécie, foi obtida da seguinte forma: Foram selecionados de cada espécie cinco indivíduos sadios, semelhantes quanto ao porte e ao desenvolvimento vegetativo em cada ambiente de diferentes altitudes e, sempre que possível, nos três fragmentos que representavam cada ambiente de diferentes altitudes, de modo que a amostragem dos indivíduos representasse a distribuição da espécie na alta, média e baixa altitude. Nesses indivíduos mensurou-se o DAP e aplicou-se as equações alométricas específicas para cada classe de DAP, bem como a equação específica para as folhas (Tabela 3). Por fim, obteve-se a biomassa média por indivíduo de cada espécie selecionada, tanto para folhas, quanto para lenho (caule + galhos), bem como para biomassa da parte aérea (folhas + lenho).

Essa estimativa de biomassa só foi possível no período úmido, porque no período seco ocorre perda das folhas, tendo-se que a biomassa da parte aérea no período seco é representada apenas pela biomassa do lenho. A biomassa da parte aérea total por área também foi calculada da seguinte forma: com os dados de DAP (SANTOS, 2019) de todos os indivíduos de cada espécie selecionada, obteve-se o DAP médio da espécie, obtendo-se, em seguida, a biomassa média de folhas e a biomassa média de lenho (Tabela 3). Assim, com os dados de densidade absoluta de cada espécie, pôde-se obter a biomassa de folhas por área, a biomassa de lenho por área e a biomassa da parte aérea total por área, para cada espécie selecionada.

Para determinar os estoques de C e N, inicialmente é necessário mensurar o teor ou a concentração de C e N nas folhas e no lenho, ou seja, na biomassa vegetal. Para determinação dos teores de C e N na biomassa vegetal, foram selecionados de cada espécie cinco indivíduos sadios, semelhantes quanto ao porte e ao desenvolvimento vegetativo. Foram amostradas folhas recém-maduras e sadias localizadas nos quatro pontos cardinais do terço médio superior da copa das árvores, bem como, amostras do lenho coletadas pelo método não destrutivo, utilizando broca adaptada com serra-copo. As amostras foram secas em estufa a 60 °C até obtenção do peso constante e, posteriormente, moídas em moinho tipo Willey, determinando-se os teores de C e N, através de analisador elementar, via combustão seca.

Os estoques de C e N por indivíduo, foram calculados através do produto dos teores de C e N determinados na parte aérea (folhas e lenho, separadamente) pela biomassa do indivíduo naquela fração vegetal. Para o estoque total de C e N por área, calculou-se o produto do estoque individual pela densidade absoluta de cada espécie.

2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) e de homogeneidade das variâncias com teste de Levene (BROWN; FORSYTRE, 1974), ambos ao nível de 5% de probabilidade.

Realizou-se posteriormente análise de variância (ANOVA) para cada variável, com sua significância sendo testada a partir dos valores encontrados no teste de Fisher (Teste F). Quando o F calculado das variáveis, através de seus efeitos principais ou interações, foi significativo ($p < 0,05$), aplicou-se teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para as variáveis de biomassa aérea, estoque de C e N, isolou-se o efeito do período (úmido e seco) e avaliou-se estatisticamente apenas os efeitos do ambiente de altitude e as espécies em cada período. Como a biomassa de folhas não pôde ser estimada no período seco, os estoques de C e N também não puderam ser calculados nessa fração. Nesse período seco, calculou-se os estoques de C e N, considerando-se apenas a biomassa do lenho, sendo, portanto, semelhante à biomassa total da parte aérea. No entanto, as variáveis relacionadas aos teores de C e N nesses períodos puderam ser determinadas, permitindo-se uma avaliação estatística para essas variáveis estudando-se os três fatores conjuntamente (período do ano, ambiente de altitude e espécies). Em todos esses casos, quando as interações entre os fatores foram significativas pelo teste F ($p < 0,05$), desdobrou-se o fatorial, estudando-se o efeito de um fator dentro do outro. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do *software* SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2014).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 TEORES DE CARBONO E NITROGÊNIO DAS ESPÉCIES FLORESTAIS NOS DIFERENTES AMBIENTES DE ALTITUDE E NOS DIFERENTES PERÍODOS DO ANO

Não foi observada diferença significativa para os teores de C nas folhas entre as espécies avaliadas em relação aos ambientes e períodos do ano (Tabela 4). Portanto, as espécies florestais apresentaram teores de C nas folhas semelhantes, ou seja, a fotossíntese se manteve ativa tanto no período seco, como no úmido.

No que diz respeito aos teores de N nessas mesmas folhas, a ANOVA revelou que as espécies se diferenciaram, mas esses mesmos teores não foram influenciados pelos ambientes de altitude, nem pelos períodos do ano, ou seja, as diferenças entre espécies podem ser atribuídas às características intrínsecas das espécies (Tabela 4).

Os teores tanto de C, como de N no lenho, se diferenciaram entre as espécies e essas diferenças foram também devidas ao efeito do ambiente de altitude e do período do ano (Tabela 4).

Tabela 4. Valores de F calculado na análise de variância (ANOVA) das espécies florestais arbóreas nativas e dos ambientes de altitude (alta, média e baixa) em relação aos teores de carbono nas folhas (Cf) e no lenho (Cm) e nitrogênio nas folhas (Nf) e no lenho (Nm), no Araripe em Pernambuco, Brasil

Fontes de variação	Cf	Cm	Nf	Nm
Espécie florestal	0,21 ^{ns}	14,48 ^{**}	28,45 ^{**}	1,92 ^{ns}
Ambiente de altitude	1,20 ^{ns}	2,99 ^{ns}	0,44 ^{ns}	6,74 ^{**}
Período do ano	0,52 ^{ns}	15,03 ^{**}	0,02 ^{ns}	96,90 ^{**}
Espécie x Ambiente	0,50 ^{ns}	3,36 ^{**}	1,63 ^{ns}	2,41 [*]
Espécie x Período	1,30 ^{ns}	4,44 ^{**}	2,23 ^{ns}	13,63 ^{**}
Ambiente x Período	0,23 ^{ns}	2,08 ^{ns}	5,06 ^{ns}	4,34 [*]
Espécie x Ambiente x Período	0,21 ^{ns}	0,23 ^{ns}	8,45 ^{ns}	0,55 ^{ns}
CV (%)	4,31	9,27	6,35	51,48

*, ** e *** Significativo a 5, 1 e 0,01% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

^{ns}Não significativo.

As espécies florestais concentraram mais C no lenho no período úmido do que no período seco, independente do ambiente de altitude (Figura 5). Isso sugere que os planos de manejo devem concentrar os cortes da Caatinga nos períodos mais secos, preservando os estoques de C nos períodos úmidos. Os dados de teores de C no lenho mostraram uma diferença em torno de 3%, evidenciando uma mais elevada eficiência fotossintética no período úmido, mesmo havendo uma mais baixa luminosidade nesse período (SANTOS *et al.*, 2023).

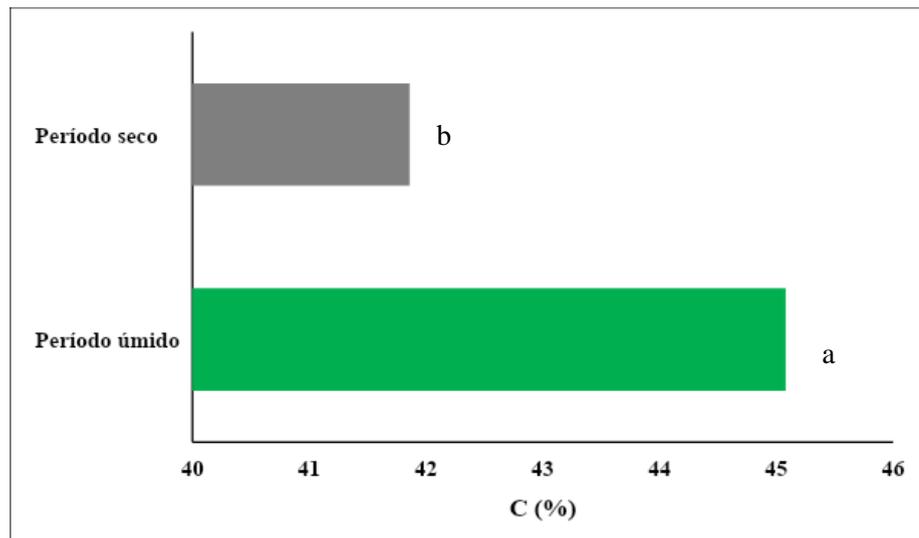


Figura 5. Teor de carbono no lenho das espécies florestais nos períodos seco e úmido, independente do ambiente de altitude, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Médias representadas por letras minúsculas semelhantes não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Quando se estudou o teor de C no lenho das espécies nos diferentes ambientes de altitude, independente do período do ano, observou-se os teores de C no Mororó e na Sipaúba não foram influenciados pelos ambientes de altitude, enquanto que o Pau piranha concentrou mais C no ambiente de mais elevada altitude e a Bananinha na média e alta altitude (Tabela 5). De maneira geral, o Pau piranha apresentou os mais baixos teores de C no lenho, tendo as altitudes mais baixas, influenciado negativamente essa concentração de C nessa espécie (Tabela 5). O Mororó, Bananinha e Sipaúba, em média, apresentaram teores de C no lenho semelhantes, tendo também as espécies, concentrado mais C no ambiente de mais alta altitude (Tabela 5). Qualquer que seja o plano de manejo na Chapada do Araripe, essa diferenciação precisa ser considerada, para que o C desses ambientes seja mais preservado. Da mesma forma, o teor de C no Pau piranha indicou que essa espécie pode ser incluída em um plano de manejo, como espécie suscetível de corte, mantendo-se a concentração de C dos ambientes.

Por outro lado, quando se estudou o comportamento dos teores de C no lenho das espécies nos diferentes períodos do ano, observou-se que a Bananinha apresentou uma elevada concentração de C no período úmido, enquanto que as demais espécies não foram influenciadas pelo período do ano, no entanto, no período seco, essa espécie reduz sua concentração de C no lenho e o Mororo e a Sipauba, elevam suas concentrações de C (Tabela 5).

Tabela 5. Teor de carbono no lenho das espécies florestais em função do ambiente de altitude e do período do ano, no Araripe em Pernambuco, Brasil

Espécie florestal	AMBIENTE DE ALTITUDE			Média/espécie
	Baixa	Média	Alta	
	%			
Mororo	46,62 Aa	45,02 Aa	45,59 Aa	45,74
Bananinha	40,31 BCb	47,12 Aa	46,73 Aa	44,72
Sipauba	44,77 ABa	44,74 Aa	43,74 Aa	44,42
Pau piranha	36,61 Cb	36,73 Bb	42,71 Aa	38,68
Média/ambiente	42,08	43,40	44,69	

Espécie florestal	PERÍODO DO ANO		Média/espécie
	Seco	Úmido	
	%		
Mororo	45,30 Aa	46,20 Aa	45,74
Bananinha	40,54 BCb	48,90 Aa	44,72
Sipauba	43,41 ABa	45,42 Aa	44,42
Pau piranha	37,86 Ca	39,34 Ba	38,68
Média/ambiente	41,78	44,97	

Médias representadas por letras minúsculas semelhantes nas linhas e maiúsculas nas colunas não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). A média do teor de C nas folhas das espécies florestais, independente do ambiente de altitude e do período do ano foi de 58,82%.

O teor de N nas folhas das espécies florestais não foi influenciado pelos diferentes ambientes de altitude e nem pelos períodos do ano (Tabela 4). O Pau piranha se diferenciou entre as espécies (Figura 6), apesar de não ser da família das Fabácea, como o Mororó (Tabela 2). A eficiência da absorção de N pode estar influenciando mais a concentração de N nas folhas dessa espécie do que a capacidade de fixação do N_2 atmosférico do Mororó, corroborando com os resultados encontrados por Raulino *et al.*, 2020. No entanto, essa maior capacidade de concentrar N em sua estrutura foliar, que eleva o crescimento vegetativo e, conseqüentemente, a capacidade de fotossintetizar, não elevou a concentração de C do Pau piranha, porque as espécies não se diferenciaram quanto aos teores de desse elemento em sua biomassa foliar (Tabela 4).

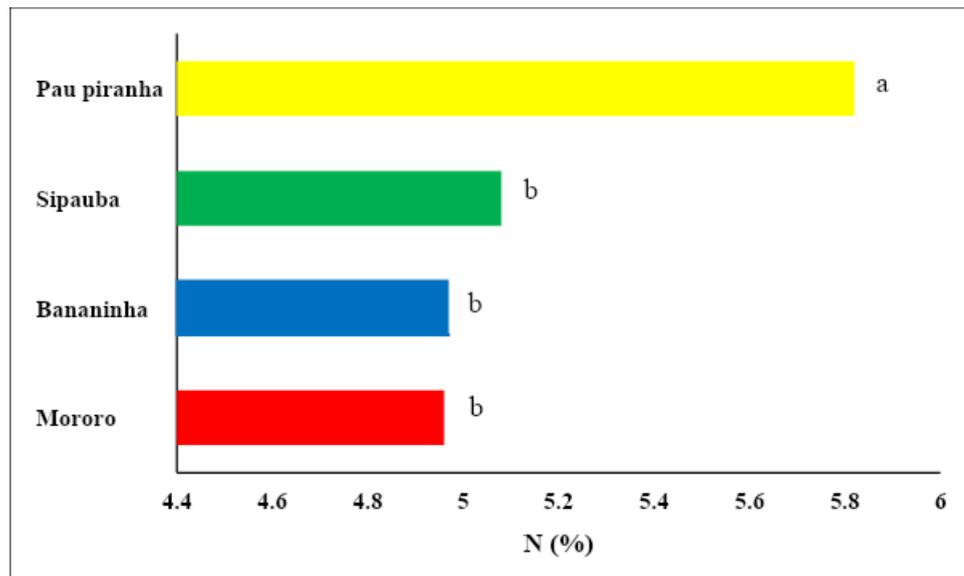


Figura 6. Teor de nitrogênio nas folhas das espécies florestais independente do ambiente de altitude e do período do ano, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Médias representadas por letras minúsculas semelhantes não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Quando se estudou, o teor de N no lenho das espécies florestais, observou-se que esses teores foram influenciados pelos diferentes ambientes de altitude e período do ano, bem como os ambientes influenciaram o teor de N das espécies, nos diferentes períodos (Tabelas 4 e 6). O Pau piranha que apresentou uma elevada concentração de N nas folhas (Figura 6), foi a espécie que menos concentrou N no lenho, principalmente nas altitudes mais elevadas (Tabela 6). Nos ambientes mais baixos, o teor de N se reduz consideravelmente, independente das espécies e o Mororo só expressa sua elevada capacidade de fixar N_2 atmosférico no ambiente mais elevado, porém não se diferencia da Bananinha e da Sipaubá (Tabela 6).

Outra observação importante, é que as espécies apresentaram elevados teores de N no lenho no período seco, com exceção do Pau piranha, que não foi influenciado pelo período do ano (Tabela 6). No entanto, os teores de C, nesse mesmo período, foram menores (Tabela 5). Assim, há uma considerável redução da relação C/N no período seco e um elevado aumento no período úmido, principalmente em ambientes mais baixos (Tabelas 5 e 6). Isso pode tornar a decomposição da matéria orgânica no período úmido mais lenta, embora a serapilheira desses ambientes florestais seja majoritariamente formada pelas estruturas foliares. Por outro lado, no período seco, em que a decomposição é mais lenta pela falta de umidade, essa redução da relação C/N pode favorecer a decomposição, mantendo a ciclagem de nutrientes, inclusive de N, nesse período. Estudos

apontam que a biomassa em florestas tropicais é consideravelmente maior que nas florestas tropicais secas, ocasionando um maior estoque nutricional (LIMA *et al.*, 2018; RAULINO *et al.*, 2020), essa variação de biomassa é atribuída em áreas de florestas secas principalmente a baixa precipitação e a distribuição irregular das chuvas (LIMA JÚNIOR *et al.*, 2014).

Tabela 6. Teor de nitrogênio no lenho das espécies florestais em função do ambiente de altitude e do período do ano, bem como do ambiente de altitude em função do período do ano, no Araripe em Pernambuco, Brasil

AMBIENTE DE ALTITUDE				
Espécie florestal				Média/espécie
	Baixa	Média	Alta	
	%			
Mororo	0,72 Ab	1,40 ABab	1,95 Aa	1,36
Bananinha	1,18 Aa	1,56 ABa	1,74 ABa	1,49
Sipauba	0,80 Ab	1,95 Aa	1,68 Aba	1,48
Pau piranha	1,25 Aa	0,93 Ba	1,02 Ba	1,07
Média/ambiente	0,99	1,46	1,60	
PERÍODO DO ANO				
Espécie florestal			Média/espécie	
	Seco	Úmido		
	%			
Mororo	2,07 Aa	0,65 ABb	1,36	
Bananinha	2,68 Aa	0,31 Bb	1,49	
Sipauba	2,40 Aa	0,55 ABb	1,48	
Pau piranha	1,04 Ba	1,10 Aa	1,07	
Média/período	2,05	0,65		
PERÍODO DO ANO				
Ambiente de altitude			Média/ambiente	
	Seco	Úmido		
	%			
Baixa	1,41 Ba	0,56 Ab	0,99	
Média	2,20 Aa	0,72 Ab	1,46	
Alta	2,53 Aa	0,67 Ab	1,60	
Média/período	2,05	0,65		

Médias representadas por letras minúsculas semelhantes nas linhas e maiúsculas nas colunas não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para estudar a produção de biomassa aérea das espécies florestais, bem como os estoques de C e N nessa biomassa, isolou-se os períodos do ano pela dificuldade de se mensurar a biomassa de folhas no período seco e, conseqüentemente, os estoques de C e N.

3.2 PERÍODO ÚMIDO

3.2.1 BIOMASSA DA PARTE AÉREA

Os dados de biomassa da parte aérea mostraram uma interação significativa entre espécies e ambiente de altitude, evidenciando que o desenvolvimento da biomassa das espécies está diretamente relacionado com ambiente de altitude em que a espécie estava inserida (Tabela 7).

Tabela 7. Valores de F calculado na análise de variância (ANOVA) das espécies florestais arbóreas nativas e dos ambientes de altitude (alta, média e baixa) em relação a produção de biomassa de folhas (MF), lenho (MCG) e parte aérea (MPA), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil

Fontes de variação	MF	MCG	MPA
Espécie florestal	24,79***	16,90***	17,43***
Ambiente de altitude	6,25***	4,35**	4,34**
Espécie x Ambiente	5,58***	4,83***	4,89***
CV (%)	39,29	75,33	69,19

** e *** Significativo a 1 e 0,01% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Observou-se que a MF obteve médias variando entre 0,9 a 5,8 kg indivíduo⁻¹, enquanto que a MCG apresentou médias entre 2,50 e 41,8 kg indivíduo⁻¹ (Figura 7). Estes resultados mostraram que a fração foliar aportou menos biomassa nas espécies, corroborando com outros estudos que mostraram a fração lenhosa com maiores aportes de biomassa, quando comparada a biomassa da fração foliar (ALVES, 2011; DALLAGNOL *et al.*, 2012; DALLA LANA, 2017, SILVA *et al.*, 2022b).

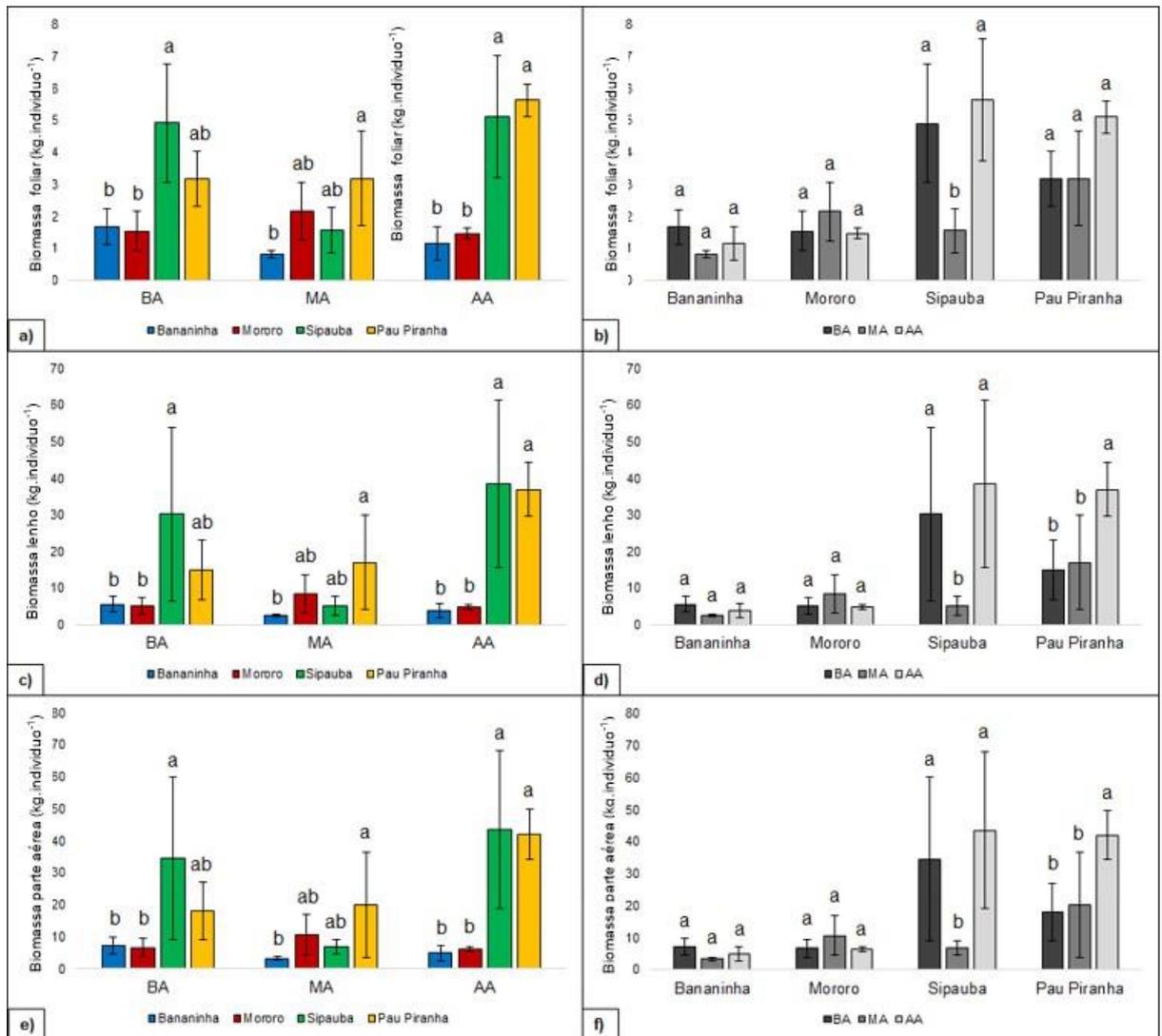


Figura 7. Produção de biomassa de folha, do lenho e da parte aérea das espécies florestais arbóreas nativas em cada ambiente de altitude (a, c, e) e influência do ambiente de altitude na produção dessa biomassa (b, d, f), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Médias representadas por letras minúsculas semelhantes das espécies florestais em cada ambiente de altitude (a, c, e) e dos ambientes de altitude em cada espécie (b, d, f) não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). BA = Baixa altitude; MA = Média altitude; e AA = Alta altitude.

A variação dos valores de biomassa entre as espécies pode estar relacionada a fatores como a idade, densidade específica da madeira, porte das árvores, ou até mesmo por defeitos como fuste oco (SILVA *et al.*, 2022b).

Os resultados sugeriram que há uma distribuição preferencial da biomassa vegetal entre os compartimentos nessas espécies e a biomassa alocada no lenho aumentou, enquanto diminuiu a alocação nas folhas, refutando os resultados encontrados em estudos de produção de mudas realizados por AVELINO *et al.* (2021).

De maneira geral, as espécies Sipaúba e Pau Piranha foram as que apresentaram as

maiores produções de biomassa (Figura 7), com valores próximos aos encontrados em outros estudos, com espécies nativas de florestas secas (DALLA LANA, 2017; SALAMI, 2020). A produção de biomassa de lenho e da parte aérea da espécie Pau piranha apresentou um melhor desempenho no ambiente de alta altitude, diferindo dos ambientes de altitudes menores (Figuras 8d, f).

A Sipaubá também apresentou uma elevada produção de biomassa, tanto na baixa, como na alta altitude, diferindo-se do Mororo e da Bananinha, porém, assemelhando-se a produção de biomassa do Pau piranha (Figuras 7a, b, c). Quando se avaliou seu desempenho nas diferentes altitudes, a Sipaubá mostrou versatilidade de crescer semelhantemente, nesses dois ambientes. Isso sugeriu, que as diferentes condições edafoclimáticas desses dois ambientes ambíguos (Tabela 1), não influenciaram o crescimento da Sipaubá, embora que a densidade absoluta dessa espécie no ambiente de alta altitude tenha sido em torno de quatro vezes maior do que no ambiente de baixa altitude.

A bananinha e o Mororo apresentaram as menores produções de biomassa, principalmente no ambiente de alta altitude, quando comparadas às produções de biomassa da Sipaubá e do Pau piranha (Figuras 7a, b, c). Tanto a Bananinha, como o Mororo, não melhoraram suas produções de biomassa nos outros ambientes (baixa e média altitude) (Figuras 7b, d, e), mostrando um baixo crescimento dessas espécies no Araripe.

Estes resultados podem ser um indicativo de que as espécies Sipaubá e Pau Piranha são mais influenciadas pela altitude e apresentaram melhor adaptação nos ambientes mais altos em decorrência das melhores condições de luz e umidade.

Ambientes diferentes podem influenciar no porte da vegetação, assim como as diferentes formas de usos da lenha pelas comunidades, no entanto, na literatura o valor da biomassa está frequentemente associado ao valor de importância, caracterizando maiores percentagens do total de biomassa nas áreas (SILVA *et al.*, 2022b).

3.2.2 ESTOQUES DE CARBONO

Os estoques de C na fração folha (EC_f), lenhosa (EC_m) e total (EC_t) mostraram interação entre as espécies florestais e os ambientes de altitude, indicando que o estoque de C das espécies dependeu de sua posição topográfica na Chapada do Araripe (Tabela 8).

Trata-se de um indicativo que as espécies estudadas e as altitudes do relevo estão se correlacionando entre si, possivelmente em decorrência dos diferentes aportes de

biomassa, ocasionando variações nos estoques de C.

Tabela 8. Valores de F calculado na análise de variância (ANOVA) das espécies florestais arbóreas nativas e dos ambientes de altitude (alta, média e baixa) em relação aos estoques de carbono nas folhas (ECf), lenho (ECm) e parte aérea (ECt), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil

Fonte de variação	ECf	ECm	ECt
Espécie florestal	23,94 ^{***}	14,08 ^{***}	15,31 ^{***}
Ambiente de altitude	5,37 ^{***}	4,24 ^{**}	4,53 ^{**}
Espécie x Ambiente	5,73 ^{***}	5,12 ^{***}	5,23 ^{***}
CV (%)	38,05	77,09	68,40

** e *** Significativo a 1 e 0,01% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Os resultados obtidos para os estoques de C nas folhas mostraram que as médias variaram entre 0,47 a 3,84 kg indivíduo⁻¹ (Figura 8). As espécies Pau Piranha e Sipaúba apresentaram os maiores estoques nas folhas, diferindo das demais espécies nos ambientes de baixa e alta altitude (Figura 9a). No ambiente de média altitude, a Pau Piranha apresentou maior estoque de C na folha, sendo de 1,87 kg indivíduo⁻¹. Entretanto, não diferiu da espécie Mororó (Figura 8a), provavelmente em decorrência dos valores de biomassa do Mororó, que não diferiram dos de Pau piranha neste ambiente (Figura 7a). A espécie Bananinha apresentou o mais baixo estoque de C na folha, sendo de 0,47 kg indivíduo⁻¹, não diferindo do estoque de C da Sipaúba (Figura 8a). Com relação aos estoques de C da fração lenhosa e estoque de C total, as espécies Pau Piranha e Sipaúba apresentaram os maiores estoques nos ambientes de baixa e alta altitude, contudo no ambiente de baixa altitude, a Pau Piranha não diferiu da Bananinha e do Mororo (Figuras 8b, c).

Os estoques de C da Bananinha e do Mororó não diferiram entre os ambientes em nenhuma das frações estudadas (Figuras 8b, d, e). A espécie Pau Piranha apresentou maiores estoques de C nas três frações no ambiente mais alto, enquanto que, a Sipaúba diferiu das demais espécies no ambiente de média altitude, no qual apresentou os menores estoques de C nas três frações (Figura 8b, d, e).

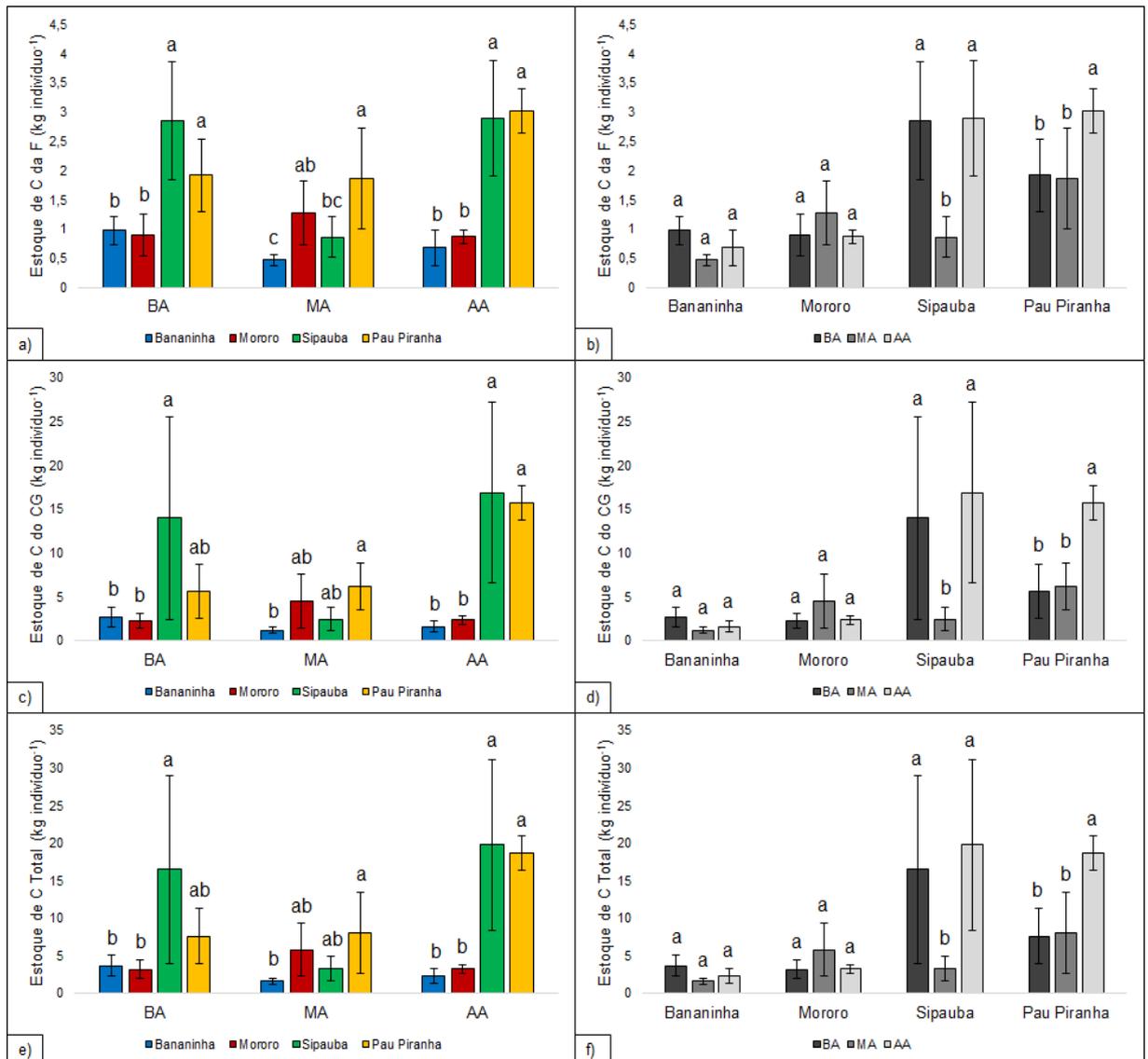


Figura 8. Estoque de carbono na folha, no lenho e total na parte aérea das espécies florestais arbóreas nativas em cada ambiente de altitude (a, c, e) e influência do ambiente de altitude nos estoques desse carbono (b, d, f), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Médias representadas por letras minúsculas semelhantes das espécies florestais em cada ambiente de altitude (a, c, e) e dos ambientes de altitude em cada espécie (b, d, f) não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). BA = Baixa altitude; MA = Média altitude; e AA = Alta altitude.

É comum ocorrer uma variação nos estoques do C entre espécies e ambientes, visto que são fatores que promovem alterações na densidade da madeira e na taxa de crescimento. Algumas espécies são capazes de produzir madeira mais densa e armazenar mais C e vice-versa, espécies que crescem em solos ricos em nutrientes ou em áreas com mais luz solar armazenam mais C e, por fim, algumas espécies são mais eficientes na utilização e na captação do C em sua biomassa. Estudos apontam sobre a capacidade que as diferentes espécies e ambientes têm, em estocar carbono distintamente, considerando

ainda que este potencial de sequestro do carbono depende além da tipologia florestal e da idade da floresta, também das características do fuste (MARINHO JUNIOR *et al.*, 2020; TERAUNPISUT *et al.*, 2007).

Estudos de avaliação dos estoques de C e ciclagem deste elemento em formações florestais podem limitar o desmatamento como estratégia de mitigação das mudanças atmosféricas globais e redução das taxas de emissões de CO₂, visto que, a maior fonte de emissões de gases de efeito estufa, são os desmatamentos e a degradação florestal, principalmente nos países tropicais (CHATURVEDI *et al.*, 2011).

3.2.3 ESTOQUES DE NITROGÊNIO

O nitrogênio é um elemento fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas, participando de funções importantes como a produção de proteínas e de clorofila, metabolismo e resistência a doenças e pragas.

O valor de F calculado da interação entre espécies florestais e ambiente de altitude foi significativo para o estoque de N na fração foliar ($p < 0,01$) e estoque de N total da parte aérea ($p < 0,05$). O estoque de N não apresentou interação significativa, tendo sido observado apenas significância dos efeitos principais, ou seja, as espécies florestais se comportaram da mesma maneira, independente da influência do ambiente de altitude e vice-versa (Tabela 9).

Tabela 9. Valores de F calculado na análise de variância (ANOVA) das espécies florestais arbóreas nativas e dos ambientes de altitude (alta, média e baixa) em relação aos estoques de nitrogênio nas folhas (ENf), lenho (ENm) e parte aérea (ENt), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil

Fontes de variação	ENf	ENm	ENt
Espécie florestal	28,67***	22,86***	25,27***
Ambiente de altitude	4,31**	3,65**	3,34**
Espécie x Ambiente	5,26***	1,71 ^{ns}	2,73**
CV (%)	40,28	79,75	59,39

** e *** Significativo a 1 e 0,01% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. ^{ns}Não significativo.

Observando as médias do estoque de N na fração lenhosa, a espécie Pau Piranha diferiu das demais, apresentando-se como a espécie com maior estoque de N nessa fração (Figura 9a), caracterizando-se como uma espécie com mecanismos mais eficientes na

absorção e utilização de N, tendo apresentado também, de maneira geral, elevados valores de acúmulo de biomassa (Figura 7).

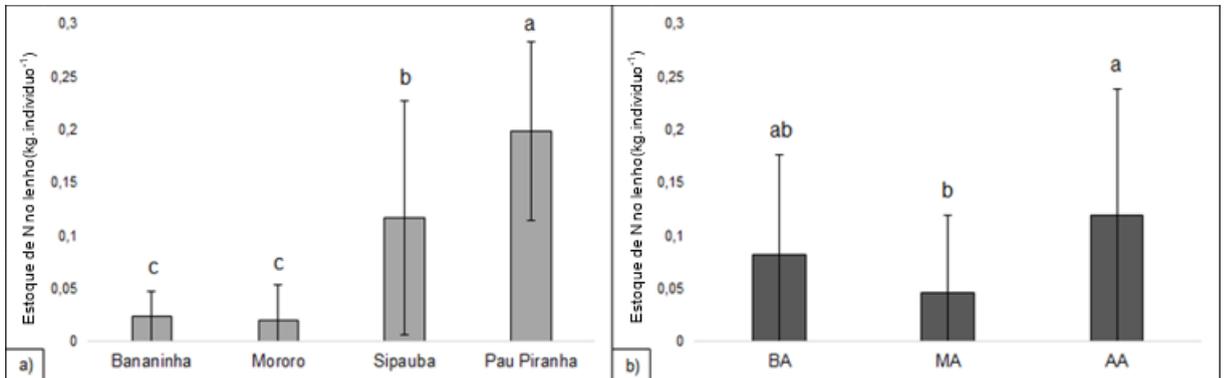


Figura 9. Estoque de nitrogênio no lenho das espécies florestais arbóreas nativas (a) e nos ambientes de altitude (b), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Médias representadas por letras minúsculas semelhantes das espécies florestais (a) e dos ambientes de altitude em (b) não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). BA = Baixa altitude; MA = Média altitude; e AA = Alta altitude.

As espécies Bananinha e Mororó não se mostraram diferentes entre si e apresentaram os menores estoques de N na fração lenhosa (Figura 9a), resultado atribuído, principalmente, devido aos baixos valores de biomassa encontrados para essas espécies (Figura 7a, b, c).

Considerando as variações entre ambientes, é possível visualizar que os estoques de N na fração lenhosa dos ambientes de alta e baixa altitude apresentaram as maiores médias e não diferiram entre si, assim como houve semelhança entre os ambientes de baixa e média altitude, tendo apenas o ambiente de alta altitude se diferenciado do ambiente de média altitude (Figura 9b).

Os estoques de N nas folhas de Pau Piranha e Sipaúba foram maiores e diferiram das demais espécies nos ambientes de baixa e alta altitude (Figura 10a). No ambiente de média altitude, o Pau Piranha não diferiu do Mororó em decorrência da elevada produção de biomassa do Mororo nesse ambiente (Figura 7a). O estoque de N total na parte aérea da Sipaúba e Pau Piranha não diferiu das demais espécies nos ambientes de baixa a alta altitude, sendo diferente das demais espécies. No ambiente de média altitude, o Pau Piranha diferiu das demais espécies, evidenciando uma maior eficiência de absorção do N dessa espécie neste ambiente (Figura 10b).

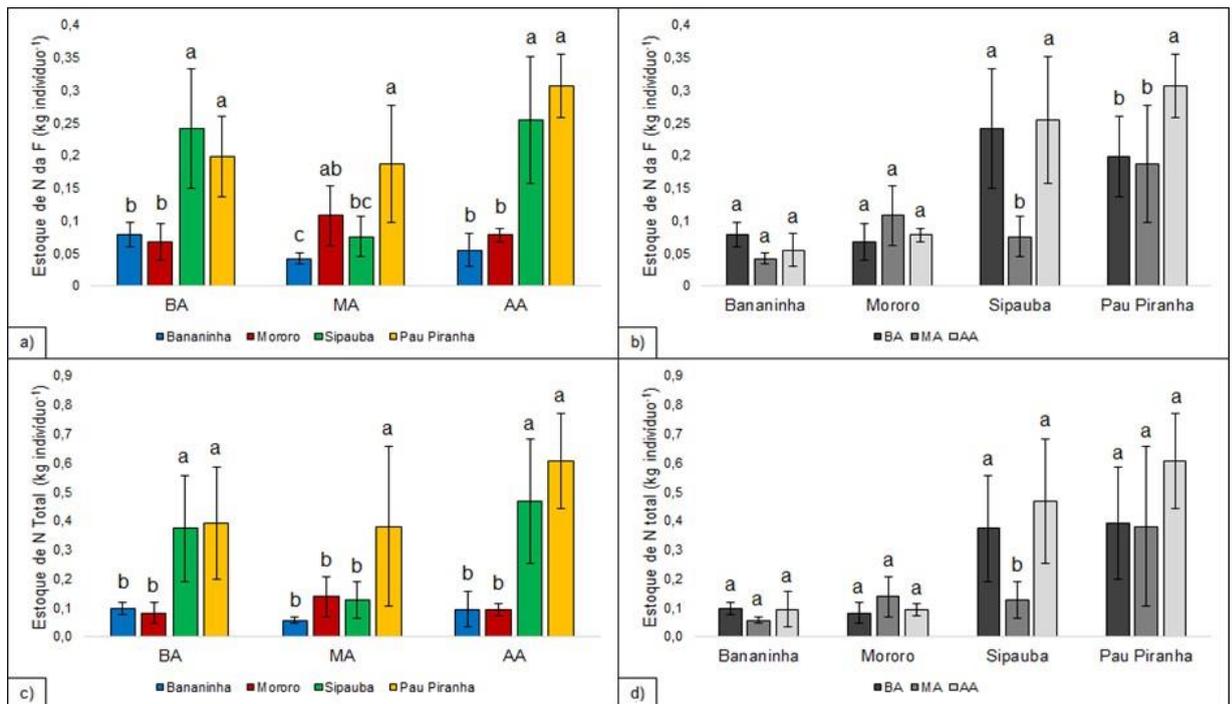


Figura 10. Estoque de nitrogênio na folha e total na parte aérea das espécies florestais arbóreas nativas em cada ambiente de altitude (a, c) e influência do ambiente de altitude nos estoques desse nitrogênio (b, d), em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Médias representadas por letras minúsculas semelhantes das espécies florestais em cada ambiente de altitude (a, c) e dos ambientes de altitude em cada espécie (b, d) não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). BA = Baixa altitude; MA = Média altitude; e AA = Alta altitude.

Valores elevados de N em espécies florestais no período úmido, podem se dá em decorrência da decomposição da matéria orgânica que se intensifica no ambiente de florestas secas no período chuvoso (ALBUQUERQUE *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2018).

A eficiência de utilização biológica de nutrientes pelas espécies é uma relação entre a biomassa foliar e o conteúdo do nutriente (BARROS, NOVAIS; CARMO, 1986; LIMA *et al.*, 2018). Essa eficiência para o N consiste em quanto do nutriente uma planta utiliza para produzir biomassa ou crescer e essa medida varia entre espécies florestais de acordo com o tipo de microrganismo presente no solo, disponibilidade de outros nutrientes, clima, temperatura, umidade e outros fatores ambientais (ESPIG *et al.*, 2008). Além disso, Faregia e Baligar (1993) citam características fisiológicas e morfológicas almejavéis para que as espécies obtenham alta eficiência na absorção dos nutrientes: modificação da rizosfera em função da baixa disponibilidade de nutrientes; manutenção normal do metabolismo com baixo teor de nutrientes nos tecidos e alta taxa fotossintética; relação elevada de raízes/parte aérea; sistema radicular eficiente; sistema radicular extensivo; presença de micorrizas no sistema radicular; e bactérias que promovam o crescimento e auxiliem na fixação do N₂

atmosférico.

Indivíduos arbóreos como a Sipaúba e Pau Piranha sugerem ser espécies florestais propícias para reflorestar e restaurar ambientes perturbados, bem como, consiste em espécies favoráveis ao manejo de plantios florestais e nas mitigações dos impactos ambientais, principalmente nessa região do Araripe, em que há uma exploração muito acentuada da Caatinga para uso energético e calcinação da gipsita.

3.3 PERÍODO SECO

3.3.1 ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO

A ANOVA mostrou que o valor de F calculado da interação espécies florestais e ambiente de altitude foi significativo para os dados de estoque de C e N no lenho (Tabela 10), ou seja, as espécies estocaram C e N de forma diferente e essas diferenças dependeram do ambiente de altitude. No caso específico desse período seco, as espécies são impactadas pela perda de folhas, o que desfavorece a absorção, principalmente de C nesse período, porque as folhas são as maiores responsáveis pela fotossíntese, ou seja, captura de CO₂. Assim, o estoque de C e N, nesse período, fica limitado ao lenho, representado pelo caule e galhos.

Tabela 10. Valores de F calculado na análise de variância (ANOVA) das espécies florestais arbóreas nativas e dos ambientes de altitude (alta, média e baixa) em relação aos estoques de carbono no lenho (ECm) e nitrogênio no lenho (ENm), em período seco, no Araripe em Pernambuco, Brasil.

Fonte de variação	ECm	ENm
Espécie florestal	2,91 ^{ns}	10,07 ^{***}
Ambiente de altitude	0,19 ^{ns}	7,37 ^{***}
Espécie x Ambiente	5,13 ^{**}	3,60 ^{***}
CV (%)	49,20	77,51

** e *** Significativo a 1 e 0,01% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. ns = Não significativo.

Estudos relataram que espécies decíduas e de rápido crescimento podem ter melhor sobrevivência sob condições de aquecimento climático, inferindo numa possível mudança na abundância relativa de espécies perenifólias e caducifólias de florestas tropicais secas,

considerando-se que ao perder as folhas, essas espécies requerem uma quantidade de C disponível menor levando vantagem no sistema (PINHEIRO, COSTA, ARAÚJO, 2013; DOUGHTY *et al.*, 2014; SINGH, KUSHWAHA, 2016; MOURA, 2020).

A irregularidade na distribuição das chuvas, os extensos períodos de déficit hídrico aliados às temperaturas elevadas e radiação solar intensa, acarretam estresse para as espécies vegetais, fazendo com que as mesmas percam suas folhas como forma de sobrevivência. A grande maioria das espécies adaptadas a Caatinga são caducifólias (SAMPAIO, 1995). Longos períodos de estiagem interferem nas propriedades estruturais das florestas tropicais secas, fazendo com que tenham adaptações associadas à resistência, tolerância e estresse hídrico (SINGH; KUSHWAHA, 2016), além de alterar os padrões de crescimento vegetativo, na fisiologia e fenologia (SANTOS *et al.*, 2014; ALLEN *et al.*, 2017).

O estoque de C no lenho da Sipaúba diferiu das demais espécies no ambiente de baixa altitude. No ambiente de alta altitude a Pau Piranha e a Sipaúba foram as espécies que mais estocaram C em sua biomassa lenhosa, diferindo das demais espécies. Não houve diferença entre espécies no ambiente de média altitude (Figura 11a). A Bananinha e o Mororó não apresentaram estoques de C diferentes entre os ambientes. No período seco, o ambiente de média altitude estocou C em sua biomassa de lenho de maneira mais uniforme e, diferentemente do período úmido, não apresentou diferenças entre as espécies (Figura 11a e 9a). A Sipaúba no ambiente de média altitude apresentou baixo estoque de C, diferindo dos demais ambientes e o Pau Piranha estocou mais C no ambiente de maior altitude (Figura 11b).

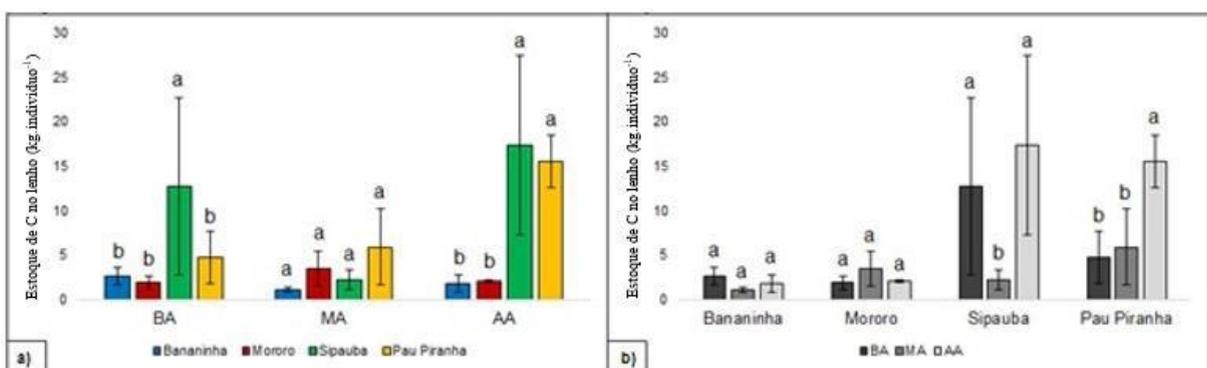


Figura 11. Estoque de carbono e nitrogênio no lenho das espécies florestais arbóreas nativas em cada ambiente de altitude (a) e influência do ambiente de altitude nos estoques desse carbono e nitrogênio (b), em período seco, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Médias representadas por letras minúsculas semelhantes das espécies florestais em cada ambiente de altitude (a, c) e dos ambientes de altitude em cada espécie (b, d) não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). BA = Baixa altitude; MA = Média altitude; e AA = Alta altitude.

Projeções climáticas futuras alertam para combinação de menores intensidades de

chuva, menor umidade relativa do ar, aumento das temperaturas e uma tendência a frequência maior de longos períodos de estiagem (MARENGO; BERNASCONI, 2015; MARENGO; TORRES; ALVES, 2017; SILLMANN *et al.*, 2013; XU *et al.*, 2019). Logo, o aumento da condição de aridez prevista para ambientes de florestas secas, poderá ocasionar redução dos estoques de C na biomassa aérea das espécies florestais desses ambientes (MOURA, 2020).

Estoques de N na biomassa das estruturas lenhosas entre espécies não diferiram nos ambientes de baixa e média altitude, enquanto que no ambiente de alta altitude, a Sipaúba apresentou maior estoque de N, diferindo das demais espécies, mas não diferiu de Pau Piranha (Figura 11c). Em relação às diferenças dos estoques de N pelas espécies entre os diferentes ambientes de altitude, não foram constatadas diferenças entre as espécies, com exceção da Sipaúba, que no ambiente de média altitude apresentou maior estoque, diferindo dos demais ambientes (Figura 11d).

Mesmo no período seco, os regimes pluviométricos em ambientes mais elevados da Chapada do Araripe são maiores do que em áreas mais baixas, ocasionando uma maior disponibilidade de N para absorção das plantas (RAULINO *et al.*, 2020).

Como a absorção de N pelas plantas pode ser influenciada por fatores como a disponibilidade de água e temperatura do solo (GURGEL *et al.*, 2020), a absorção de nutrientes pelas raízes das plantas depende da quantidade de água disponível no solo (MALAVOLTA, 2006) e, em condições de seca, essa absorção pode ser limitada, devido à redução dessa disponibilidade de água.

No entanto, é arriscado afirmar que as plantas absorvem mais ou menos nutrientes em decorrência do clima, já que essa absorção não depende exclusivamente deste fator, mas de um conjunto de fatores, dentre eles a eficiência de absorver e assimilar N pela espécie e a fertilidade do solo (BREDEMEIER; MUNDSTOCK, 2000).

A partir dos estoques de nutrientes de uma espécie é possível identificar quais espécies possuem maior quantidade armazenada de um nutriente, possibilitando a indicação das mesmas para determinados ambientes (RAULINO *et al.*, 2020). Diante disso, podemos citar a Sipaúba e o Pau Piranha como espécies indicadas como promissoras para ambientes de baixa e alta altitude na Chapada do Araripe, com pouca disponibilidade de N no solo, visto que, foram as que mais estocaram o nutriente em sua biomassa.

3.4 ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO POR ÁREA

Os estoques de C e N por área no período úmido, para cada estrutura vegetativa (folhas e lenho) das espécies florestais e, por ambiente de altitude, mostraram que as espécies estocaram mais N nas folhas e C no lenho (Figura 12). Essa diferença foi uma consequência do maior teor de N nas folhas (Figura 6) do que no lenho (Tabela 6), representando um aumento de 233%, o que não aconteceu com os teores de C, que apesar de serem superiores na folha em relação ao lenho (Tabela 5), representou um aumento de apenas 35%.

Os estoques de N e C nas espécies Sipaubá e Pau piranha foram bem mais elevados do que nas espécies Bananinha e Mororo, independente do ambiente de altitude (Figura 12). Portanto, os planos de manejo na Chapada do Araripe devem monitorar o uso dessas espécies pela capacidade delas de armazenar, principalmente C. Entretanto, quando se estudou o desempenho da Sipaubá e Pau piranha nos diferentes ambientes de altitude, observou-se um menor estoque de nas áreas de baixada (Figuras 12e, f, g, h), tendo a Sipaubá estocado mais C e N na área de média altitude (Figura 12e, f) e Pau piranha na área de topo da Chapada do Araripe (Figura 12g, h).

O estoque de C e N do Mororo foi decrescente da baixada para o topo (Figura 12c, d) e a Bananinha estocou mais C e N nas áreas de baixada e topo (Figuras 12a, b).

Os estoques de N e C se concentraram nas altitudes mais elevadas da Chapada do Araripe, independente das espécies florestais (Figura 13). Essa é uma constatação importante, porque as áreas baixas da Chapada precisam ser mais preservadas, para qualquer que seja a ação antrópica da exploração da Caatinga. Essa redução abrupta nos estoques de N e C compromete o ambiente de maneira geral, sob diversos aspectos físicos, químicos e biológicos. Por outro lado, é necessário ampliar o estoque de N e C nas regiões de topo, pela importância que elas têm na preservação da Chapada do Araripe, em seu aspecto edafoclimático. Alterações significativas nessas regiões de topo, comprometem, inclusive as regiões mais baixas, impactando severamente o meio ambiente.

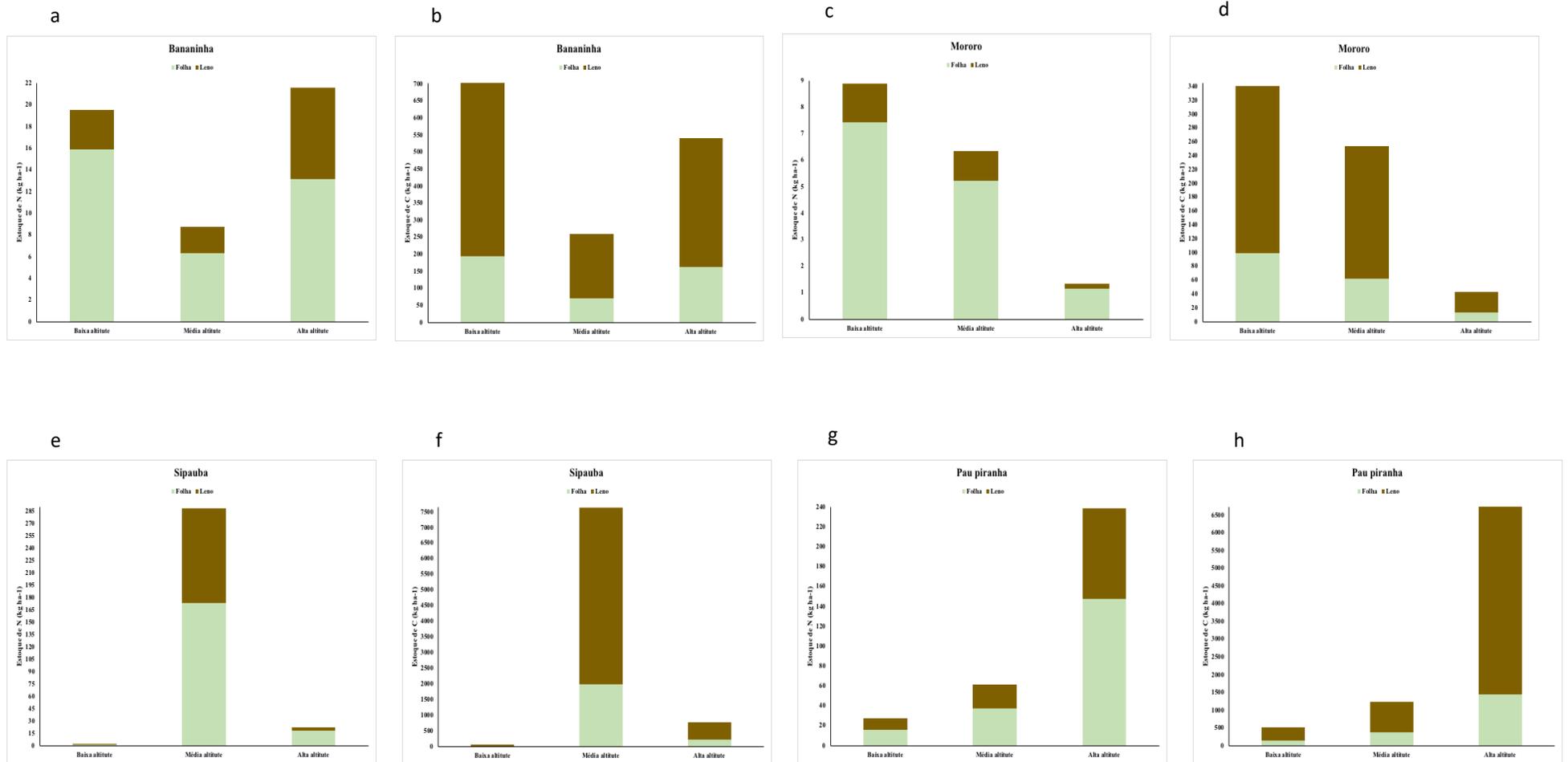


Figura 12. Estoque de nitrogênio nas folhas e no lenho (a, c, e, g), bem como carbono nas folhas e no lenho (b, d, f, h) por área das espécies florestais arbóreas nativas em cada ambiente de altitude, em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil.

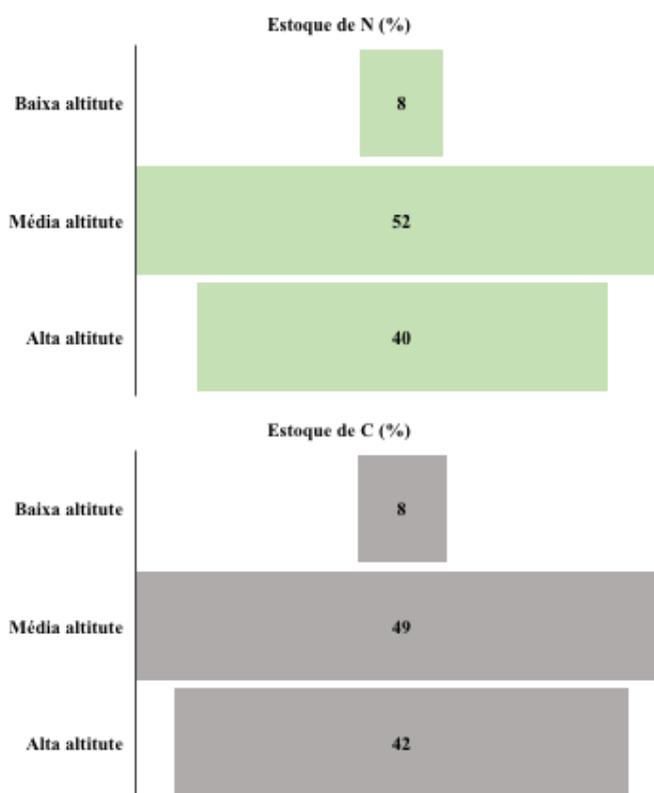


Figura 13. Distribuição percentual do estoque de nitrogênio e carbono das espécies florestais arbóreas nativas em cada ambiente de altitude, em período úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil.

4. CONCLUSÃO

Não houve diferença nos teores de C nas folhas das espécies, mas ocorreu para os teores de N, sendo a *Guapira opposita* a espécie que apresentou o maior teor de N. No entanto, tanto

para C, como para N, esses teores não foram influenciados, nem pelo ambiente de altitude e nem pelo período do ano.

As espécies florestais concentraram mais C no lenho no período úmido e mais N no período seco, tendo também concentrado mais C e N nas áreas de topo.

A produção de biomassa de lenho foi de oito a dez vezes maior do que a biomassa de folhas, principalmente nos ambientes mais altos, destacando-se as espécies *Guapira opposita* e *Combretum glaucocarpum*, como as maiores produtoras de biomassa, sugerindo

que essas espécies possam efetivamente integrarem o plano de manejo da região, principalmente nas áreas mais elevadas da Chapada do Araripe.

As espécies estocaram mais N nas folhas e C no lenho. Os estoques de C e N nas espécies *Guapira opposita* e *Combretum glaucocarpum* foram maiores do que nas espécies *Annona leptopetala* e *Bauhinia subclavata*. Portanto, os planos de manejo na Chapada do Araripe devem monitorar o uso dessas espécies pela capacidade delas de armazenar, principalmente C.

Os estoques de C e N se concentraram nas altitudes mais elevadas da Chapada do Araripe, que estocaram 92%, tanto do C, como do N. Essa é uma constatação importante, porque as áreas baixas da Chapada precisam ser mais preservadas, para qualquer que seja a ação antrópica da exploração da Caatinga.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE-GUTIÉRREZ, Jesus *et al.* Drier tropical forests are susceptible to functional changes in response to a long-term drought. **Ecology Letters**, v. 22, n. 5, p. 855–865, 2019.

ALBUQUERQUE, A.S. *et al.* Efficiency og Biological Utilization of Micronutrients by Forests Species in Hypoxerophytic Caatinga. **Floresta e Ambiente**, v.25, p. 1-10. 2018.

ALLEN, Kara *et al.* Will seasonally dry tropical forests be sensitive or resistant to future changes in rainfall regimes? **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 2, 2017.

ALVARES, C. A. *et al.* Koppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711 – 728, 2013.

ÁLVAREZ-DÁVILA, E. *et al.* Forest biomass density across large climate gradients in northern South America is related to water availability but not with temperature. **Plos One**, v. 12, n. 3, p. 1–16, 2017.

ALVES, A. R. **Quantificação de biomassa e ciclagem de nutrientes em áreas de vegetação de caatinga no município de Floresta**. 2011. 116 f. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2011.

AMORIM, I. L. *et al.* Flora e estrutura da vegetação arbustivo-arbórea de uma área de caatinga do Seridó, RN, Brasil. **Acta botânica brasílica**, São Paulo v. 19, p. 615-623, 2005.

ANDRADE, E. M. *et al.* Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 27, p. 100649, 2020.

AVELINO, N. R. *et al.* Alocação de biomassa e indicadores de crescimento para a avaliação da qualidade de mudas de espécies florestais nativas. **Ciências Florestais**, Santa Maria, v. 31, n. 4, p. 1733- 1750, 2021.

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; CARMO, D. N. Classificação nutricional de sítios florestais – Descrição de uma metodologia. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 10, n. 1, p. 112-120, 1986.

BASTOS, F. de H. *et al.* A gestão ambiental nas paisagens da bacia do Araripe no Estado do Ceará. **Confins**, n. 29, 2016.

BLACKIE, R. *et al.* Tropical dry forests: The state of global knowledge and recommendations for future research. **Cifor**, v. 2, p. 38, 2014.

BREDEMEIER, C.;MUNDSTOCK, C. M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 365-372, 2000.

BROWN MB; FORSYTRE AB (Robust test for equality of variances. **Journal of the American Statistical Association**, 69: 364-367, 1974.

CASTANHO, A. *et al.* Potential shifts in the aboveground biomass and physiognomy of a seasonally dry tropical forest in a changing climate. **Environmental Research Letters**, 2020.

CHATURVEDI, R.K. *et al.* Leaf attributes and tree growth in a tropical dry forest. **Journal of Vegetation Science**, 2011.

DALLAGNOL, F. S. *et al.* Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. **Floresta e Ambiente, Seropédica**, v. 18, n. 4, p. 410-416, 2012.

DINTWE, K.; OKIN, G. S. Soil organic carbon in savannas decreases with anthropogenic climate change. **Geoderma**, v. 309, p. 7–16, 2018.

DOUGHTY, C. E. *et al.* Ecological Archives E095-194-A1 Moreno-Vare. Allocation trade- offs dominate the response of tropical forest growth to seasonal and interannual drought. **Ecology**, v. 95, n. 8, p. 1–6, 2014.

ESPIG, S. A. *et al.* Composição e eficiência da utilização biológica de nutrientes em fragmento de Mata Atlântica em Pernambuco. **Ciência Florestal**, v.18, n.3, p.309-316, 2008.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR. V. C. Screening crop genotypes for mineral stresses. In: WORKSHOP ON ADAPTATION OF PLANTS TO SOIL STRESS, Lincoln, 1993.

Proceedings. Lincoln: University of Nebraska, p.248-268, 1993.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 2, n. 1, p.6-16, 1998.

FERREIRA, D. F. **SISVAR – Sistema de análise de variância**. Versão 5.6. Lavras: UFLA, 2014. Disponível em: <<https://des.ufla.br/~danielff/programas/sisvar.html>>. Acesso em: 09 ago. 2023.

FREIRE, C. S. **Ciclagem de nutrientes em função da sazonalidade climática e do gradiente de altitude em floresta tropical seca**. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2018.

GURGEL, A.L.C., *et al.* Compactação do solo: Efeitos na nutrição mineral e produtividade de plantas forrageiras. **Revista Científica Rural**, 22(1): 13-29, 2020.

HUANG, J. *et al.* Dryland climate change: Recent progress and challenges. **Reviews of Geophysics**, v. 55, n. 3, p. 719–778, 2017.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades@. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?lang=&coduf=26&search=pernambuco>>. Acesso em: 20 de agosto de 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Áreas territoriais.

Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?t=acesso-ao-produto&c=1>> Acesso em 09 dez 2022.

DALLA LANA, M. D. **Carbono em vegetação lenhosa da caatinga e viabilidade econômica de manejo** 141 p. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2017.

LIMA JÚNIOR, C. *et al.* Estimativa de biomassa lenhosa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação. **Scientia Forestalis** (IPEF),v. 42, p.289-298, 2014.

LIMA,R.B.A. *et al.* Eficiência nutricional como indicador de espécies florestais para restauração de florestas tropicais, Brasil. **Scientia Forestalis**, v. 415-426, 2018.

LOPES, H. L. **Modelagem de parâmetros biofísicos para avaliação de riscos à desertificação**. 101 f. Universidade Federal de Pernambuco, 2005.

Malavolta, E. (2006). **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres.

MARENGO, Jose A.; BERNASCONI, Mauro. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, v. 129, n. 1–2, p. 103–115, 2015.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3–4, p. 1189–1200, 2017.

MARINHO JUNIOR, J. L. *et al.* Revisão: Análise dos estoques de carbono no solo sob

diferentes coberturas vegetais no Brasil. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, vol. 8, no. 1, p. 031–040, 2020.

MENEZES, R.S.C. *et al.* estoques de carbono no solo e na vegetação após mudanças no uso da terra em uma floresta tropical sazonalmente seca. **Geoderma**, v. 390, n. 114943, 2021.

MICHEL, K.; MATZNER, E. Nitrogen content of forest floor Oa layers affects carbono pathways and nitrogen mineralization. **Soil Biology Biochemistry**, Amsterdam, v. 24, p. 1807- 1813, 2002.

MORO, M. F. *et al.* A Phytogeographical Metaanalysis of the Semiarid Caatinga Domain in Brazil. **Botanical Review**, v. 82, n. 2, p. 91–148, 2016.

MOURA, M. M. S. **Simulações dos Estoques de Carbono em Floresta Tropical Sazonalmente Seca Ante às Mudanças Climáticas**. 127 f. Universidade Federal do Ceará, 2020.

PINHEIRO, E. A. R. *et al.* Effective root depth of the Caatinga biome. **Journal of Arid Environments**, v. 89, p. 1–4, 2013.

QUEIROZ, L. P. *et al.* Diversity and Evolution of Flowering Plants of the Caatinga Domain. In: SILVA, J.M.C.; LEAL, I.R.; TABARELLI, M. (org.). Caatinga. Cham, Switzerland: **Springer International Publishing**, 2017. p. 23–63.

RAULINO, W.N.C. *et al.* Nutrition of tree species in tropical dry forest and rainforest environments. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 67, n.1, p. 070-080, 2020.

RITO, K. F. *et al.* Precipitation mediates the effect of human disturbance on the Brazilian Caatinga vegetation. **Journal of Ecology**, v. 105, n. 3, p. 828–838, 2017.

SALAMI, G. **Estoque e Dinâmica de Biomassa e Carbono Acima do Solo em Floresta Tropical Seca**. 2020. 104 p. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2020.

SAMPAIO, E. V. S. B. Overview of the Brazilian caatinga. In: BULLOCK, S. H.; MOONEY, H. A.; MEDINA, E. (Ed.). Seasonally dry tropical forest. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. p. 35-63.

SANTOS, M. G. *et al.* Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: Can it tolerate climate changes? **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, n. 1, p. 83–99, 2014.

SANTOS, R.C. *et al.* Estoques de volume, biomassa e carbono na madeira de espécies da Caatinga em Caicó, RN. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.36, n.85, p.1-7, 2016.

SANTOS, J. P. O.; EL-DEIR, S. G. Produção de gesso no araripe pernambucano: impactos ambientais e perspectivas futuras. **Revista AIDIS**, v.12, p.496-509. 2019.

SANTOS, W.B. dos; MARANGON, L.C.; FREIRE, F.J.; BRAZ, R.L. *et al.* Vegetação lenhosa de regiões semiáridas em diferentes altitudes. **Ciências Florestais**, Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 161-175, jan./mar. 2020

SANTOS, Y.S. *et al.* Avaliação da cobertura vegetal da microrregião da Chapada Dos

Veadeiros (Goiás), em relação a sazonalidade das chuvas, por meio de índices de vegetação. **Revista Georaguaia**, v.13 n.2, 2023.

TERAKUNPISUT, J.; GAJASENI, N.; RUANKAWE, N. Carbon Sequestration Potential In Aboveground Biomass of Thong Pha Phum National Forest, Thailand. **Appl. Ecol. Environ. Res.** V. 5. Pag. 93–102, 2007.

SCHULZ, K. *et al.* Grazing, forest density, and carbon storage: towards a more sustainable land use in Caatinga dry forests of Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 7, p. 1969–1981, 2018.

SILVA, A. M. O. *et al.*, Compartmentalization and efficiency biological of nitrogen utilization in dry tropical forest. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.13, 2018.

SILVA, A. C. F. *et al.* Teores de carbono em espécies florestais da Caatinga. **Ciências Florestais**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 71-85. 2022 a.

SILVA, E. D. G. *et al.* S. Biomassa e nutrientes na parte aérea de espécies arbóreas da Caatinga, Rio Grande do Norte. **Nativa**, Sinop, v. 10, n. 1, p. 131-137, 2022.

SILVA, D. V.; CRUZ, C. B. Tipologias de Caatinga: Uma Revisão em Apoio a Mapeamentos Através de Sensoriamento Remoto Orbital e GEOBIA. **Revista Do Departamento De Geografia**, v.35, p.113-120. 2018.

SILVA, E. D. G. da. *et al.* Biomassa e nutrientes na parte aérea de espécies arbóreas da Caatinga, Rio Grande do Norte. **Nativa**, Sinop, v. 10, n. 1, p. 131-137, 2022.

SILLMANN, J. *et al.* Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 118, n. 6, p. 2473–2493, 2013.

SINGH, K. P.; KUSHWAHA, C. P. Deciduousness in tropical trees and its potential as indicator of climate change: A review. **Ecological Indicators**, v. 69, p. 699–706, 2016.

SINGH, K. P.; KUSHWAHA, C. P. Emerging paradigms of the tree phenology in dry tropics. *Current Science India*, v. 89, n. 6, p. 964-974, 2005.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality. **Biometrika**, Oxford, v. 52, n.3/4, p. 591-611, 1965.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5 ed. Porto Alegre: Artemed, 2013. 954p.

TORRES, J.E. de L. Regeneração natural do componente arbustivo-arbóreo e atributos do solo em áreas com diferentes altitudes no Semiárido pernambucano. 2018. Tese (Doutorado) 107 f. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2018.

VIEIRA, G. *et al.* Teores de carbono em espécies vegetais da caatinga e do cerrado. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 7, p. 145-155. 2009.

WIESMEIER, M. *et al.* Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. **Geoderma**, v. 333, n. July 2018, p. 149–162,

2019.

XU, C. *et al.* Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change. *Nature **Climate Change***, v. 9, n. 12, p. 948–953, 2019.

CAPÍTULO II

**CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO EM ÁREA DE FLORESTA TROPICAL
SECA NO NORDESTE BRASILEIRO**

RESUMO

Os estoques de C e N do solo podem variar em diferentes altitudes, devido a uma combinação de fatores climáticos e de vegetação, processo de decomposição da matéria orgânica e práticas agrícolas ou de diferentes usos da terra. Essas variações são fundamentais para compreender os padrões de armazenamento de C e N em solos, em diferentes ecossistemas. Especialmente na região da Chapada do Araripe em Pernambuco, há uma variação topográfica significativa, com áreas de topo, de médias altitudes e de baixada, que podem influenciar os estoques de C e N do solo. Essas áreas são compostas por fragmentos de florestas tropicais secas submetidas a períodos úmidos e secos durante o ano, que também podem interferir nos estoques de C e N, pela influência que a umidade causa nos microrganismos do solo. A hipótese desse estudo é que a estação mais chuvosa do ano tenha influência nos estoques de C e N e que o ambiente com altitude mais elevada apresenta os menores estoques de C e N do solo, considerando as melhores condições edafoclimáticas, que favorecem a uma maior decomposição da matéria orgânica e, conseqüentemente, maior perda desses elementos químicos, que são muito dependentes do processo de decomposição dessa matéria orgânica. Assim, objetivou-se determinar os teores e quantificar os estoques de C e N nos solos de fragmentos florestais preservados, alocados em três níveis de altitude, em dois períodos do ano, no Araripe de Pernambuco, Brasil. O estudo foi realizado em nove fragmentos de floresta tropical sazonalmente seca localizados em três gradientes de altitude numa topossequência, sendo três fragmentos em cada nível de altitude. Em cada fragmento foram abertas 20 parcelas permanentes, totalizando 180 unidades amostrais. Para caracterização química dos solos nos diferentes ambientes de altitude foram retiradas, aleatoriamente, 20 amostras simples de solo, coletadas na profundidade de 0 – 20 cm, formando-se, posteriormente, uma amostra composta de solo, em cada um dos fragmentos dos ambientes de alta, média e baixa altitude. Nas amostras determinou-se os teores de C e N por via seca através do analisador elementar. Assim, foram coletadas amostras indeformadas e a densidade do solo mensurada pelo método do anel volumétrico. Os teores de C e N foram maiores no ambiente úmido em relação ao seco, enquanto que a relação C/N apresentou resultado inverso, ou seja, foi maior no período seco. No período úmido ocorreu um maior aporte de C no solo, sugerindo que a umidade do solo impactou nas taxas de acúmulo e decomposição do C da serapilheira. Os teores de C do solo encontrados nos fragmentos florestais variaram de 17,8 a 21,6 g kg⁻¹. Os teores de C e N do solo não foram influenciados pelos diferentes ambientes de altitude e o estoque de C do solo só foi influenciado pelos ambientes de altitude, independente do período do ano, tendo o ambiente de média altitude se diferenciado do ambiente de alta altitude e apresentado o mais alto estoque de C do solo. O estoque de C foi influenciado pela densidade do solo, com as áreas de topo tendo apresentado os menores valores de densidade, determinando-lhes menores estoques de C do solo. O estoque de N do solo foi semelhante nas áreas de baixa e média altitude e foram maiores do que nas áreas de alta altitude. O estoque de N do solo no período úmido foi menor que no período seco, indicando que a umidade do solo afeta a disponibilidade de N e, pode influenciar a quantidade de N armazenada no solo. Todas essas variações de teores e estoques de C e N e relação C/N podem ser consequência de fatores sazonais ou mudanças nas condições ambientais ao longo do tempo, sugerindo o monitoramento dos atributos do solo nos ambientes de altitude e da sazonalidade na Chapada do Araripe, de forma a se obter informações relevantes para a compreensão dos processos ecológicos e da dinâmica do solo nesse ecossistema.

Palavras-chave: Teor de C e N do solo; Relação C/N do solo; Estoques de C e N do solo.

ABSTRACT

Soil C and N stocks can vary at different altitudes, due to a combination of climatic and vegetation factors, the organic matter suspension process and agricultural practices or different land uses. These variations are fundamental to understanding the storage patterns of C and N in soils in different ecosystems. Especially in the high relief do Araripe region in Pernambuco, there is significant topographic variation, with top, mid-altitude and low-altitude areas, which can influence soil C and N stocks. These areas are made up of fragments of tropical forests subject to wet and dry periods during the year, which can also interfere with C and N stocks, due to the influence that humidity has on soil microorganisms. The hypothesis of this study is that the rainiest season of the year has an influence on C and N stocks and that the environment with a higher altitude presents the lowest soil C and N stocks, considering the best edaphoclimatic conditions, which favor a greater Compensation of organic matter and, consequently, greater loss of these chemical elements, which are very dependent on the process of destruction of this organic matter. Thus, the objective was to determine the levels and quantify the C and N stocks in the soils of preserved forest fragments, located at three altitude levels, in two periods of the year, in Araripe de Pernambuco, Brazil. The study was carried out in nine fragments of seasonally dry tropical forest located in three altitude gradients in a toposequence, with three fragments at each altitude level. In each fragment, 20 permanent plots were opened, totaling 180 rectangular sampling units, measuring 10 x 25 m, totaling a sampling area of 4.5 ha, 1.5 ha per altitude. For chemical characterization of the soils in the different high altitude environments, 20 simple soil samples were randomly taken, collected at a depth of 0 – 20 cm, subsequently forming a composite sample of soil, in each of the fragments of the high altitude environments. high, medium and low altitude. The C and N contents were determined in the samples by dry means. To calculate soil C and N stocks, it is necessary to measure their density. Thus, undisturbed samples were collected and soil density was measured using the volumetric ring method. Subsequently, soil C and N stocks (Mg ha⁻¹) were calculated. The C and N contents were higher in the humid environment compared to the dry, while the C/N ratio showed the opposite result, that is, it was higher in the dry period. During the humid period, there was a greater contribution of C to the soil, suggesting that soil humidity impacted the rates of accumulation and decomposition of C in litter. Soil C levels found in forest fragments ranged from 17.8 to 21.6 g kg⁻¹. Soil C and N contents were not influenced by different altitude environments and soil C stock was only influenced by altitude environments, regardless of the period of the year, with the medium altitude environment being different from the high altitude environment. and presented the highest soil C stock. C stock was influenced by soil density, with the top areas having the lowest density values, determining lower soil C stocks. Soil N stocks were similar in low and medium altitude areas and were higher than in high altitude areas. The soil N stock in the wet period was lower than in the dry period, indicating that soil moisture affects N availability and can influence the amount of N stored in the soil. All these variations in C and N contents and stocks and C/N ratio may be a consequence of seasonal factors or changes in environmental conditions over time, suggesting the monitoring of soil attributes in high-altitude environments and seasonality in high relief do Araripe, in order to obtain relevant information for understanding the ecological processes and soil dynamics in this ecosystem.

Keywords: Soil C and N content; Soil C/N ratio; Soil C and N stocks.

1. INTRODUÇÃO

As florestas tropicais secas (FTS) estão presentes em cinco dos seis continentes mundiais, com extensão territorial de aproximadamente 3,3 milhões de km² de terras secas, dos quais 45% estão na América do Sul (BASTIN *et al.*, 2017). Consistem em uma formação florestal típica de regiões marcadas pela distribuição sazonal das chuvas e prolongada estação seca (ALLEN *et al.*, 2017), além de possuírem uma estrutura extremamente irregular e semelhanças florísticas, entre os tipos de vegetação, atribuídas, principalmente, às condições edafoclimáticas desses ambientes (LIMA *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2014; PINHO *et al.*, 2019).

Fragmentos preservados de FTS desempenham importante papel nos processos regionais e globais devido às interações entre a biosfera e atmosfera (MOURA *et al.*, 2016; ALLEN *et al.*, 2017). Entretanto, os entendimentos destes processos é desafiador diante da dificuldade da investigação em escalas espaciais e temporais, além do déficit de dados disponíveis sobre os estoques e fluxos de C e N do solo e a vegetação nestas áreas (KAUFFMAN *et al.*, 1993; MOURA *et al.*, 2016; PEREIRA JÚNIOR *et al.*, 2016; AQUINO *et al.*, 2017).

Uma parcela significativa do C do planeta é armazenada nos solos, tornando-se um dos maiores reservatórios de C (PAUSTIAN *et al.*, 2016). Já o N é armazenado, principalmente na atmosfera, mas também está presente em quantidades menores nos solos, corpos d'água e organismos vivos (FAQUIN, 2005). Os estoques de C e N nos solos podem ser influenciados pelo tipo de vegetação, o clima, a prática agrícola, o manejo florestal e a urbanização (OLIVEIRA, 2011; CAVALLI *et al.*, 2018; RUFFINO, 2022). A perda de C do solo pode ocorrer através do desmatamento, queimadas e mudanças no uso da terra, causando as emissões de carbono na forma de CO₂ para a atmosfera, favorecendo o aquecimento global (RUFFINO, 2022), enquanto que, o N é perdido do solo através dos processos de lixiviação, desnitrificação e volatilização (HAVLIN *et al.*, 2014).

O C no solo existe em várias formas e pode ser encontrado, tanto na matéria orgânica, como em componentes minerais do solo (RUFFINO, 2022; IPCC, 2007). As frações químicas da matéria orgânica do solo representam em torno de 90% do C orgânico total e se classificam, conforme suas substâncias húmicas (GUERRA *et al.*, 2008). Esses estoques de C são influenciados por uma série de fatores naturais e humanos. No solo, o C

se encontra na matéria orgânica, constituída por resíduos de plantas e animais em diferentes formas ou na biomassa microbiana, constituída por microrganismos do solo, como bactérias, por exemplo.

Assim como o C, o N é um nutriente essencial para as plantas e desempenha um papel vital na síntese de proteínas e no crescimento vegetal (HAVLIN *et al.*, 2014). O N no solo pode ser encontrado nas formas orgânicas, representado pela matéria orgânica em decomposição, como restos de plantas e animais, bem como na biomassa microbiana e, na forma inorgânica, que compreende as formas amoniacais (NH_4^+) e o nítricas (NO_3^-), que são as formas disponíveis em que as plantas absorvem N do solo (ZAMAN *et al.*, 2009).

O estoque de N no solo é altamente influenciado pelo ciclo do N, que envolve processos como fixação, amonização, nitrificação, desnitrificação e volatilização (LADHA, 2016). O processo de decomposição acelerada da matéria orgânica do solo pode levar a problemas ambientais, como a lixiviação de nitratos para os corpos d'água, gerando eutrofização e contaminação da água, além disso, a agricultura intensiva, especialmente, o uso de fertilizantes nitrogenados, pode aumentar, temporariamente, os estoques do nutriente no solo, mas também pode levar à degradação do solo e redução da sua capacidade de retenção de nutrientes ao longo do tempo (TIAN *et al.*, 2013; ZHONG *et al.*, 2017).

Os estoques de C e N do solo podem variar em diferentes altitudes, devido a uma combinação de fatores climáticos e de vegetação, processo de decomposição da matéria orgânica e práticas agrícolas ou de diferentes usos da terra. Essas variações são fundamentais para compreender os padrões de armazenamento de C e N em solos, em diferentes ecossistemas. Especialmente na região da Chapada do Araripe, em Pernambuco, há uma variação topográfica significativa, com áreas de topo, de médias altitudes e de baixada, que podem influenciar os estoques de C e N do solo. Essas áreas são compostas por fragmentos de FTS, que além de serem influenciadas por essa variação topográfica, são submetidas a períodos úmidos e secos durante o ano, que também podem interferir nos estoques de C e N, pela influência que a umidade causa nos microrganismos do solo.

Os organismos vivos sofrem adaptações funcionais em decorrência das condições ambientais a que são submetidos. Assim, diferentes ambientes e altitudes distintas podem determinar uma variação ambiental de influência considerável sobre as alterações da biodiversidade, visto que, em decorrência dela ocorrem diferentes composições florísticas, tipos de solo e condições climáticas. Dessa forma, os gradientes topográficos em escala local são analisados em estudos como mecanismos determinantes na preferência ecológica de plantas (SHAOLIN *et al.*, 2008; PUNCHI- MANAGE *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*,

2018).

Com base na topografia, pode-se conhecer condições ambientais heterogêneas, que podem determinar habitats extremamente diversificados e favoráveis a diversidade de plantas (NICHOLS *et al.*, 1998; TEWS *et al.*, 2004), ocasionando uma variabilidade de clima, solo, vegetação e impulsionando as características fisiológicas dos indivíduos, como exemplo a capacidade de captação do C e N e sua conversão em biomassa. Dessa forma, a topografia é um fator determinante sobre as características locais de declividade, elevação, microclima, evapotranspiração, escoamento da água, química e física do solo, densidade e variabilidade florística (ROMERO, 2013; SANTOS; NASCIMENTO, 2017). Assim, com a elevação topográfica das áreas, ocorre uma tendência de o ambiente ser mais úmido e os solos serem mais ou menos argilosos, fatores estes que influenciam na qualidade da matéria orgânica e mineralização do solo, interferindo, conseqüentemente, na do solo e fertilidade do solo e nutrição vegetal, caracterizando os ambientes como sumidouros ou emissores de C e N (TUCCI; MENDES, 2006; CÂNDIDO; NUNES, 2008; ARAÚJO, 2011; SANTOS e NASCIMENTO, 2017).

A fixação do C é uma variável que sofre influência direta em meio às diferentes condições ambientais e características morfofisiológicas intrínsecas, de forma que sua alocação entre compartimentos e espécies é distribuída com base na posição do relevo e condições climáticas do local de ocorrência do indivíduo (SILVA *et al.*, 2021). Além disso, a cobertura florestal é o fator determinante para os teores desse C no solo. Dessa forma, os estoques no solo flutuam em escala local devido a diversos fatores, como topografia e manejo do solo e, em escala regional, devido ao efeito do material de origem do solo e da geologia subjacente (TRUMBORE; CAMARGO, 2009).

Estoques de C nos solos têm um papel fundamental na regulação climática e na saúde dos ecossistemas terrestres, desempenhando papel crucial nos ciclos biogeoquímicos, influenciando a fertilidade do solo, a qualidade da água e o controle do aquecimento global. Manter e aumentar esses estoques nos solos é uma estratégia importante para mitigar as mudanças climáticas, já que solos ricos em C têm o potencial de capturar e armazenar grandes quantidades de CO₂ atmosférico, ajudando a reduzir a concentração desse gás na atmosfera.

A gestão adequada dos estoques de C e N nos solos é essencial para a sustentabilidade dos ecossistemas terrestres, a segurança alimentar e a mitigação das mudanças climáticas. Estratégias como o manejo sustentável da terra, adoção de práticas agrícolas conservacionistas e a restauração de ecossistemas degradados, podem ajudar a

aumentar a capacidade do solo de armazenar esses nutrientes e melhorar a disponibilidade para as plantas, favorecendo a qualidade do solo e a resiliência do ambiente. Estudos na Chapada do Araripe, que possam estimar o estoque de C e N nos diferentes gradientes topográficos da região e em diferentes períodos de umidade, podem auxiliar a gestão adequada dos estoques de C e N do solo, definindo áreas que devem ser mais preservadas e conservadas, principalmente porque é uma região bastante explorada para retirada de madeira para uso na calcinação de gipsita.

A hipótese desse estudo é que a estação mais chuvosa do ano tenha influência nos estoques de C e N e que o ambiente com altitude mais elevada apresenta os menores estoques de C e N do solo, considerando as melhores condições edafoclimáticas, que favorecem a uma maior decomposição da matéria orgânica e, conseqüentemente, maior perda desses elementos químicos, que são muito dependentes do processo de decomposição dessa matéria orgânica.

Dessa forma, objetivou-se determinar os teores e quantificar os estoques de C e N nos solos de fragmentos florestais preservados, alocados em três níveis de altitude, em períodos do ano, no Araripe de Pernambuco, Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em nove fragmentos de floresta tropical sazonalmente seca localizados em três gradientes de altitude numa topossequência, sendo três fragmentos em cada nível de altitude. As áreas dos fragmentos estão localizadas na região do Polo Gesseiro do Araripe, na Área de Proteção Ambiental (APA) da Chapada do Araripe, Sertão de Pernambuco (Figura 1).



Figura 1. Localização da Área de Proteção Ambiental (APA) na Chapada do Araripe.
Fonte: Google Earth (2023).

A região apresenta o clima do tipo BSh', quente e seco segundo a classificação de Köppen (1984), caracterizado como tropical zona equatorial, semiárido (ALVARES *et al.*, 2013). As altitudes variam, entre 400 e 1100 m, temperatura anual variável de 24 °C a 26 °C, chegando a 18 °C no mês mais frio. A precipitação anual é em torno de 500 mm e a estação seca chega a se prolongar de 7 a 10 meses, com estação chuvosa iniciando-se entre setembro e outubro (LOPES, 2005). A semiaridez é acentuada na parte mais baixa da Chapada do Araripe, onde os totais anuais precipitados variam entre 400 e 500 mm, enquanto que na parte mais alta, as precipitações atingem médias entre 700 e 800 mm (TORRES, 2018).

A formação vegetal do Araripe pernambucano apresenta fisionomias florestais distintas, e a formação vegetal da região é classificada como Caatinga do tipo Savana Estépica, que apresenta variações originadas pelos gradientes de altitudes e em área de transição denominada ecótono ecológico (IBGE, 2012; SANTOS *et al.*, 2020a.).

Observou-se na Chapada do Araripe variação edafoclimática das áreas de estudo, como fatores determinantes nas formações da tipologia vegetal para cada ambiente (alta altitude, média altitude e baixa altitude (Tabela 1).

Tabela 1. Localização e características climáticas, vegetais e de solo dos ambientes de baixa, média e alta altitude em floresta tropical seca ao longo de um dos fragmentos de cada topossequência no Araripe em Pernambuco, Brasil

Ambiente	Baixa altitude	Média altitude	Alta altitude
Localização	(07°46'58,28"S e 40°27'13,73"O)	(07°31'9,16"S e 40°30'54,01"O)	(07°25'36,28"S e 40°25'44,71"O)
Clima¹	BShw'	BShw'	BShw'
Altitude	540 m	664 m	847 m
Precipitação²	400-500 mm	400-500 mm	700-800 mm
Temperatura¹	24 a 26 °C	24 a 26 °C	24 a 26 °C
Domínio³	FTS ⁴	FTS	FTS
DA (ni ha⁻¹)⁵	872	1.688	1.288
H' (nats ha⁻¹)⁶	2,45	2,33	2,32
Solo	Argissolo Vermelho-	Neossolo	Latossolo Amarelo
Classificação	Amarelo ⁷	Litólico ⁷	distrófico ^{7,8}

¹Clima das estepes quentes de baixa latitude e altitude ou clima semiárido quente (ALVARES *et al.*, 2013); ²LOPES (2005); ³IBGE (2012); ⁴Floresta Tropical Seca; ⁵Densidade absoluta (número de indivíduos ha⁻¹); ⁶Índice de diversidade de Shannon-Wiener; ⁷EMBRAPA (2013); ⁸REZENDE (2017). FONTE: Freire (2018)

2.2 FRAGMENTOS FLORESTAIS ESTUDADOS

Os fragmentos florestais estudados foram previamente alocados de acordo com a sua posição no relevo e distribuídos em três diferentes altitudes, seguindo a seguinte nomenclatura: Ambiente de baixa altitude (BA), representado pelos fragmentos florestais com até 600 m de altitude; Ambiente de média altitude (MA), representado pelos fragmentos com altitude entre 600 e 750 m; e Ambiente de alta altitude (AA), representado pelos fragmentos com mais de 750 m de altitude, conforme proposto por Cunha (2017). Para cada uma dessas altitudes os fragmentos florestais foram previamente selecionados, tendo como principal critério, o bom estado de conservação das florestas nativas. Em cada altitude, selecionou-se três fragmentos, considerando-se como as repetições experimentais.

Em cada fragmento foram abertas 20 parcelas permanentes alocadas sistematicamente a 25 m uma das outras, totalizando 180 unidades amostrais retangulares, com dimensões de 10 x 25 m, somando uma área amostral de 4,5 ha, sendo 1,5 ha por altitude.

A partir dessa amostragem, realizou-se o levantamento fitossociológico, no qual determinaram-se as espécies que se repetem em todas as altitudes do relevo e que foram utilizadas nesse estudo para quantificação do estoque de C e N na vegetação (Santos *et al.*, 2020).

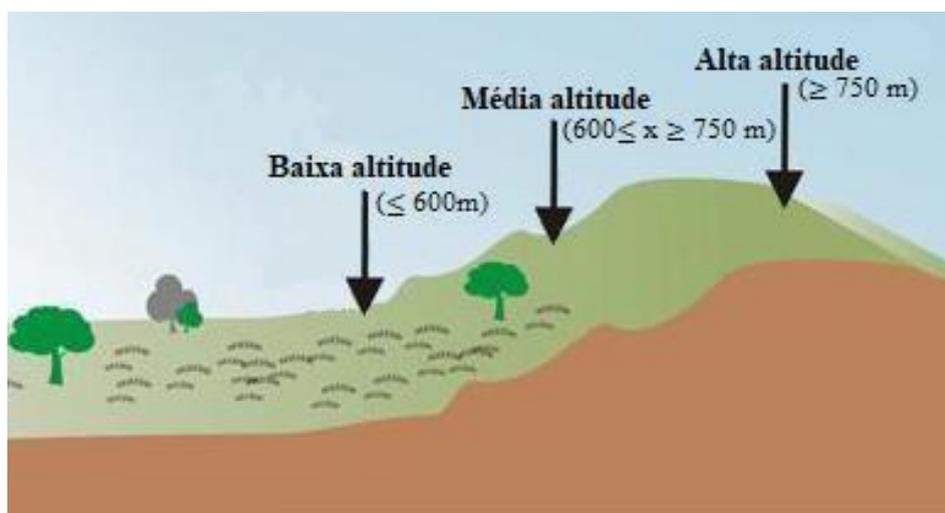


Figura 2. Distribuição dos fragmentos de acordo com a posição no relevo. Fonte: Autor (2023).

2.3 PERÍODOS AVALIADOS

Foram obtidos dados de precipitação anual e mensal, provenientes da base de dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e temperatura do ar, proveniente da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estes dados foram disponibilizados pelo Laboratório de Meteorologia do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (LAMEP/ITEP) e permitiram calcular a precipitação pluviométrica dos últimos 10 anos (2012-2022), demonstrando uma irregularidade no regime hídrico da região, cujo acumulado mensal oscilou entre 140 mm (março) e quase zero mm (agosto/setembro), sendo os meses de janeiro a março os mais chuvosos e agosto e setembro os mais secos, com temperatura média de 26,0 °C, sendo os meses de janeiro/novembro/dezembro os mais quentes e junho/julho/setembro os meses mais frios (Figura 3A). Também foi possível observar uma irregularidade no regime hídrico da região em 2022, ano de coleta dos dados, cujo acumulado mensal oscilou entre 200 mm (março) e 6 mm (agosto/setembro), sendo os meses de janeiro e março os mais chuvosos e agosto e setembro os mais secos, com temperatura média de 27,0 °C, com os meses de setembro e outubro os mais quentes e junho/julho os meses mais frios (Figura 3B).

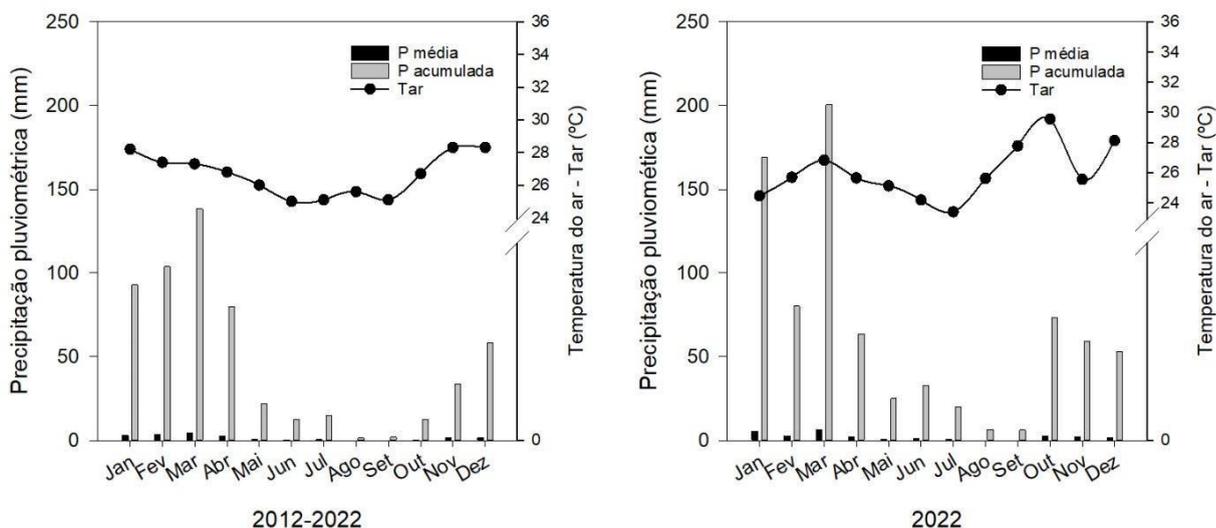


Figura 3. Variação da precipitação pluviométrica média e acumulada e da temperatura entre a série histórica de 2012 a 2022 e o ano de 2022, no Araripe em Pernambuco, Brasil.

De posse dos dados de pluviosidade e temperatura da série histórica, foram definidos quatro períodos: Úmido, seco e de transição úmido-seco e seco-úmido (Figura 4). Sendo considerado os meses de janeiro a março como período úmido, cuja precipitação acumulada foi em média 110 mm; Junho a setembro como período seco, com precipitação acumulada média de 10 mm; e os períodos de transição: Úmido-seco representado pelos meses de abril e maio; e Seco-úmido representado pelos meses outubro a dezembro com médias de 48 mm, respectivamente.

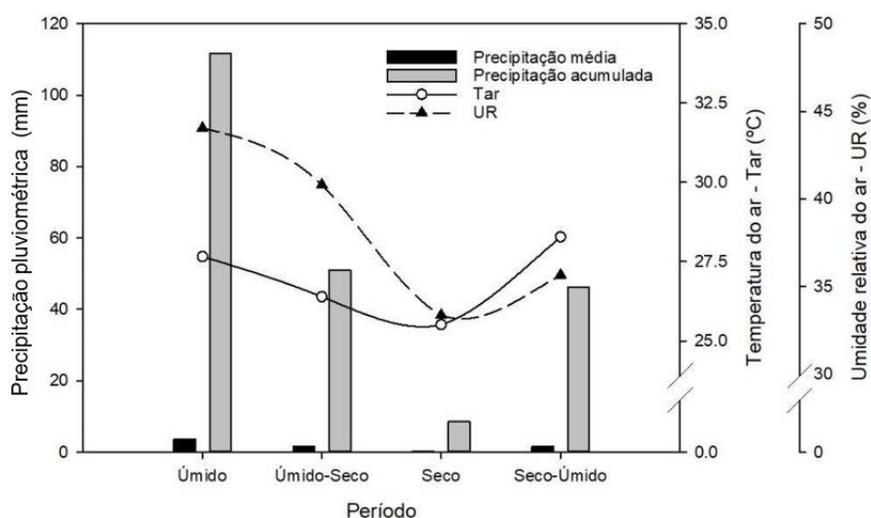


Figura 4. Série histórica de 2012 a 2022 da precipitação pluviométrica, temperatura e umidade, mostrando a média acumulada da precipitação e a precipitação média dos períodos anuais definidos como, úmido e seco e suas transições: Úmido-seco e seco-úmido, bem como a temperatura e a umidade relativa média, no Araripe em Pernambuco, Brasil.

As coletas das amostras de material vegetal ocorreram nos dois períodos extremos quanto a precipitação pluviométrica: Úmido e Seco. A primeira coleta foi realizada em março e a segunda em setembro de 2022. A determinação dos períodos de transição foram para caracterizar melhor os períodos úmido e seco e garantir que a amostragem fosse realizada apenas nessas condições hídricas. Assim, notou-se que tanto para a precipitação média mensal do período, quanto para o acumulado da precipitação, a média histórica de precipitação do período seco dos últimos dez anos foi inferior ao ano de 2022 (Figura 5A e B), caracterizando uma maior condição histórica de umidade na região em 2022, sendo esse ano, portanto, mais úmido do que a média histórica. Entretanto, como a coleta desse período ocorreu em setembro, pode-se dizer que setembro/2022 não foi diferente do setembro dos últimos dez anos.

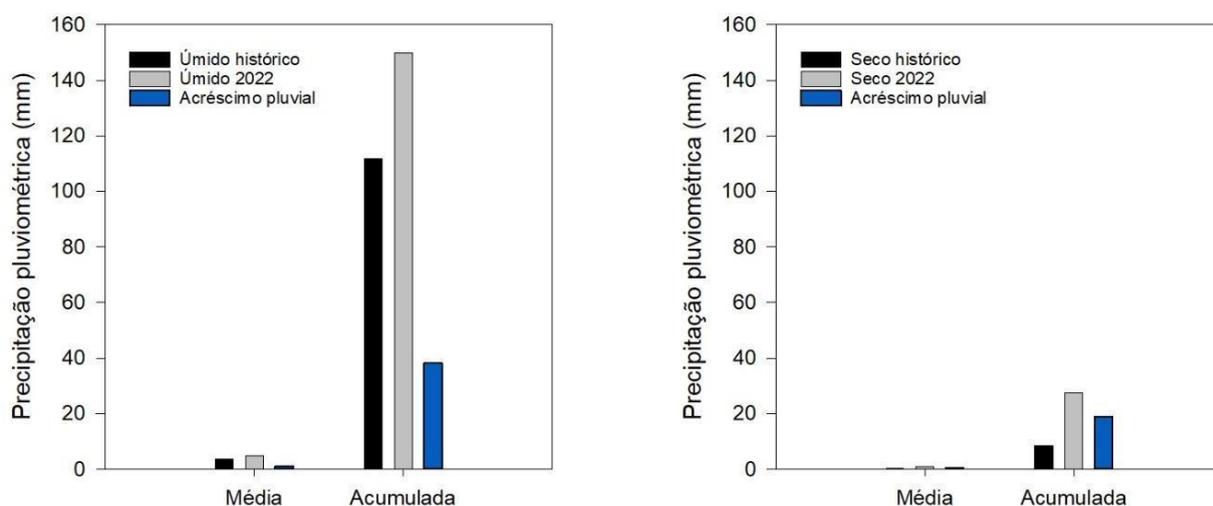


Figura 5. Comparação da precipitação pluviométrica média e acumulada nos períodos úmido e seco entre a série histórica de 2012 a 2022 e o ano de 2022, mostrando que esses períodos historicamente foram mais secos do que o ano de 2022, no Araripe em Pernambuco, Brasil.

2.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS

Para caracterização química dos solos nos diferentes ambientes de altitude foram retiradas, aleatoriamente, 20 amostras simples de solo, coletadas na profundidade de 0 – 20 cm, formando-se, posteriormente, uma amostra composta de solo, em cada um dos fragmentos dos ambientes de alta, média e baixa altitude. Como em cada ambiente de altitude existiam três fragmentos e em cada fragmento foram alocadas 20 parcelas para os estudos fitossociológicos, foi realizada uma amostragem de solo em cada uma dessas parcelas de 10 x 25 m, totalizando 20 amostras simples por fragmento e 60 amostras simples por ambiente

de altitude. Essas 60 amostras simples se tornaram três amostras compostas por ambiente de altitude. Nessas amostras foram determinados os seguintes atributos químicos: pH, MOS determinada indiretamente, através do C determinado por combustão úmida, pelo método do dicromato de K, bem como determinados os teores de P, K⁺, Ca⁺² e Mg⁺², Na⁺ e (H+Al) de acordo com metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017).

Tabela 2. Atributos químicos dos solos dos diferentes ambientes de altitude

Ambiente de Altitude	pH (CaCl ₂)	MOS ¹ g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	(H+Al)	CTC ²	V ³ %
				cmol _c dm ⁻³						
Alta	3,80	28,72	3,90	1,40	0,60	0,07	0,10	4,00	6,17	35,17
Média	4,20	18,95	3,20	3,00	1,00	0,20	0,11	2,50	6,81	63,29
Baixa	5,50	37,33	4,70	7,20	2,30	0,27	0,13	2,00	11,90	83,19

¹Matéria orgânica do solo = C (g dm⁻³) x 1,724; ²Capacidade de troca de cátions; ³Saturação por bases.

2.5 ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO

Para calcular o estoque de C e N do solo, inicialmente é necessário determinar seus teores no solo. Nas mesmas amostras utilizadas para caracterizar os solos dos diferentes ambientes de altitude, determinou-se os teores de C e N. Acrescente-se que nesse caso, as amostragens de solo foram realizadas também em dois períodos do ano (úmido e seco). Todas as amostras de solo foram destorroadas, secas à sombra, passadas em peneira de 2 mm de malha e maceradas em almofariz de ágata, antes de serem submetidas às análises químicas.

Os teores de C e N foram determinados via seca através do Analisador Elementar EA3100, para isso utilizou-se, aproximadamente, 2 mg da amostra, que foram acondicionadas em cápsulas de estanho para posterior combustão total no equipamento, que através da queima da matéria orgânica a uma temperatura de, aproximadamente, 1.000 °C libera os gases CO₂ e N₂, sendo adsorvidos separadamente por uma coluna detectora específica e através de sensores de condutividade térmica mensuram os valores em percentagem de N e C (ELEMENTAR, 2007).

Adicionalmente, ainda, para calcular os estoques de C e N do solo, é necessário mensurar sua densidade. Assim, nas mesmas parcelas onde foram coletadas as amostras para determinação dos teores de C e N, foram coletadas amostras indeformadas no centro de um mini perfil de solo aberto até uma profundidade de 20 cm, utilizando-se um anel volumétrico.

Posteriormente, os anéis foram colocados em estufa a 105 °C até o peso constante. Após esse período, as amostras foram pesadas para a determinação da massa seca do solo (ALMEIDA *et al.*, 2017). A partir dos valores obtidos, a densidade do solo foi determinada a partir da seguinte equação:

$$D_s = M_s/V_s,$$

Em que:

D_s é a densidade do solo (kg dm^{-3});

M_s é a massa de solo seco (kg); e

V_s é o volume do anel (dm^3).

Os estoques de C e N no solo (Mg ha^{-1}) foram calculados de acordo com as seguintes expressões (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2017):

$$\text{Estoque de C} = (C \times D_s \times Pr)/10$$

$$\text{Estoque de N} = (N \times D_s \times Pr)/10$$

Em que:

C = Carbono orgânico total (g kg^{-1});

N = Nitrogênio total (g kg^{-1});

D_s = Densidade do solo (kg dm^{-3});

Pr = Profundidade da coleta de solo (cm); e

10 = fator de conversão das unidades para expressar o estoque de C ou N em Mg ha^{-1} .

2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos foram tabulados e organizados em planilhas para posterior análise estatística. Os dados foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) e de homogeneidade das variâncias com teste de Levene (BROWN; FORSYTRE, 1974), ambos ao nível de 5% de probabilidade.

Realizou-se posteriormente análise de variância (ANOVA) para cada variável, com sua significância sendo testada a partir dos valores encontrados no teste de Fisher (Teste F). Quando o F calculado das variáveis, através de seus efeitos principais ou interações, foi significativo ($p < 0,05$), aplicou-se teste de Tukey ($p < 0,05$).

Em todos os casos, quando as interações entre os fatores foram significativas pelo teste F ($p < 0,05$), desdobrou-se o fatorial, estudando-se o efeito de um fator dentro do outro. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do *software* SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2014).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de F calculado dos teores de C, N e relação C/N do solo mostraram que o ambiente de altitude não teve efeito nessas variáveis, sendo apenas influenciados pelo período do ano, independente do ambiente de altitude (Tabela 3). No entanto, os valores de F calculados dos estoques de C do solo (ECS) só mostraram efeito do ambiente de altitude, independente do período do ano. Os valores de F calculado dos estoques de N do solo (ENS) foram influenciados, tanto pelo ambiente de altitude, quanto pelo período do ano, mas sem interação entre esses fatores, ou seja, os ENS apresentaram o mesmo comportamento quanto ao período do ano, independente do ambiente de altitude e vice-versa.

Tabela 3. Valores de F calculado na análise de variância (ANOVA) dos ambientes de altitude (alta, média e baixa) e períodos do ano (úmido e seco) em relação aos teores de carbono (C), nitrogênio (N), relação carbono/nitrogênio (C/N), estoque de carbono (ECs) e estoque de nitrogênio (ENS) no solo, no Araripe em Pernambuco, Brasil

Fonte de Variação	C	N	C/N	ECs	ENS
Ambiente de altitude	0,58 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,84 ^{ns}	3,81 [*]	7,79 ^{**}
Período do ano	4,54 [*]	43,63 ^{**}	10,41 ^{**}	2,44 ^{ns}	38,27 ^{**}
Ambiente x Período	0,10 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,01 ^{ns}
CV (%)	13,64	11,30	15,94	15,24	12,32

* e ** Significativo a 5 e 0,1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. ^{ns}Não significativo.

Conforme destacado por Fissore *et al.* (2017), compreender a variabilidade dos teores e estoques de carbono orgânico total no solo ao longo de uma topossequência requer o conhecimento da vegetação local como um fator crucial. Além disso, a qualidade e o tipo de matéria orgânica também desempenham um papel significativo, incluindo as características químicas e físicas dos resíduos, bem como as condições ambientais que afetam o processo de decomposição e humificação.

Os teores de C e N foram maiores no ambiente úmido em relação ao seco, enquanto que a relação C/N apresentou resultado inverso, ou seja, foi maior no período seco (Figura 6). No período úmido ocorreu um maior aporte de C no solo, sugerindo que a umidade do solo impactou nas taxas de acúmulo e decomposição do C da serapilheira (Figura 6a). Os teores de C do solo encontrados nos fragmentos florestais variou de 17,8 a 21,6 g kg⁻¹, apresentando-se semelhantes a outros estudos realizados no Araripe, como o de Silva (2020), que encontrou teores de C de 23,42 g kg⁻¹ na camada de 0-5 cm e 14,50 g kg⁻¹ na camada 10-20 cm. Araújo Filho *et al.* (2017) também encontraram valores de C em torno de 20 g kg⁻¹ na camada 0-5 cm e em torno de 10 g kg⁻¹ na camada 10-20 cm, no município de Floresta, em Pernambuco. No entanto, de acordo com Giongo *et al.* (2011), os Latossolos e os Argissolos apresentam teores de C em torno de 9,7 g kg⁻¹ e 8,9 g kg⁻¹.

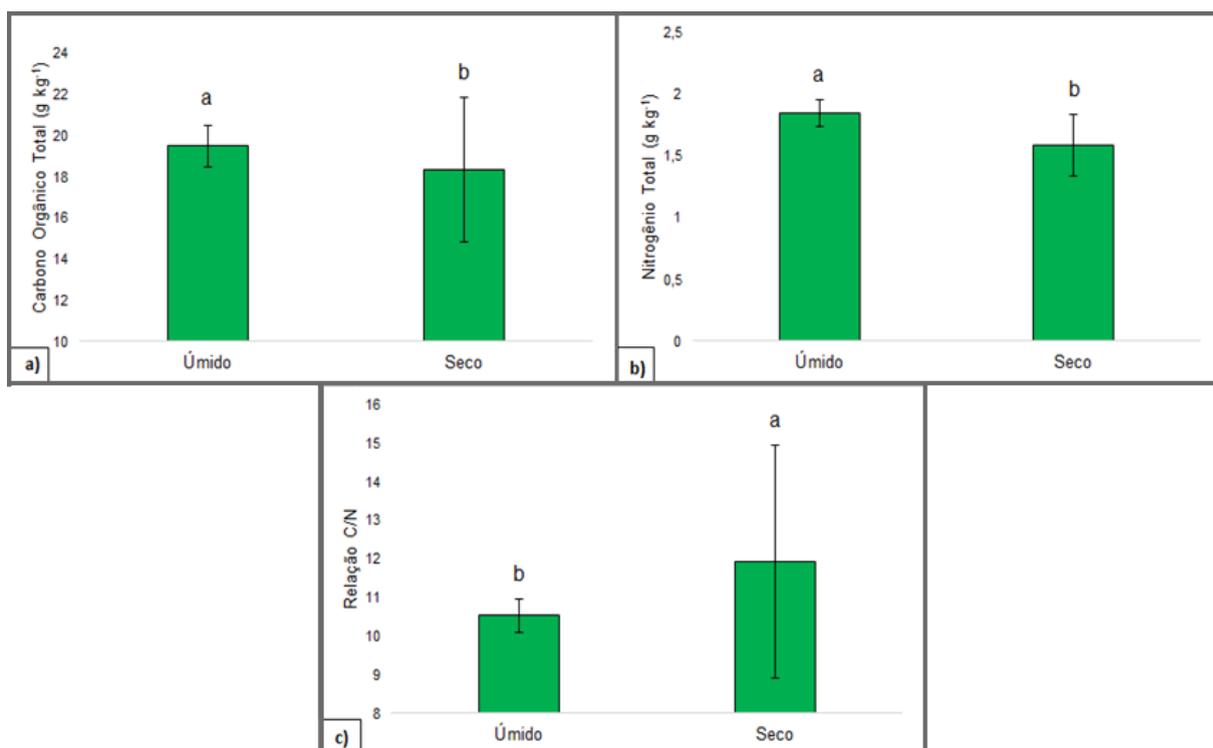


Figura 6. Teor de carbono (a), nitrogênio (b) e relação carbono/nitrogênio (c) no solo nos períodos seco e úmido, independente do ambiente de altitude, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Médias representadas por letras minúsculas semelhantes não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Apesar de não terem sido observadas diferenças no teor de C do solo nas diferentes altitudes, estudos apontaram que áreas com vegetação mais densa ou associadas à alta umidade e elevada precipitação apresentaram teores de C mais altos e, nas florestas secas, ocorre a maior proporção de C nos solos de florestas decíduas e semidecíduas, como resultado da elevada produção e decomposição da serapilheira, promovendo maior aporte de biomassa.

Entretanto, apesar de decíduas, as florestas secas aportam menor biomassa quando comparadas às florestas decíduas de maior umidade, resultando em menores teores de C orgânico no solo (ARRUDA *et al.*, 2015; TORRES, 2018).

Os teores de N do solo variaram com os períodos do ano, sendo mais elevados no período mais úmido (Figura 6b). Isso sugere que a disponibilidade de N no solo variou com a umidade, afetando as concentrações de N. No período úmido a decomposição da serapilheira é maior, fazendo com que haja uma maior incorporação de N no solo. Essas flutuações sazonais no teor de N do solo têm um impacto significativo na fertilidade e disponibilidade de nutrientes para as plantas e podem influenciar o crescimento vegetal em diferentes épocas do ano.

Os teores de C e N do solo não foram influenciados pelos diferentes ambientes de altitude (Tabela 3). A variação dos teores de C e N em diferentes altitudes está relacionada, tanto a variabilidade da vegetação nas diferentes altitudes, como em decorrência das condições climáticas, como temperatura, umidade e precipitação que influenciam nas características físico-químicas e atividade biológica do solo, afetando a disponibilidade desses elementos. Altitudes mais baixas e com temperaturas mais quentes, apresentam taxa de decomposição de matéria orgânica, geralmente, mais rápida, levando à liberação de N e C para o solo e de CO₂ para a atmosfera, desde que haja umidade suficiente. Enquanto que, em altitudes mais elevadas e mais úmidas, as temperaturas são mais baixas e a decomposição é mais lenta, contribuindo para um menor aporte de C e N para o solo. Fatores como erosão, lixiviação e espécies vegetais, também interferem nos teores de C e N do solo em diferentes altitudes. Esse, no entanto, é um tema bem controverso. É necessário compreender quem é mais importante na decomposição: se a temperatura ou a umidade. Nas áreas mais baixas do relevo, quando no período úmido, certamente haverá uma aceleração da decomposição, porque as temperaturas são mais elevadas, enquanto que nas áreas mais elevadas do relevo, mesmo havendo umidade, as temperaturas são mais baixas e podem interferir numa menor taxa de decomposição da matéria orgânica.

A relação C/N, ao contrário, do que ocorreu com os teores de C e N, foi menor no período mais úmido, em relação ao período seco (Figura 6c), evidenciando variações na relação entre C e N no solo de acordo com o período do ano.

As condições climáticas, como a quantidade de chuvas e a umidade do solo, variam significativamente entre os diferentes períodos do ano, assim, durante o período úmido, a atividade microbiana é intensificada e o C presente nos resíduos vegetais e animais é quebrado em compostos mais simples, liberando CO₂ para a atmosfera, resultando numa

redução da quantidade de C. Por outro lado, ocorre uma liberação acentuada de N, que é incorporado ao solo. Assim, se no período úmido há uma perda de C e um acúmulo de N, a relação C/N tende a se reduzir nesse período. No período seco, ocorre redução da atividade microbiana, da decomposição da matéria orgânica e da liberação de CO₂, ocasionando maior acúmulo de resíduos orgânicos não decompostos, aumentando a quantidade de C em relação ao N e, portanto, aumentando a relação C/N.

Essas variações na relação C/N do solo podem afetar a disponibilidade de nutrientes para as plantas, pois uma relação C/N baixa indica maior disponibilidade de N e outros nutrientes para as plantas, enquanto uma relação C/N alta, pode significar menor disponibilidade de nutrientes essenciais para o crescimento vegetal.

O estoque de C do solo só foi influenciado pelos ambientes de altitude, independente do período do ano (Tabela 3), tendo o ambiente de média altitude se diferenciado do ambiente de alta altitude e apresentado o mais alto estoque de C do solo. No entanto, o ambiente de baixa altitude não se diferenciou dos ambientes de média e alta altitude (Figura 7).

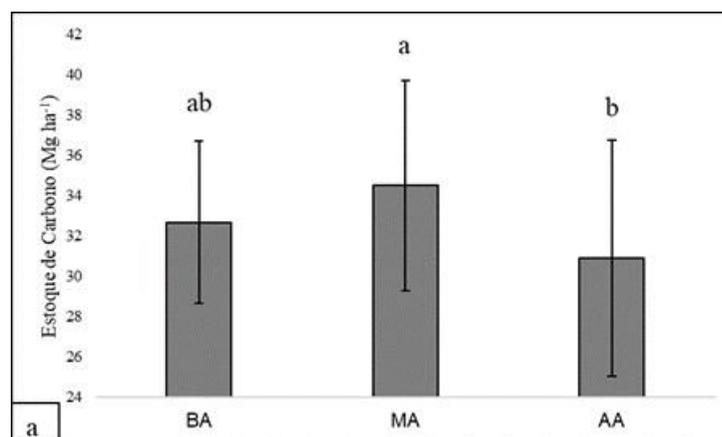


Figura 7. Estoque de carbono no solo nos diferentes ambientes de altitude, independente dos períodos seco e úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Médias representadas por letras minúsculas semelhantes não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). BA = Baixa altitude; MA = Média altitude; e AA = Alta altitude.

Portanto, constatou-se que houve variação na quantidade de C armazenado no solo entre os fragmentos florestais alocados nos diferentes gradientes de altitude. O estoque de C é a quantidade total de C em um sistema, logo, é o produto do teor de C pela massa do solo. Assim, massas mais densas tendem a estocar mais C. Embasado nisso, a diferença significativa do estoque de C do solo entre altitudes pode ter ocorrido em decorrência do diferente aporte de matéria orgânica nas áreas, influenciando na densidade do solo e,

consequentemente, no estoque de C. De fato, a densidade do solo foi menor no ambiente de maior altitude (Figura 8), sendo o solo de menor fertilidade natural, bastante ácido e com uma presença elevada de Al (Tabela 2), que floclula o solo e reduz a densidade. Portanto, a menor densidade do solo do ambiente de alta altitude não foi devida apenas aos teores de matéria orgânica, porém a uma característica bem típica dos Latossolos (Tabela 1), que é sua elevada acidez.

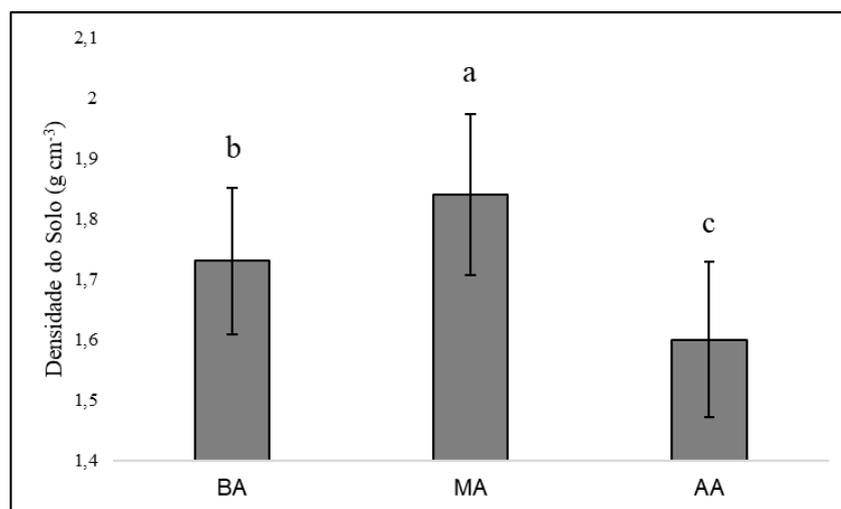


Figura 8. Densidade do solo nos diferentes ambientes de altitude, independente dos períodos seco e úmido, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Médias representadas por letras minúsculas semelhantes não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). BA = Baixa altitude; MA = Média altitude; e AA = Alta altitude.

No entanto, uma constatação importante que mostra a influência da matéria orgânica do solo em sua densidade, é que a área de média altitude foi a que apresentou os menores teores de matéria orgânica (Tabela 2), porém foi também a área com os maiores valores de densidade do solo (Figura 8).

Essa variação na densidade do solo entre as áreas ocorre em decorrência de uma combinação de fatores geológicos, climáticos e biológicos, visto que, a altitude do relevo reflete no tipo de rocha de formação, bem como, nas condições de intemperismo, erosão, matéria orgânica do solo, e variações climáticas, de forma que esses fatores influenciam nas propriedades físico-químicas e atividade biológica, afetando a densidade do solo (CRUZ *et al.*, 2003; MARCOLIN; KLEIN, 2011; SPERA *et al.*, 2004).

O estoque de C no solo não variou entre os períodos do ano (Tabela 3), possivelmente pelo fato do período chuvoso no ano de 2022 que ter sido acima da média de acordo com a série histórica dos últimos 10 anos. É comum ocorrer um aumento no teor de C do solo durante o período seco em consequência da baixa disponibilidade de água, o que causa uma

desaceleração na atividade biológica do solo, resultando em menor liberação de CO₂ para a atmosfera e, conseqüente, aumento do teor de C orgânico no solo (FIDALGO *et al.*, 2007; GIONGO *et al.*, 2011).

Flutuações sazonais no estoque de C afetam o balanço de C nos ecossistemas e podem ter implicações importantes nas mudanças climáticas globais. A decomposição e liberação de CO₂ durante o período úmido podem contribuir para o aumento do CO₂ atmosférico, enquanto a redução da decomposição durante o período seco pode atuar como um mecanismo temporário de armazenamento de C no solo (COSTA *et al.*, 2018; MEDEIROS *et al.*, 2020). É importante entender esses padrões sazonais para melhor gerenciar os ecossistemas e mitigar os impactos das mudanças climáticas.

Pesquisas quanto à determinação do estoque de C no solo são insuficientes no semiárido tropical brasileiro, segundo Giongo *et al.* (2011), principalmente, para estudos que envolvam diferentes ambientes de altitude e períodos do ano, sendo isso fundamental para planos de manejo mais sustentáveis, que objetivem conservação mais duradoura dos estoques de C do solo.

Em relação ao estoque de N do solo as áreas de baixa e média altitude não diferiram entre si, no entanto, apresentaram diferenças quando comparadas a área de alta altitude (Figura 9a). Quando comparados os períodos úmido e seco, foram observadas diferenças significativas no estoque de N do solo (Figura 9b), indicando que a umidade do solo afeta a disponibilidade de N e, pode influenciar a quantidade de N armazenada no solo.

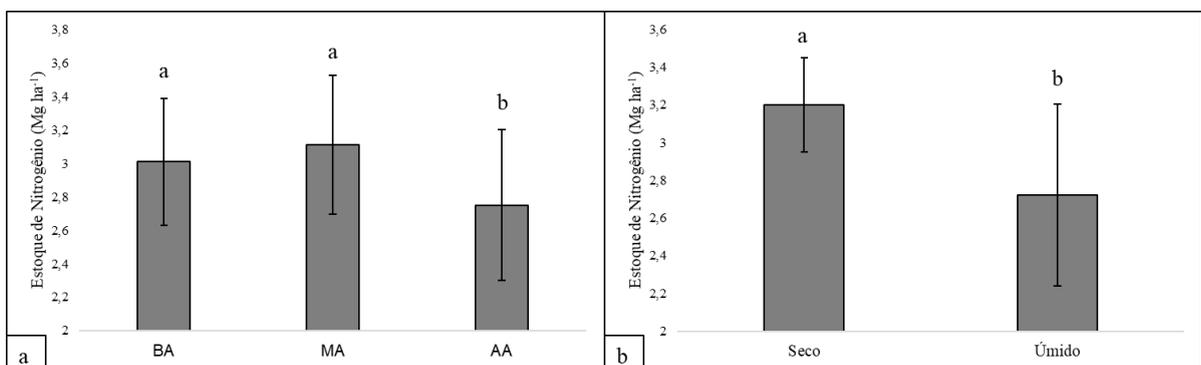


Figura 9. Estoque de nitrogênio no solo nos diferentes ambientes de altitude (a) e nos períodos seco e úmido (b), no Araripe em Pernambuco, Brasil. Médias representadas por letras minúsculas semelhantes não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). BA = Baixa altitude; MA = Média altitude; e AA = Alta altitude.

Essas informações indicam que a altitude do relevo e a variação sazonal entre os períodos úmido e seco afetam os estoques de N do solo. Essas diferenças podem ser explicadas

pelas condições ambientais e processos ecológicos. Isso se deve ao diferente acúmulo de matéria orgânica, devido a variação estrutural e fisiológica da vegetação e da disponibilidade pluviométrica, interferindo em processos biológicos, químicos e físicos.

Além dos fatores relativos ao tipo de vegetação, a matéria orgânica e atividade microbiana, que contribuem para variação dos estoques de N, deve se considerar ainda que, nas regiões semiáridas, a pluviosidade tende a variar com relação a altitude, ocorrendo mais chuva em regiões mais altas, e menor precipitação nas regiões mais baixas por, geralmente, estarem mais distantes das fontes de umidade e serem afetadas pela alta taxa de evapotranspiração, o que contribui para a aridez. Dessa forma, a quantidade de chuva influencia a lixiviação de nutrientes, incluindo o N do solo, além de interferirem nos processos erosivos de forma a remover camadas superficiais ricas em N, e depositá-las em áreas mais baixas. Adicionalmente, os Latossolos das áreas de topo da Chapada do Araripe são ácidos (Tabela 2) e estruturados, apresentando baixa densidade (Figura 8), o que facilita a lixiviação de N.

Durante o período úmido, a maior disponibilidade de água favorece a atividade microbiana no solo, o que aumenta a decomposição da matéria orgânica e liberação de N para o solo. Além disso, as chuvas podem lixiviar o N do solo, levando-o para camadas mais profundas ou até mesmo para corpos d'água.

Todas essas variações de teores e estoques de C e N e relação C/N podem ser consequência de fatores sazonais ou mudanças nas condições ambientais ao longo do tempo. Dessa forma, destaca-se a importância do monitoramento dos ambientes de altitude e da sazonalidade em florestas tropicais secas, como na Chapada do Araripe, na variabilidade dos atributos do solo, de forma a se obter informações relevantes para a compreensão dos processos ecológicos e da dinâmica do solo em um ecossistema.

4. CONCLUSÃO

Os teores de C e N foram maiores no ambiente úmido em relação ao seco, enquanto que a relação C/N apresentou resultado inverso, ou seja, foi maior no período seco.

No período úmido ocorreu um maior aporte de C no solo, sugerindo que a umidade do solo impactou nas taxas de acúmulo e decomposição do C da serapilheira.

Os teores de C do solo encontrados nos fragmentos florestais variaram de 17,8 a 21,6 g.kg⁻¹.

Os teores de C e N do solo não foram influenciados pelos diferentes ambientes de altitude e o estoque de C do solo só foi influenciado pelos ambientes de altitude, independente do período do ano, tendo o ambiente de média altitude se diferenciado do ambiente de alta altitude e apresentado o mais alto estoque de C do solo.

O estoque de C foi influenciado pela densidade do solo, com as áreas de topo tendo apresentado os menores valores de densidade, determinando-lhes menores estoques de C do solo.

O estoque de N do solo foi semelhante nas áreas de baixa e média altitude e foram maiores do que nas áreas de alta altitude. O estoque de N do solo no período úmido foi menor que no período seco, indicando que a umidade do solo afeta a disponibilidade de N e, pode influenciar a quantidade de N armazenada no solo.

Todas essas variações de teores e estoques de C e N e relação C/N podem ser consequência de fatores sazonais ou mudanças nas condições ambientais ao longo do tempo, sugerindo o monitoramento dos atributos do solo nos ambientes de altitude e da sazonalidade na Chapada do Araripe, de forma a se obter informações relevantes para a compreensão dos processos ecológicos e da dinâmica do solo nesse ecossistema.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, Kara *et al.* Will seasonally dry tropical forests be sensitive or resistant to future changes in rainfall regimes? **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 2, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5968>.

AQUINO, Deodato Nascimento *et al.* Belowground Carbon and Nitrogen on a Thinned and Un- Thinned Seasonally Dry Tropical Forest. **American Journal of Plant Sciences**, v. 08, n. 09, p. 2083–2100, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.89140>

ARAÚJO FILHO, R.N.; FREIRE, M.B.G.S.; WILCOX, B.P.; WEST, J.B.; FREIRE, F.J.; MARQUES, F.A. Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. **Forest Ecology and Management**, v. 407, p. 210-220, 2018.

ARAÚJO, S. M. S. A região semiárida do Nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Revista Rios Eletrônica**, São Paulo, v. 5, n. 5, p. 89-98, 2011.

ARRUDA, D. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MORAES, M. L. B. Relações entre Atributos do Solo e Vegetações da Região Ecotonal do Médio Rio São Francisco, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 39, p. 1524-1532, 2015.

BASTIN, Jean François *et al.* The extent of forest in dryland biomes. **Science**, v. 356, n.

6338, p. 635–638, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.aam6527>.

BROWN M.B.; FORSYTRE A.B. Robust test for equality of variances. **Journal of the American Statistical Association**, 69: 364-367, 1975.

CÂNDIDO, D. H.; NUNES, L. H. Influência da orografia na precipitação da área entre o Vale do rio Tietê e a Serra da Mantiqueira. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 24, p. 08- 27, 2008.

CAVALLI, E. et al. Decomposition and release of nutrients from crop residues on Soybean - maize cropping systems. **Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 13, n. 2, 2018.

COSTA, J. M. F. *et al.* Dinâmica de carbono do solo em unidade de conservação do cerrado brasileiro sob diferentes fitofisionomias. **Rev. Gestão Sustentavel Ambiental.**, v. 7, n. 4, p. 306-323, 2018.

CRUZ, A.C.R. *et al.* Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1105- 1112, 2003.

DE SOUZA, Bruna Vieira *et al.* Carbon in soil in different phisionomies of caatinga in Paraíba, Brazil. **Floresta**, v. 49, n. 2, p. 287-296, 2019.

FERREIRA, D. F. **SISVAR – Sistema de análise de variância**. Versão 5.6. Lavras: UFLA, 2014. Disponível em: <<https://des.ufla.br/~danielff/programas/sisvar.html>>. Acesso em: 09 ago. 2023.

FAQUIN, V. **Nutrição Mineral de Plantas. Curso de Pós-Graduação “Lato Sensu” (Especialização) a Distância: Solos e Meio Ambiente**. Lavras: UFLA / FAEPE, 2005.

FISSORE, C. *et al.* Influence of topography on soil organic carbon dynamics in a Southern California grassland. **Catena**, v. 149, p. 140-149, 2017.

FIDALGO, E.C.C. *et al.* **Estoque de carbono nos solos do Brasil**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, p.27, 2007.

GIONGO, V.; CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. S. M.; GAVA, C. A. T. Carbono no Sistema Solo-Planta no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, p. 1233-1253, 2011.

GUERRA, J.G.M.; SANTOS, G.A.; SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G.A *et al.* Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Porto Alegre, RS: Metrópole, p. 19-26, 2008.

HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON W. L.; BEATON, J. D. Soil fertility and fertilizers. New Jersey, Cap. 4, p. 117- 184, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report

of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

KAUFFMAN, J Boone *et al.* Biomass and Nutrient Dynamics Associated with Slash Fires in Neotropical Dry Forests Published by : Wiley on behalf of the Ecological Society of America Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/1939509> REFERENCES Linked references are available on JSTOR f. **Ecology**, v. 74, n. 1, p. 140–151, 1993.

LADHA, J. K.; REDDY, P. M. Nitrogen fixation in rice systems: state of knowledge and future prospects. **Plant and Soil**, v. 252, n. 1, p.151-167, 2003.

LIMA, André Luiz Alves *et al.* Do the phenology and functional stem attributes of woody species allow for the identification of functional groups in the semiarid region of Brazil? **Trees - Structure and Function**, v. 26, n. 5, p. 1605–1616, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0735-2>.

MARCOLIN, C.D.; KLEIN, V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum**. Agronomy Maringá, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.

MEDEIROS, A. S. *et al.* (2020). Análise de metodologia da cinética de evolução do CO₂ sob influência da temperatura e umidade do solo. Em: **A produção do conhecimento interdisciplinar nas ciências ambientais 3**. Ponta Grossa, PR: Atena.

MOURA, Patrícia M. *et al.* Carbon and nutrient fluxes through litterfall at four succession stages of Caatinga dry forest in Northeastern Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 105, n. 1, p. 25–38, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9771-4>.

NICHOLS, W. F.; KILLINGBECK, K.T.; AUGUST, P. V. The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity II. A landscape perspective. **Conservation Biology**, Washington, v.12, n.2, p.371-379, 1998.

OLIVEIRA, J. B. de. Pedologia Aplicada. 4. Ed. – Piracicaba: FEALQ, 2011.

PAUSTIAN, K., LEHMANN, J., OGLE, S. *et al.* Solos climaticamente inteligentes. **Natureza**, v. 532 ,p. 49–57, 2016.

PEREIRA JÚNIOR, Lécio Resende *et al.* Carbon stocks in a tropical dry forest in Brazil. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 47, n. 1, p. 32–40, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160004>.

PINHO, Bruno X. *et al.* Plant functional assembly is mediated by rainfall and soil conditions in a seasonally dry tropical forest. **Basic and Applied Ecology**, v. 40, p. 1–11, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.baae.2019.08.002>.

PUNCHI-MANAGE, R. *et al.* Effect of spatial processes and topography on structuring species assemblages in a Sri Lankan dipterocarp forest. **Ecology**, Tempe, v.95, n.2, p.376-386, 2014.

ROMERO, M. A. B. (2013) Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano. Brasília: Edu – UNB. RUFINO, D.C.; DINIZ NETO, M.A.; MELO, T.S. Estoque de carbono do solo em

agroecossistemas e vegetação secundária. **Research, Society and Development**, v.11, n.11, 2022.

SANTOS, F. L. A.; NASCIMENTO, F. R. Dinâmica hidroclimática do Planalto da Ibiapaba e sua depressão periférica circunjacente: estudo de caso nos municípios de Tianguá e Ubajara- Noroeste do Ceará. **Revista Ra'e Ga**, Curitiba, v. 39, p. 57-75, 2017.

SANTOS, J. N. B. *et al.* Diversity and structure of the arbor component in ravine and flat land environmental conditions: A case study in tropical rainforest, Brazil. **Journal of Agriculture and Ecology Research International**, local, v.15, n. 2, p. 1- 18, 2018.

SANTOS, Mauro G. *et al.* Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: Can it tolerate climate changes? **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, n. 1, p. 83–99, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40626-014-0008-0>.

SHAOLIN, P. *et al.* Special ecological effects of ravines in Danxia Landform, China. **Acta Ecologica Sinica**, Pequim, v.28, n.7, p. 2947-2953, 2008.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality. **Biometrika**, Oxford, v. 52, n.3/4, p. 591-611, 1965.

SILVA, A. C. F. *et al.* Carbon in forest species of the Atlantic Forest as an indicator of stocks and quality. **Floresta**, v. 51, n. 3, p. 630-638, 2021.

SILVA, E. D. G. da; ALVES, A. R.; HOLANDA, A. C. de; BEZERRA, R. M.; MAGALHÃES, A. S. Biomassa e nutrientes na parte aérea de espécies arbóreas da Caatinga, Rio Grande do Norte. **Nativa**, Sinop, v. 10, n. 1, p. 131-137, 2022

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.533-542, 2004.

TEWS, J. *et al.* Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/ diversity: the importance of keystone structures. **Journal of Biogeography**, Oxford, v.31, n.1, p.79-92, 2004.

TIAN, J. *et al.* Integrated management systems and N fertilization: effect on soil organic matter in rice-rapeseed rotation. **Plant and Soil**, v. 372, n. 1-2, p.53-63, 2013.

Torres, J. E. de L. Regeneração natural do componente arbustivo-arbóreo e atributos do solo em áreas com diferentes altitudes no Semiárido pernambucano. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Recife, 2018, 107 f.

TRUMBORE, S.; CAMARGO, P. B. Soil carbon dynamics. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, v. 186, p. 451-462, 2009.

TUCCI, C. E. M. Processos hidrológicos naturais e antrópicos. In: TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. **Avaliação Ambiental Integrada de Bacia Hidrográfica**. Brasília: MMA, p. 15-91, 2006.

ZAMAN, M.; SAGGAR, S.; BLENNERHASSETT, J. D.; SINGH, J. Effect of urease

and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 41, p. 1270-1280, 2009.

ZHONG, X. *et al.* Physical protection by soil aggregates stabilizes soil organic carbon under simulated N deposition in a subtropical forest of China. *Geoderma*, v. 285, p.323-332, 2017.

CAPÍTULO III

**ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SISTEMA SOLO-VEGETAÇÃO
EM ÁREA DE FLORESTA TROPICAL SECA NO NORDESTE BRASILEIRO**

RESUMO

A vegetação e o solo estão intimamente interligados, de forma que é através do estrato florestal que ocorre a principal fonte de deposição de matéria orgânica no solo e seu fluxo é determinado a partir do equilíbrio existente entre a entrada de material orgânico e a saída de CO₂ do ambiente. Entender essa dinâmica, entre os compartimentos da vegetação e do solo é fundamental para buscar-se o equilíbrio sustentável nessa região do Araripe pernambucano. Assim, o objetivo desse estudo foi correlacionar as variáveis das plantas e do solo mais relacionadas aos estoques de C e N em diferentes espécies florestais de fragmentos florestais preservados, alocados em três níveis de altitude de uma topossequência, em dois períodos do ano, no Araripe de Pernambuco, Brasil. A partir de um levantamento fitossociológico, escolheu-se as espécies florestais que se repetiam nos três ambientes de altitude para quantificação do estoque de C e N. As coletas das amostras de material vegetal e solo, ocorreram nos dois períodos extremos quanto a precipitação pluviométrica: Úmido e seco. A primeira coleta foi realizada em março e a segunda em setembro de 2022. As espécies estudadas foram: *Annona leptopetala* (R.E.Fr.), *Bauhinia subclavata* Benth., *Guapira opposita* (Vell.) Reitz, *Combretum glaucocarpum* Mart. A estimativa da biomassa das folhas e do lenho por planta foi realizada por meio de equações alométricas. Para calcular os estoques de C e N, determinou-se o teor de C e N nas folhas e no lenho. Os estoques de C e N por indivíduo, foram calculados através do produto dos teores de C e N pela biomassa do indivíduo naquela fração vegetal. Para caracterização química dos solos foram retiradas, aleatoriamente, 20 amostras simples de solo, coletadas na profundidade de 0 – 20 cm, formando-se, posteriormente, uma amostra composta de solo, em cada um dos fragmentos dos ambientes de alta, média e baixa altitude. Nas amostras determinou-se os teores de C e N por via seca. Para calcular os estoques de C e N do solo, é necessário mensurar sua densidade. Assim, foram coletadas amostras indeformadas e a densidade do solo mensurada pelo método do anel volumétrico. Posteriormente, os estoques de C e N no solo (Mg ha⁻¹) foram calculados. As variáveis de biomassa de folha, biomassa de lenho, biomassa da parte aérea, estoque de C na folha, estoque de N na folha, estoque de C no lenho, estoque de N no lenho, estoque de C total e estoque de N total foram altamente correlacionadas entre si, sugerindo que variáveis fortemente relacionadas tendem a variar juntas. O aumento do N no lenho relacionou-se com a diminuição do N e seu estoque no solo. Isso é importante para direcionar o manejo de corte das espécies florestais, de modo, que se mantenha os estoques de N sustentáveis, preservando a Chapada do Araripe e todo seu ecossistema. No entanto, observou-se uma correlação fraca entre o C da planta e o estoque de C do solo, evidenciando um ambiente desequilibrado, com um desprendimento de C do solo maior do que seu ciclo natural. Isso pode estar associado uma exploração pouco monitorada da Caatinga, expondo a matéria orgânica do solo a uma decomposição mais acelerada, o que leva a perdas elevadas de C do solo. Constatou-se uma correlação, de maneira geral, positiva entre variáveis do solo com variáveis da planta, mostrando haver ciclagem de nutrientes, com uma significativa participação dos nutrientes do solo. As espécies florestais Sipauba e Pau piranha apresentaram as maiores produções de biomassa e, conseqüentemente, os maiores estoques de C e N. Por outro lado, a Bananinha e o Mororo apresentaram os maiores teores de C e N, principalmente no período seco. Concomitantemente, as áreas de alta altitude produziram mais biomassa e estocam mais C e N, evidenciando que essas áreas e espécies precisam ser monitoradas para que os planos de manejo na região sejam sustentáveis.

Palavras-chave: Carbono no solo e na vegetação; Nitrogênio no solo e na vegetação; Espécies florestais na Chapada do Araripe.

ABSTRACT

Vegetation and soil are closely interconnected, so it is through the forest stratum that the main source of deposition of organic matter in the soil occurs and its flow is determined based on the balance between the input of organic material and the output of CO₂ of the environment. Understanding this dynamic between these vegetation and soil compartments is fundamental to seeking sustainable balance in this region of Araripe in Pernambuco. Thus, the objective of this study was to correlate the plant and soil variables most related to C and N stocks in different forest species from preserved forest fragments, allocated at three altitude levels of a toposequence, in two periods of the year, in Araripe from Pernambuco, Brazil. From a phytosociological survey, forest species that were repeated in the three altitude environments were chosen to quantify the C and N stock. Samples of plant material and soil were collected during the two extreme periods in terms of rainfall: Wet and dry. The first collection was carried out in March and the second in September 2022. The species studied were: *Annona leptopetala* (R.E.Fr.), *Bauhinia subclavata* Benth., *Guapira opposita* (Vell.) Reitz, *Combretum glaucocarpum* Mart. The estimation of leaf and wood biomass per plant was carried out using allometric equations. To calculate C and N stocks, the C and N content in leaves and wood was determined. The C and N stocks per individual were calculated through the product of the C and N contents by the individual's biomass in that plant fraction. For chemical characterization of the soil, 20 simple soil samples were randomly taken, collected at a depth of 0 – 20 cm, subsequently forming a composite soil sample in each of the fragments from the high, medium and low altitude environments. The C and N contents were determined in the samples dryly. To calculate soil C and N stocks, it is necessary to measure their density. Thus, undisturbed samples were collected and soil density was measured using the volumetric ring method. Subsequently, soil C and N stocks (Mg ha⁻¹) were calculated. The variables of leaf biomass, wood biomass, shoot biomass, leaf C stock, leaf N stock, wood C stock, wood N stock, total C stock and total N stock were highly correlated with each other, suggesting that strongly related variables tend to vary together. The increase in N in wood was related to the decrease in N and its stock in the soil. This is important to direct the felling management of forest species, so that sustainable N stocks are maintained, preserving Chapada do Araripe and its entire ecosystem. However, a weak correlation was observed between plant C and soil C stock, demonstrating an unbalanced environment, with a release of C from the soil greater than its natural cycle. This may be associated with poorly monitored exploitation of the Caatinga, exposing soil organic matter to more accelerated decomposition, which leads to high losses of soil C. A generally positive correlation was found between soil variables and plant variables, showing that there is nutrient cycling, with a significant participation of soil nutrients. The forest species *Sipauba* and *Pau piranha* presented the highest biomass production and, consequently, the highest C and N stocks. On the other hand, *Bananinha* and *Mororo* presented the highest C and N contents, especially in the dry period. At the same time, high-altitude areas produced more biomass and stored more C and N, showing that these areas and these species need to be monitored so that management plans in Chapada do Araripe become more sustainable.

Keywords: Carbon in soil and vegetation; Nitrogen in soil and vegetation; Forest species in Chapada do Araripe.

1. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas terrestres, através das florestas, abrigam grande parte da biomassa, que aporta elementos químicos essenciais à sobrevivência da planta, como o C e N. Dentre essas florestas, as tropicais secas são habitats terrestres com uma elevada biodiversidade e capacidade de armazenamento de grandes quantidades de C e N (HOUGHTON, 2008; MAGNAGO *et al.*, 2015; MA *et al.*, 2017). Essa tipologia de formação florestal é típica de regiões marcadas pela distribuição sazonal das chuvas e prolongada estação seca (ALLEN *et al.*, 2017), além de, possuírem uma estrutura extremamente irregular e semelhanças florísticas entre os tipos de vegetação, atribuídas, principalmente, às condições edafoclimáticas (LIMA *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2014; PINHO *et al.*, 2019).

A biomassa vegetal exerce o importante papel da fotossíntese, retirando CO₂ da atmosfera e estocando em sua biomassa. Esse estoque de C nas florestas é um dado essencial nas estimativas de absorção e emissão de C no ambiente, além de se tratar de um parâmetro básico no estudo das trocas gasosas entre o ambiente e a atmosfera (WANG *et al.*, 2013).

Estimar C e N em florestas tropicais, ainda, é um desafio, mesmo com os avanços científicos e a criação de modelos e equações que quantificam esses estoques de biomassa e C na região tropical. É através da biomassa arbórea que é possível determinar a quantidade de CO₂ absorvida da atmosfera pelas árvores e, conseqüentemente, os estoques de C nas florestas (WEST, 2015).

Outra parcela significativa do C do planeta é armazenada nos solos, tornando-os um dos maiores reservatórios de C do planeta (BERNER; LAGASA, 1989). Já o N é armazenado, principalmente, na atmosfera da Terra, mas também está presente em quantidades menores nos solos, corpos d'água e organismos vivos. Os estoques de C e N nos solos podem ser influenciados pelo tipo de vegetação, clima, prática agrícola, manejo florestal e urbanização. A perda de C do solo pode ocorrer através do desmatamento, queimadas e mudanças no uso da terra, causando as emissões de C (CO₂) para a atmosfera, favorecendo o aquecimento global, enquanto que, o N é perdido do solo através dos processos de lixiviação, desnitrificação e volatilização (CORADO NETO *et al.*, 2015; COSTA *et al.*, 2008; D'ANDRÉA *et al.*, 2010, RUFFINO *et al.*, 2022).

A gestão adequada dos estoques de C e N nos solos é essencial para a sustentabilidade dos ecossistemas terrestres, a segurança alimentar e a mitigação das mudanças climáticas. Estratégias como o manejo sustentável da terra, a adoção de práticas agrícolas conservacionistas e a restauração de ecossistemas degradados podem ajudar a aumentar a

capacidade do solo de armazenar esses elementos, favorecendo a qualidade do solo e a resiliência do ambiente.

A capacidade de armazenamento de C e N nas plantas e no solo, apresenta-se como medida mitigadora aos efeitos das mudanças climáticas, e para isso, a quantificação do estoque de C na biomassa dos ecossistemas é fundamental para desenvolver estratégias sustentáveis. No entanto, pouco se conhece sobre as diferenças da vegetação em diferentes altitudes, e quando se trata de estoque de C e N em topossequência de floresta seca, o déficit de estudos é ainda maior. Sabe-se que a densidade da biomassa varia espacialmente e temporalmente de acordo com os tipos de ecossistemas e, a maioria das áreas florestais, estão acumulando continuamente C, embora, geralmente, em taxas mais baixas à medida que envelhecem (HOUGHTON *et al.*, 2009). Na Chapada do Araripe, esse acúmulo de C é ainda mais diminuído, porque há uma exploração da Caatinga, cuja madeira é utilizada como fonte de energia para calcinar a gipsita, oriunda de muitas áreas mineradas na região.

A vegetação e o solo estão intimamente interligados, de forma que é através do estrato florestal que ocorre a principal fonte de deposição de matéria orgânica no solo e seu fluxo é determinado a partir do equilíbrio existente entre a entrada de material orgânico e a saída de CO₂ do ambiente (COSTA *et al.*, 2013). Sendo assim, entende-se que os estoques de C e N na biomassa florestal e no solo, podem sofrer variação quanto à tipologia vegetal, os gradientes de altitude, bem como as características do solo, desses ambientes, como é o caso da Chapada do Araripe. Entender essa dinâmica, entre esses compartimentos da vegetação e do solo é fundamental para buscar-se o equilíbrio sustentável nessa região.

Nesse contexto, para analisar a relação solo-vegetação, se faz necessário levar em consideração um conjunto de dados que envolvem múltiplas variáveis, entendendo as relações complexas entre elas, identificando padrões, tendências e correlações. Para isso, a análise multivariada de componentes principais pode servir para agrupar indivíduos com características semelhantes e estudar suas correlações, em situações que podem não ser evidentes em análises univariadas (VALLADARES *et al.*, 2008).

A hipótese desse estudo é que as diferentes variáveis se correlacionam entre si, demonstrando que a sazonalidade, caracterizada pela alternância de períodos úmidos e secos e, os ambientes de altitude, são fatores diretamente relacionados com os estoques de C e N na Chapada do Araripe. Objetivou-se correlacionar as variáveis das plantas e do solo mais relacionadas aos estoques de C e N em diferentes espécies florestais de fragmentos florestais preservados, alocados em três níveis de altitude de uma topossequência, em dois períodos do ano, no Araripe de Pernambuco, Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em nove fragmentos de floresta tropical sazonalmente seca localizados em três gradientes de altitude numa topossequência, sendo três fragmentos em cada nível de altitude. As áreas dos fragmentos estão localizadas na região do Polo Gesseiro do Araripe, na Área de Proteção Ambiental (APA) da Chapada do Araripe, Sertão de Pernambuco (Figura 1).

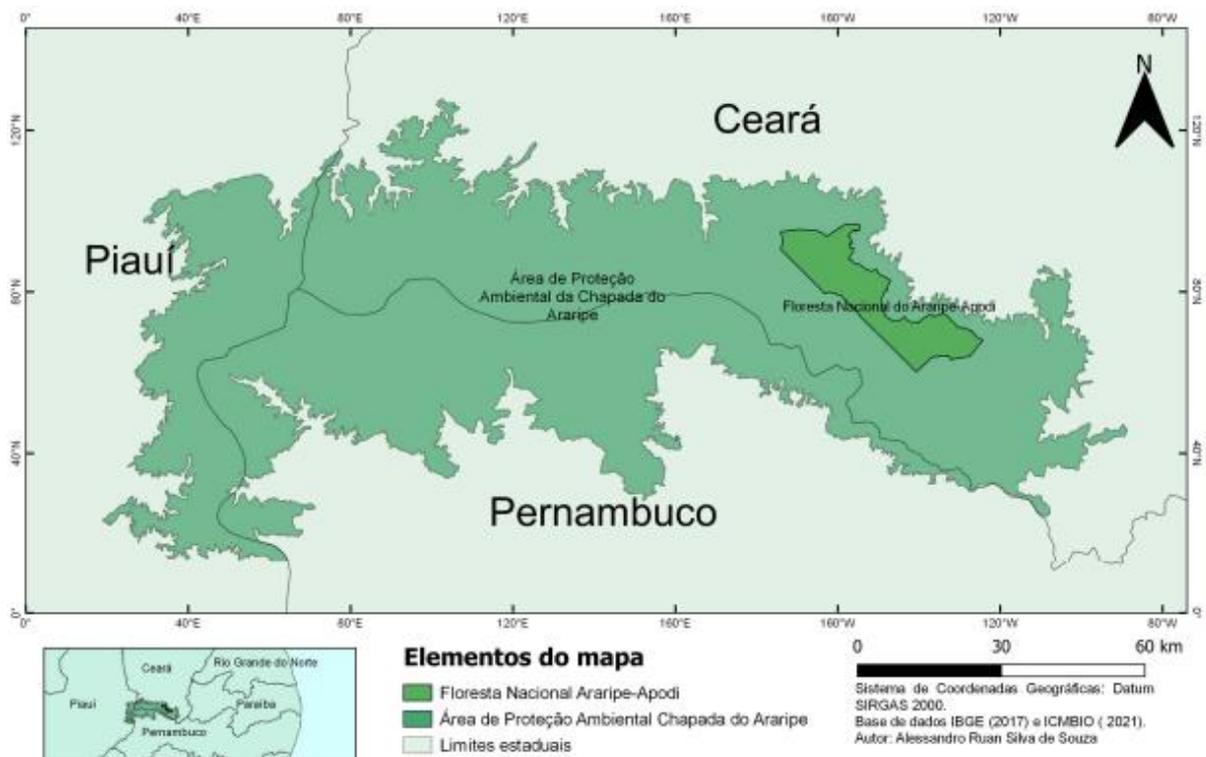


Figura 1. Localização da Área de Proteção Ambiental (APA) na Chapada do Araripe
 FONTE: Souza; Bezerra. (2022).

A região apresenta o clima do tipo BSh', quente e seco segundo a classificação de Köppen (1984), caracterizado como tropical zona equatorial, semiárido (ALVARES *et al.*, 2013). As altitudes variam, entre 400 e 1100 m, temperatura anual variável de 24 °C a 26 °C, chegando a 18 °C no mês mais frio. A precipitação anual é em torno de 500 mm e a estação seca chega a se prolongar de 7 a 10 meses, com estação chuvosa iniciando-se entre setembro e outubro (LOPES, 2005). A semiaridez é acentuada na parte mais baixa da Chapada do Araripe, onde os totais anuais precipitados variam entre 400 e 500 mm, enquanto que na parte mais alta,

as precipitações atingem médias entre 700 e 800 mm (TORRES, 2018).

A formação vegetal do Araripe pernambucano apresenta fisionomias florestais distintas, e a formação vegetal da região é classificada como Caatinga do tipo Savana Estépica, que apresenta variações originadas pelos gradientes de altitudes e em área de transição denominada ecótono ecológico (IBGE, 2012; SANTOS *et al.*, 2020a.).

Observou-se na Chapada do Araripe variação edafoclimática das áreas de estudo, como fatores determinantes nas formações da tipologia vegetal para cada ambiente (alta altitude, média altitude e baixa altitude (Tabela 1).

Tabela 1. Localização e características climáticas, vegetais e de solo dos ambientes de baixa, média e alta altitude em floresta tropical seca ao longo de um dos fragmentos de cada topossequência no Araripe em Pernambuco, Brasil

Ambiente	Baixa altitude	Média altitude	Alta altitude
	Araripina, Pernambuco	Araripina, Pernambuco	Araripina, Pernambuco
Localização	(07°46'58,28"S e 40°27'13,73"O)	(07°31'9,16"S e 40°30'54,01"O)	(07°25'36,28"S e 40°25'44,71"O)
Área	100 ha	100 ha	20 ha
Clima¹	BShw'	BShw'	BShw'
Altitude	540 m	664 m	847 m
Precipitação²	400-500 mm	400-500 mm	700-800 mm
Temperatura¹	24 a 26 °C	24 a 26 °C	24 a 26 °C
Domínio³	FTS ⁴	FTS	FTS
DA (ni ha⁻¹)⁵	872	1.688	1.288
H' (nats ha⁻¹)⁶	2,45	2,33	2,32
Solo	Argissolo	Neossolo	Latossolo Amarelo
Classificação	Vermelho-Amarelo (PVA) ⁷	Litólico (NL) ⁷	distrófico (LAd) ^{7,8}

¹Clima das estepes quentes de baixa latitude e altitude ou clima semiárido quente (ALVARES *et al.*, 2013); ²LOPES (2005); ³IBGE (2012); ⁴Floresta Tropical Seca; ⁵Densidade absoluta (número de indivíduos ha⁻¹); ⁶Índice de diversidade de Shannon-Wiener; ⁷EMBRAPA (2013); ⁸REZENDE (2017).
Fonte: Freire (2018).

2.2 FRAGMENTOS FLORESTAIS ESTUDADOS

Os fragmentos florestais estudados foram previamente alocados de acordo com a sua posição no relevo e distribuídos em três diferentes altitudes, seguindo a seguinte nomenclatura: Ambiente de baixa altitude (BA), representado pelos fragmentos florestais com até 600 m de altitude; Ambiente de média altitude (MA), representado pelos fragmentos com altitude entre 600 e 750 m; e Ambiente de alta altitude (AA), representado pelos fragmentos com mais de 750 m de altitude, conforme proposto por Cunha (2017). Para cada uma dessas altitudes os fragmentos florestais foram previamente selecionados, tendo como principal critério, o bom estado de conservação das florestas nativas. Em cada altitude, selecionou-se três fragmentos, considerando-se como as repetições experimentais.

Em cada fragmento foram abertas 20 parcelas permanentes alocadas sistematicamente a 25 m uma das outras, totalizando 180 unidades amostrais retangulares, com dimensões de 10 x 25 m, somando uma área amostral de 4,5 ha, sendo 1,5 ha por altitude. A partir dessa amostragem, realizou-se o levantamento fitossociológico, no qual determinaram-se as espécies que se repetem em todas as altitudes do relevo e que foram utilizadas nesse estudo para quantificação do estoque de C e N na vegetação (SANTOS *et al.*, 2020).

2.3 PERÍODOS AVALIADOS

Foram obtidos dados de precipitação anual e mensal, provenientes da base de dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e temperatura do ar, proveniente da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estes dados foram disponibilizados pelo Laboratório de Meteorologia do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (LAMEP/ITEP) e permitiram calcular a precipitação pluviométrica dos últimos 10 anos (2012-2022), demonstrando uma irregularidade no regime hídrico da região, cujo acumulado mensal oscilou entre 140 mm (março) e quase zero mm (agosto/setembro), sendo os meses de janeiro a março os mais chuvosos e agosto e setembro os mais secos, com temperatura média de 26,0 °C, sendo os meses de janeiro/novembro/dezembro os mais quentes e junho/julho/setembro os meses mais frios (Figura 2A). Também foi possível observar uma irregularidade no regime hídrico da região em 2022, ano de coleta dos dados, cujo acumulado mensal oscilou entre 200 mm (março) e 6 mm (agosto/setembro), sendo os meses de janeiro e março os mais chuvosos e agosto e setembro os mais secos, com temperatura média de 27,0 °C, com os meses de setembro e outubro os mais quentes e junho/julho os meses mais frios (Figura 2B).

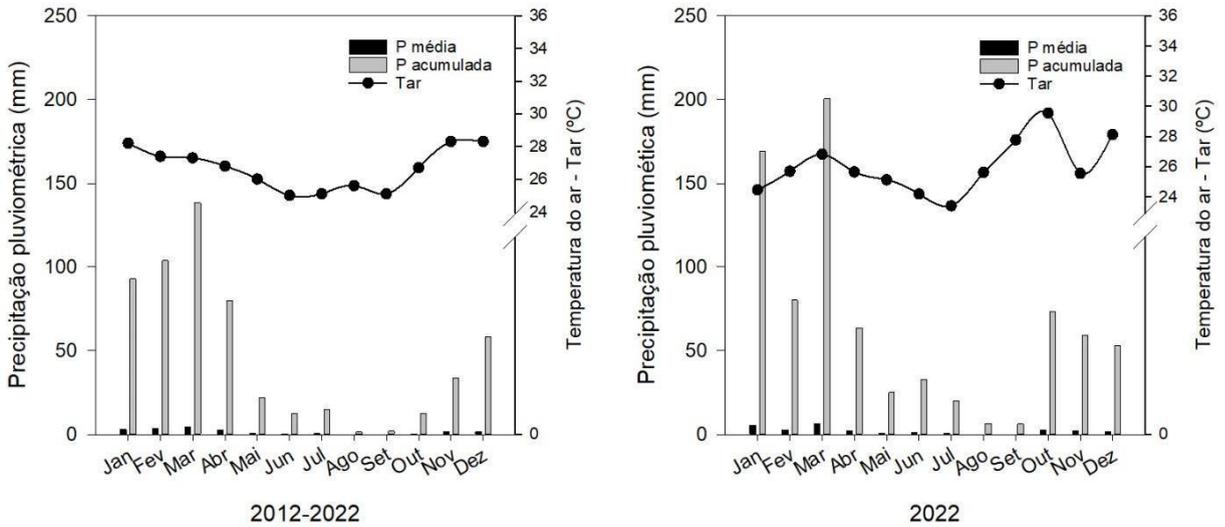


Figura 2. Variação da precipitação pluviométrica média e acumulada e da temperatura entre a série histórica de 2012 a 2022 e o ano de 2022, no Araripe em Pernambuco, Brasil.

De posse dos dados de pluviosidade e temperatura da série histórica, foram definidos quatro períodos: Úmido, seco e de transição úmido-seco e seco-úmido (Figura 3). Sendo considerado os meses de janeiro a março como período úmido, cuja precipitação acumulada foi em média 110 mm; Junho a setembro como período seco, com precipitação acumulada média de 10 mm; e os períodos de transição: Úmido-seco representado pelos meses de abril e maio; e Seco-úmido representado pelos meses outubro a dezembro com médias de 48 mm, respectivamente.

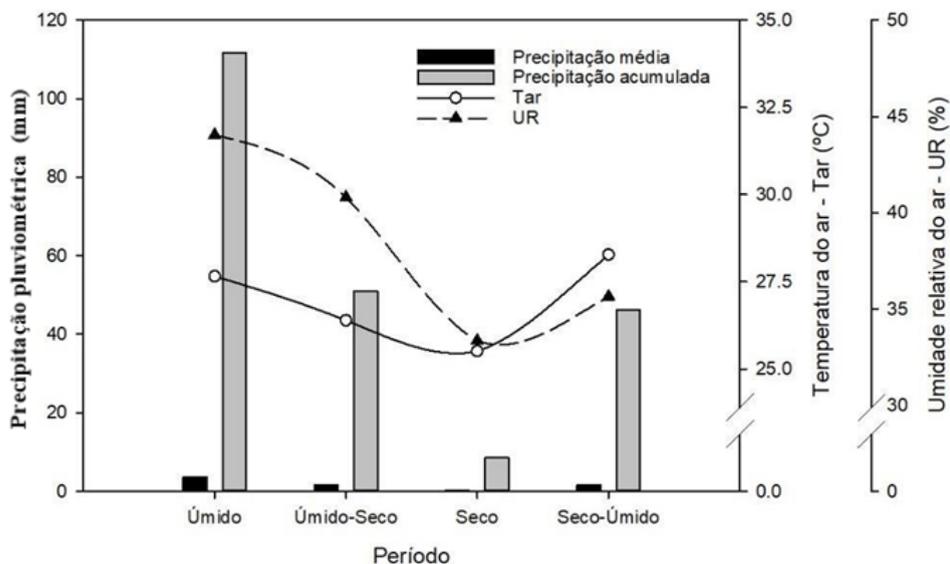


Figura 3. Série histórica de 2012 a 2022 da precipitação pluviométrica, temperatura e umidade, mostrando a média acumulada da precipitação e a precipitação média dos períodos anuais definidos como, úmido e seco e suas transições: Úmido-seco e seco-úmido, bem como a temperatura e a umidade relativa média, no Araripe em Pernambuco, Brasil.

As coletas das amostras de material vegetal ocorreram nos dois períodos extremos quanto à precipitação pluviométrica: Úmido e Seco. A primeira coleta foi realizada em março e a segunda em setembro de 2022. A determinação dos períodos de transição foram para caracterizar melhor os períodos úmido e seco e garantir que a amostragem fosse realizada apenas nessas condições hídricas. Assim, notou-se que tanto para a precipitação média mensal do período, quanto para o acumulado da precipitação, a média histórica de precipitação do período seco dos últimos dez anos foi inferior ao ano de 2022 (Figura 4A e B), caracterizando uma maior condição histórica de umidade na região em 2022, sendo esse ano, portanto, mais úmido do que a média histórica. Entretanto, como a coleta desse período ocorreu em setembro, pode-se dizer que setembro/2022 não foi diferente do setembro dos últimos dez anos.

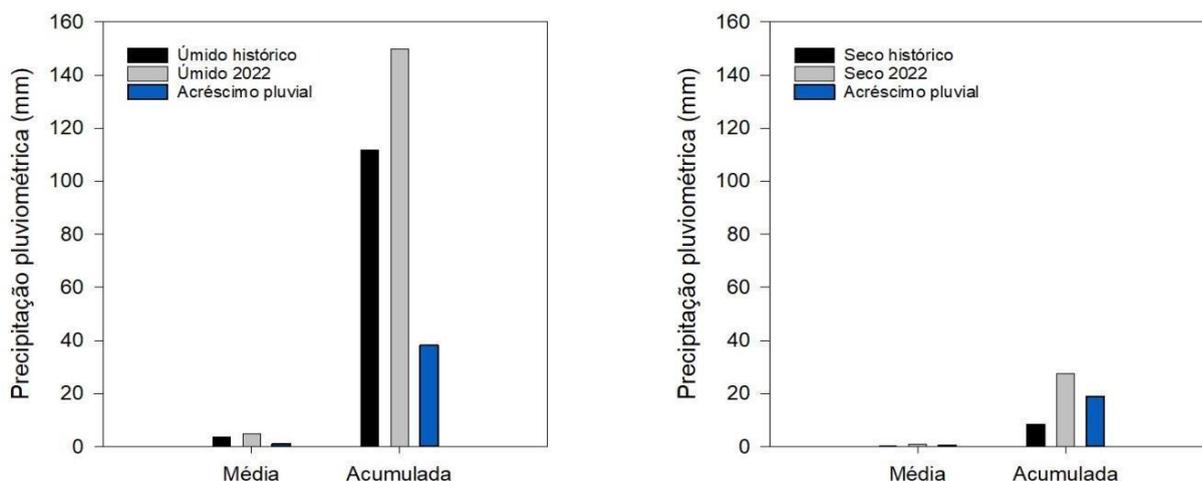


Figura 4. Comparação da precipitação pluviométrica média e acumulada nos períodos úmido e seco entre a série histórica de 2012 a 2022 e o ano de 2022, mostrando que esses períodos historicamente foram mais secos do que o ano de 2022, no Araripe em Pernambuco, Brasil.

2.4 SELEÇÃO DAS ESPÉCIES FLORESTAIS

As espécies vegetais foram selecionadas com base na ocorrência dessas espécies em todos os ambientes de altitude, ou seja, foi critério de escolha das espécies vegetais essa condição de ocorrer simultaneamente nas três condições de diferentes altitudes na topossequência. Essa escolha foi possível porque se utilizou os dados do levantamento florístico e fitossociológico de indivíduos adultos realizado por Santos (2019), nos três ambientes de diferentes altimetrias. Assim, foram selecionadas espécies de diferentes famílias botânicas e com diferentes densidades absolutas (Tabela 2).

Tabela 2. Espécies florestais selecionadas de ocorrência simultânea em todos os ambientes de diferentes altitudes e suas respectivas distribuições nos fragmentos no Araripe em Pernambuco, Brasil

Espécie	Nome popular	Família	Altitude		
			Baixa	Média	Alta
Densidade absoluta (ind. ha ⁻¹)					
<i>Annona leptopetala</i> (R.E.Fr.)	Bananinha	Annonaceae	110	42	126
<i>Bauhinia subclavata</i> Benth.	Mororo	Fabaceae	64	26	12
<i>Guapira opposita</i> (Vell.) Reitz	Pau Piranha	Nyctaginaceae	48	160	434
<i>Combretum glaucocarpum</i> Mart.	Sipaúba	Combretaceae	16	956	62

2.5 ESTIMATIVA DA BIOMASSA AÉREA E CÁLCULO DOS ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO

A estimativa da biomassa das folhas (MF) e do lenho (MCG) por planta foi realizada por meio de equações alométricas ajustadas por Silva; Sampaio (2008), em espécies lenhosas com diâmetro a altura do peito (DAP) igual ou maior a 3,0 cm, através do método não destrutivo, levando em consideração as medidas da altura à 1,30 m do solo (CAP) em todos os indivíduos das quatro espécies arbóreas selecionadas. Essas equações alométricas foram desenvolvidas para espécies vegetais em floresta tropical seca, como na região do Araripe (Tabela 3).

Tabela 3. Equações alométricas utilizadas para estimativa da biomassa aérea de folhas e lenho em floresta tropical seca de acordo com Silva; Sampaio (2008)

Partes da planta	Equação
¹ Lenho (² DAP > 10,0 cm)	³ $\bar{Y} = 0,0082 \times \text{DAP}^{2,8151}$
Lenho (5.1 < DAP ≤ 10,0 cm)	$\bar{Y} = 0,1331 \times \text{DAP}^{1,5784}$
Lenho (1.1 ≤ DAP ≤ 5,0 cm)	$\bar{Y} = 0,5737 \times \text{DAP}^{1,6847}$
Folhas	$\bar{Y} = 0,1900 \times \text{DAP}^{2,0515}$

¹Lenho = caule + galhos; ²DAP = Diâmetro à altura do peito (cm); ³ \bar{Y} = Biomassa (kg).

A estimativa da biomassa da parte aérea (MPA) composta pelas folhas (MF) e lenho (MCG), em cada espécie, foi obtida da seguinte forma: Foram selecionados de cada espécie cinco indivíduos sadios, semelhantes quanto ao porte e ao desenvolvimento vegetativo em cada ambiente de diferentes altitudes e, sempre que possível, nos três fragmentos que representavam cada ambiente de diferentes altitudes, de modo que a amostragem dos indivíduos representasse a distribuição da espécie na alta, média e baixa altitude. Nesses indivíduos mensurou-se o DAP e aplicou-se as equações alométricas específicas para cada classe de DAP, bem como a equação específica para as folhas (Tabela 3). Por fim, obteve-se a biomassa média por indivíduo de cada espécie selecionada, tanto para folhas, quanto para lenho (caule + galhos), bem como para biomassa da parte aérea (folhas + lenho).

Essa estimativa de biomassa só foi possível no período úmido, porque no período seco ocorre perda das folhas, tendo-se que a biomassa da parte aérea no período seco é representada apenas pela biomassa do lenho.

A biomassa da parte aérea total por área também foi calculada da seguinte forma: com os dados de DAP (SANTOS, 2019) de todos os indivíduos de cada espécie selecionada, obteve-se o DAP médio da espécie, obtendo-se, em seguida, a biomassa média de folhas e a biomassa média de lenho (Tabela 3). Assim, com os dados de densidade absoluta de cada espécie, pôde-se obter a biomassa de folhas por área, a biomassa de lenho por área e a biomassa da parte aérea total por área, para cada espécie selecionada.

Para determinar os estoques de C e N, inicialmente é necessário mensurar o teor ou a concentração de C e N nas folhas e no lenho, ou seja, na biomassa vegetal. Para determinação dos teores de C e N na biomassa vegetal, foram selecionados de cada espécie cinco indivíduos sadios, semelhantes quanto ao porte e ao desenvolvimento vegetativo. Foram amostradas folhas recém-maduras e sadias localizadas nos quatro pontos cardinais do terço médio superior da copa das árvores, bem como, amostras do lenho coletadas pelo método não destrutivo, utilizando broca adaptada com serra-copo. As amostras foram secas em estufa a 60 °C até obtenção do peso constante e, posteriormente, moídas em moinho tipo Willey, determinando-se os teores de C e N, através de analisador elementar, via combustão seca.

Os estoques de C e N por indivíduo, foram calculados através do produto dos teores de C e N determinados na parte aérea (folhas e lenho, separadamente) pela biomassa do indivíduo naquela fração vegetal. Para o estoque total de C e N por área, calculou-se o produto do estoque individual pela densidade absoluta de cada espécie.

2.6 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS

Para caracterização química dos solos nos diferentes ambientes de altitude foram retiradas, aleatoriamente, 20 amostras simples de solo, coletadas na profundidade de 0 – 20 cm, formando-se, posteriormente, uma amostra composta de solo, em cada um dos fragmentos dos ambientes de alta, média e baixa altitude. Como em cada ambiente de altitude existiam três fragmentos e em cada fragmento foram alocadas 20 parcelas para os estudos fitossociológicos, foi realizada uma amostragem de solo em cada uma dessas parcelas de 10 x 25 m, totalizando 20 amostras simples por fragmento e 60 amostras simples por ambiente de altitude. Essas 60 amostras simples se tornaram três amostras compostas por ambiente de altitude. Nessas amostras foram determinados os seguintes atributos químicos: pH, MOS determinada indiretamente, através do C determinado por combustão úmida, pelo método do dicromato de K, bem como determinados os teores de P, K⁺, Ca⁺² e Mg⁺², Na⁺ e (H+Al) de acordo com metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017).

Tabela 4. Atributos químicos dos solos dos diferentes ambientes de altitude.

Ambiente de Altitude	pH (CaCl ₂)	MOS ¹ g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	(H+Al)	CTC ²	V ³ %
				cmolc dm ⁻³						
Alta	3,80	28,72	3,90	1,40	0,60	0,07	0,10	4,00	6,17	35,17
Média	4,20	18,95	3,20	3,00	1,00	0,20	0,11	2,50	6,81	63,29
Baixa	5,50	37,33	4,70	7,20	2,30	0,27	0,13	2,00	11,90	83,19

¹Matéria orgânica do solo = C (g dm⁻³) x 1,724; ²Capacidade de troca de cátions; ³Saturação por bases.

2.7 ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO

Para calcular o estoque de C e N do solo, inicialmente é necessário determinar seus teores no solo. Nas mesmas amostras utilizadas para caracterizar os solos dos diferentes ambientes de altitude, determinaram-se os teores de C e N. Acrescente-se que nesse caso, as amostragens de solo foram realizadas também em dois períodos do ano (úmido e seco). Todas as amostras de solo foram destorroadas, secas à sombra, passadas em peneira de 2 mm de malha e maceradas em almofariz de ágata, antes de serem submetidas às análises químicas.

Os teores de C e N foram determinados via seca através do Analisador Elementar EA3100, para isso utilizou-se, aproximadamente, 2 mg da amostra, que foram acondicionadas em cápsulas de estanho para posterior combustão total no equipamento, que através da queima

da matéria orgânica a uma temperatura de, aproximadamente, 1.000 °C libera os gases CO₂ e N₂, sendo adsorvidos separadamente por uma coluna detectora específica e através de sensores de condutividade térmica mensuram os valores em percentagem de N e C (ELEMENTAR, 2007).

Adicionalmente, ainda, para calcular os estoques de C e N do solo, é necessário mensurar sua densidade. Assim, nas mesmas parcelas onde foram coletadas as amostras para determinação dos teores de C e N, foram coletadas amostras indeformadas no centro de um mini perfil de solo aberto até uma profundidade de 20 cm, utilizando-se um anel volumétrico. Posteriormente, os anéis foram colocados em estufa a 105 °C até o peso constante. Após esse período, as amostras foram pesadas para a determinação da massa seca do solo (ALMEIDA *et al.*, 2017). A partir dos valores obtidos, a densidade do solo foi determinada a partir da seguinte equação:

$$D_s = M_s/V_s$$

Em que:

D_s é a densidade do solo (kg dm⁻³);

M_s é a massa de solo seco (kg); e

V_s é o volume do anel (dm³).

Os estoques de C e N no solo (Mg ha⁻¹) foram calculados de acordo com as seguintes expressões (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2017):

$$\text{Estoque de C} = (C \times D_s \times Pr)/10$$

$$\text{Estoque de N} = (N \times D_s \times Pr)/10$$

Em que:

C = Carbono orgânico total (g kg⁻¹);

N = Nitrogênio total (g kg⁻¹);

D_s = Densidade do solo (kg dm⁻³);

Pr = Profundidade da coleta de solo (cm); e

10 = fator de conversão das unidades para expressar o estoque de C ou N em Mg ha⁻¹.

2.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos foram tabulados e organizados em planilhas para posterior análise estatística. Os dados foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-wilk (SHAPIRO;

WILK, 1965) e de homogeneidade das variâncias com teste de Levene (BROWN ; FORSYTRE, 1974), ambos ao nível de 5% de probabilidade.

Para realização das análises multivariadas entre as variáveis estudadas, houve a necessidade de realização dos testes de adequacidade de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e de esfericidade de Bartlett (DZIUBAN; SHIRKEY, 1974). O primeiro identifica se a análise é adequada, a partir de valores iguais ou superiores a 0,50, enquanto que o segundo indica se a matriz de correlação não é uma matriz identidade e, se é apropriada para análise fatorial, a partir de teste de qui-quadrado e valor de P igual ou inferior a 1% de probabilidade estatística.

De acordo com a adequação dos tratamentos, foi empregada análise fatorial para extração dos eixos que mais representaram a distribuição dos dados, ambos rotacionados pelo método da varimax normalizada, visando minimizar a influência de altas cargas em cada fator (HAIR *et al.*, 2005). Foi realizada análise de agrupamento, com adoção da distância euclidiana como medida de similaridade e o método de Ward para as ligações dos casos, atribuindo valores de no mínimo 24 e no máximo 36 para a distância de ligação dos dendrogramas (HAIR *et al.*, 2005). Os dados também foram analisados através da técnica dos componentes principais. Essa técnica avaliou o nível de relacionamento dos atributos estudados, constituindo uma etapa intermediária do procedimento estatístico.

Foi também aplicado aos dados, correlações canônicas que é uma técnica usada para analisar a relação entre dois grupos de variáveis. Testou-se o grupo composto pelas variáveis do material vegetal (biomassa foliar, teor e estoques de C e N) com o grupo solo (teor e estoque de C e N). A análise procura, com base em um grande número de características originais correlacionadas, obter combinações lineares dessas características denominadas variáveis canônicas, de tal forma que, a correlação entre essas variáveis seja nula (KHATTREE; NAIK, 2000).

Para as análises, foram utilizados os programas SISVAR® 5.3, STATISTICA 10.0 e IBM® SPSS® Statistics 20.0.

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da análise de correlação, foi possível observar que as variáveis de biomassa de folha (MF), biomassa de lenho (MCG), biomassa da parte aérea (MPA), estoque de C na folha (ECf), estoque de N na folha (ENf), estoque de C no lenho (ECm), estoque de N no lenho (ENm), estoque de C total (ECT) e estoque de N total (ENT) estão altamente correlacionadas

entre si, com coeficientes de correlação próximos a 1 (Tabela 5), sugerindo que variáveis fortemente relacionadas tendem a variar juntas.

Outro padrão observado foi para as variáveis relacionadas ao teor de C na folha (Cf), teor de N na folha (Nf), teor de C no lenho (Cm), teor de N no lenho (Nm), densidade do solo (Ds), teor de C no solo (Cs) e teor de N no solo (Ns) que mostraram correlações moderadas entre si, com coeficientes variando de positivos a negativos (Tabela 5). Isso indica que, embora menos forte do que as mencionadas anteriormente, essas variáveis também se correlacionam entre si.

As variáveis ECf, ENf, Ecm, ENm, ECt, ENt, ECs e ENs apresentaram correlações positivas moderadas entre si (Tabela 5), sugerindo que essas variáveis estão relacionadas à disponibilidade de nutrientes e qualidade do solo.

Foi identificada uma associação negativa significativa ao nível de 1% ($r = -0,32$) entre a deposição de serrapilheira e a precipitação pluviométrica em áreas de Caatinga arbórea e arbustiva (COSTA *et al.*, 2019). Logo, pode-se constatar a influência da precipitação na quantidade de material decíduo depositado nesta região.

Estudos conduzidos por Valentini *et al.*, (2015) em uma área revegetada no município de Cuiabá, apontou correlação significativa entre a respiração do solo e a precipitação, mostrando uma forte correlação positiva ($r = 0,76$). Essa relação positiva indica que a disponibilidade de água desempenha um papel crucial nas reações bioquímicas dos microrganismos do solo. Durante o período de maior precipitação, ocorreu uma correlação positiva, ainda, mais forte de 0,84 ($r = 0,84$) entre a respiração do solo e a disponibilidade de água. Esse aumento na disponibilidade de água estimulou as reações bioquímicas dos microrganismos do solo, resultando em um maior efluxo de CO₂ do solo. Esses resultados indicaram que as condições de maior precipitação favoreceram a atividade microbiana e a liberação de CO₂ do solo.

Tabela 5. Matriz de correlação das variáveis relacionadas com a vegetação e os solos, no Araripe em Pernambuco, Brasil

Atributo	MF ¹	MCG ²	MPA ³	Cf ⁴	Nf ⁵	Cm ⁶	Nm ⁷	ECf ⁸	ENf ⁹	ECm ¹⁰ ₀	ENm ¹¹ ₁	ECT ¹²	ENT ¹³	Ds ¹⁴	Cs ¹⁵	Ns ¹⁶ ₆	ECs ¹⁷ ₇	ENs ¹⁸	
MF	1,00																		
MCG	0,95	1,00																	
MPA	0,96	0,99	1,00																
Cf	0,16	0,18	0,18	1,00															
Nf	0,44	0,41	0,41	0,52	1,00														
Cm	0,25	0,44	0,43	0,01	-0,04	1,00													
Nm	0,23	0,26	0,26	-0,16	0,38	0,07	1,00												
ECf	0,99	0,95	0,96	0,24	0,47	0,25	0,22	1,00											
ENf	0,99	0,96	0,96	0,22	0,55	0,26	0,30	0,99	1,00										
ECm	0,78	0,92	0,91	0,15	0,33	0,69	0,28	0,79	0,81	1,00									
ENm	0,75	0,87	0,87	0,10	0,44	0,55	0,48	0,75	0,80	0,92	1,00								
ECT	0,80	0,93	0,92	0,16	0,35	0,67	0,28	0,81	0,83	0,99	0,92	1,00							
ENT	0,84	0,93	0,93	0,14	0,49	0,49	0,45	0,84	0,89	0,93	0,99	0,93	1,00						
Ds	-0,16	-0,14	-0,15	-0,23	-0,09	0,04	0,09	-0,17	-0,16	-0,09	-0,06	-0,10	-0,09	1,00					
Cs	0,07	0,09	0,10	-0,11	-0,04	-0,01	0,14	0,05	0,05	0,03	-0,01	0,03	0,01	-0,05	1,00				
Ns	0,07	0,10	0,09	-0,11	-0,09	-0,01	0,13	0,06	0,05	0,04	0,02	0,04	0,03	0,06	0,74	1,00			
ECs	-0,10	-0,07	-0,05	-0,26	-0,10	0,04	0,15	-0,12	-0,11	-0,06	-0,06	-0,06	-0,07	0,82	0,48	0,53	1,00		
ENs	-0,08	-0,05	-0,07	-0,24	-0,13	0,03	0,14	-0,10	-0,10	-0,05	-0,03	-0,05	-0,05	0,81	0,63	0,39	0,91	1,00	

¹Biomassa da folha (kg); ²Biomassa de caule e galhos (kg); ³Biomassa da parte aérea (kg); ⁴Teor de C da folha (%); ⁵Teor de N da folha (%); ⁶Teor de C do lenho (%); ⁷Teor de N no lenho (%); ⁸Estoque de C na folha (kg indivíduo⁻¹); ⁹Estoque de N na folha (kg indivíduo⁻¹); ¹⁰Estoque de C no lenho (kg indivíduo⁻¹); ¹¹Estoque de N no lenho (kg indivíduo⁻¹); ¹²Estoque de C total (kg indivíduo⁻¹); ¹³Estoque de N total (kg indivíduo⁻¹); ¹⁴Densidade do solo (g cm⁻³); ¹⁵Teor de C no solo (g kg⁻¹); ¹⁶Teor de N no solo (g kg⁻¹); ¹⁷Estoque de C do solo (Mg ha⁻¹); e ¹⁸Estoque de N do solo (Mg ha⁻¹).

Espig *et al.* (2008) mostraram que correlações lineares simples podem não refletir todas as variâncias na distribuição de C e N entre o material vegetal e o solo de um complexo ecossistema florestal. Assim, realizou-se correlações canônicas para entender melhor essas correlações (Tabela 6).

Tabela 6. Coeficientes canônicos entre o material vegetal e o solo, no Araripe em Pernambuco, Brasil

Variável	Par Canônico
	Planta
Nm ¹	0,89*
Cm ²	-0,20 ^{ns}
Nf ³	-0,18 ^{ns}
Cf ⁴	0,60 ^{ns}
	Solo
Ns ⁵	-0,85*
Cs ⁶	-0,58 ^{ns}
ENs ⁷	-0,82*
ECs ⁸	-0,53 ^{ns}

¹Teor de N no lenho (%); ²Teor de C do lenho (%); ³Teor de N da folha (%); ⁴Teor de C da folha (%); ⁵Teor de N no solo (g kg⁻¹); ⁶Teor de C no solo (g kg⁻¹); ⁷Estoque de N do solo (Mg ha⁻¹); ⁸Estoque de C do solo (Mg há⁻¹). * Par canônico significativo (p<0,05). ^{ns} Não significativo.

Assim, observou-se que o aumento do N no lenho relacionou-se com a diminuição do N e seu estoque no solo (Tabela 6). Da mesma forma, e com uma correlação menos forte, o aumento do C na folha relacionou-se com a diminuição do C e seu estoque no solo. De fato, evidencia-se uma ciclagem do N das espécies florestais em todos os ambientes de altitude e nos dois períodos do ano. O N concentrado nas plantas tem origem em seu estoque do solo e esse estoque é construído pelo aporte de serapilheira. Isso é importante para direcionar o manejo de corte dessas espécies, de modo, que se mantenha os estoques de N sustentáveis, tornando o ambiente o mais próximo do equilíbrio possível, preservando a Chapada do Araripe e todo seu ecossistema.

O C tem uma forma de absorção diferente do N. Ele chega até a planta na forma de CO₂ pela abertura dos estômatos concentrados nas folhas e se distribui nas demais estruturas da planta. Durante o aporte de serapilheira, grande parte do C é despreendido como CO₂, durante a decomposição da serapilheira, ficando armazenada no solo, uma fração menor desse C, que se

umidifica e é muito importante para o solo. Se está havendo uma correlação fraca entre o C da planta e o estoque de C do solo (Tabela 6), evidencia um ambiente desequilibrado com um desprendimento de C do solo maior do que seu ciclo natural. Isso pode estar associado uma exploração pouco monitorada da Caatinga, expondo a matéria orgânica do solo desses ambientes a uma decomposição mais acelerada, o que leva a perdas elevadas de C do solo. Pesquisa realizada no semiárido de Pernambuco mostrou que a recuperação de C do solo para teores originais pode levar mais de 60 anos (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2017), quando o plano de manejo é inadequado.

No entanto, quando se correlacionou as variáveis do solo com as variáveis das plantas sob o aspecto nutricional (Figura 5), observou-se uma correlação, de maneira geral, positiva e significativa, mostrando que está havendo ciclagem de nutrientes, com uma significativa participação dos nutrientes do solo. Nas florestas tropicais secas, onde os solos são mais férteis do que em ambientes de florestas tropicais úmidas, ocorre uma participação maior do solo na ciclagem de nutrientes (RAULINO *et al.*, 2020). De fato, Espig *et al.* (2008), quando estudaram distribuição de nutrientes entre a vegetação florestal e o solo em fragmento de Mata Atlântica, observaram que, as correlações canônicas para estoque dos nutrientes Ca, Mg, P e K entre o material vegetal e o solo, foram não significativas, ou seja, o estoque de nutrientes no material vegetal independe dos estoques desses nutrientes no solo, corroborando com a justificativa da ciclagem direta. No ambiente de floresta tropical mais úmida, a ciclagem de nutrientes é muito dependente da serapilheira, enquanto que nos ambientes de florestas tropicais secas, a ciclagem é mais dependente do solo, como no caso deste estudo.

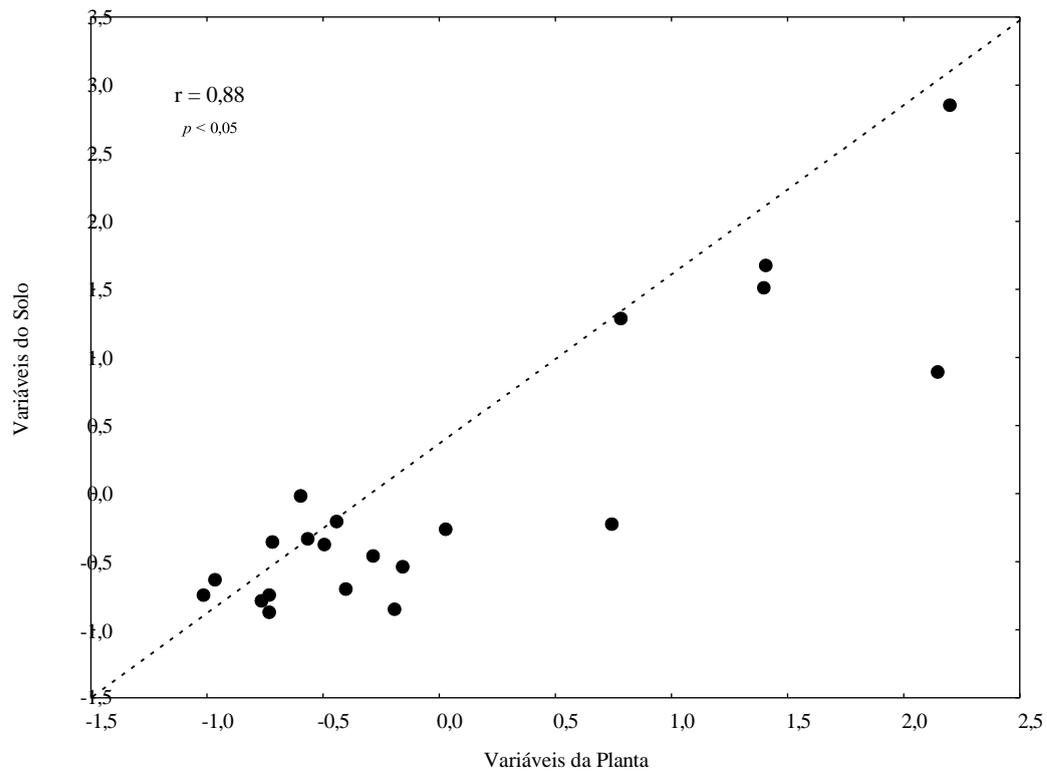


Figura 5. Correlações entre variáveis do solo e variáveis da planta, no Araripe em Pernambuco, Brasil.

O estudo na Chapada do Araripe envolveu quatro espécies florestais, três ambientes de altitude e dois períodos do ano, tornando necessário se buscar como as variáveis estudadas nessas diferentes condições se agruparam. Para tanto, a análise de agrupamento é uma técnica amplamente utilizada na investigação de padrões e similaridades em conjuntos de dados, com o objetivo de identificar possíveis agrupamentos e compreender as relações entre as variáveis e os diferentes ambientes (Figura 6). Nesse caso, se considerou apenas as variáveis relacionadas às plantas.

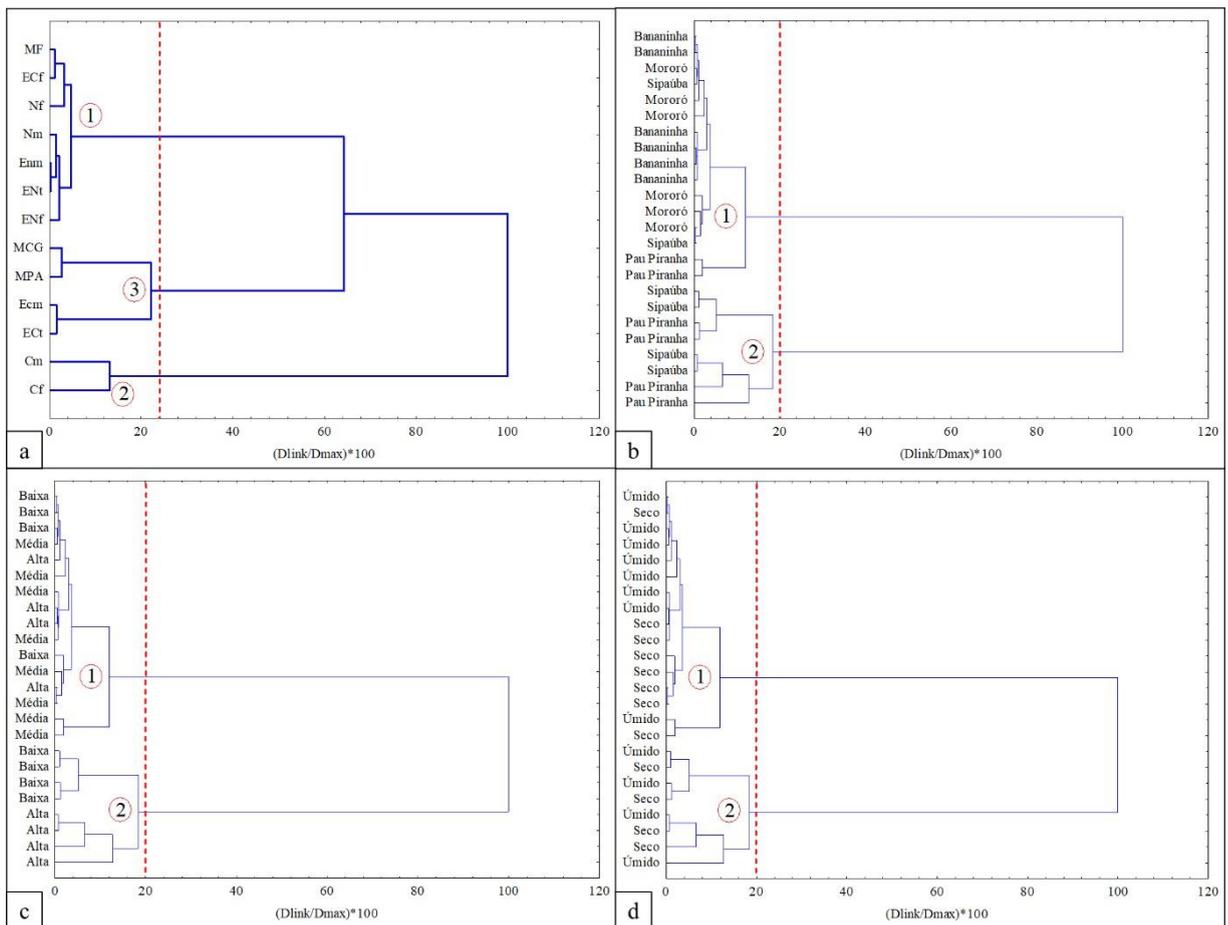


Figura 6. Agrupamento das variáveis relacionadas às espécies florestais, ambientes de altitude e períodos do ano, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Variáveis da planta: MF - Biomassa da folha (kg); MCG - Biomassa de caule e galhos (kg); MPA - Biomassa da parte aérea (kg); Cf - Teor de C da folha (%); Nf - Teor de N da folha (%); Cm - Teor de C do lenho (%); Nm - Teor de N no lenho (%); ECF - Estoque de C na folha (kg indivíduo^{-1}); ENf - Estoque de N na folha (kg indivíduo^{-1}); Ecm - Estoque de C no lenho (kg indivíduo^{-1}); ENm - Estoque de N no lenho (kg indivíduo^{-1}); ECt - Estoque de C total (kg indivíduo^{-1}); ENt - Estoque de N total (kg indivíduo^{-1}). Espécies florestais: Bananinha, Morororo, Sipaubá e Pau piranha; Ambientes de altitude: Baixa, Média e Alta altitude; Períodos do ano: Úmido e seco.

Os resultados revelaram a formação de três grupos de variáveis (Figura 6a), o grupo 1 formado pelas variáveis relacionadas aos estoques de N, o grupo 2 aos teores de C e o grupo 3 aos estoques de C, relacionando-os à produção de matéria seca. As espécies florestais formaram dois grupos: O grupo 1 agrupou a Bananinha e o Morororo e o grupo 2 a Sipaubá e o Pau Piranha (Figura 6b). Quando se interagiu as variáveis e as espécies florestais, observou-se que a Bananinha e o Morororo se relacionaram mais com os estoques de N e a Sipaubá e o Pau piranha com os estoques de C (Figuras 6a, b). Os ambientes de altitude se dividiram em dois grupos: O grupo 1 com predomínio de áreas de média altitude e o grupo 2 que agrupou os ambientes de baixa e alta altitude (Figura 6c). Os períodos, apesar de apresentarem uma possível formação

de dois grupos, apresentaram-se muito dispersos, mostrando pouca influência no agrupamento das variáveis (Figura 6d).

Estudou-se também como as variáveis das plantas, as espécies florestais, os ambientes de altitude e os períodos do ano se distribuem nos biplots da análise de componentes principais (Figura 7).

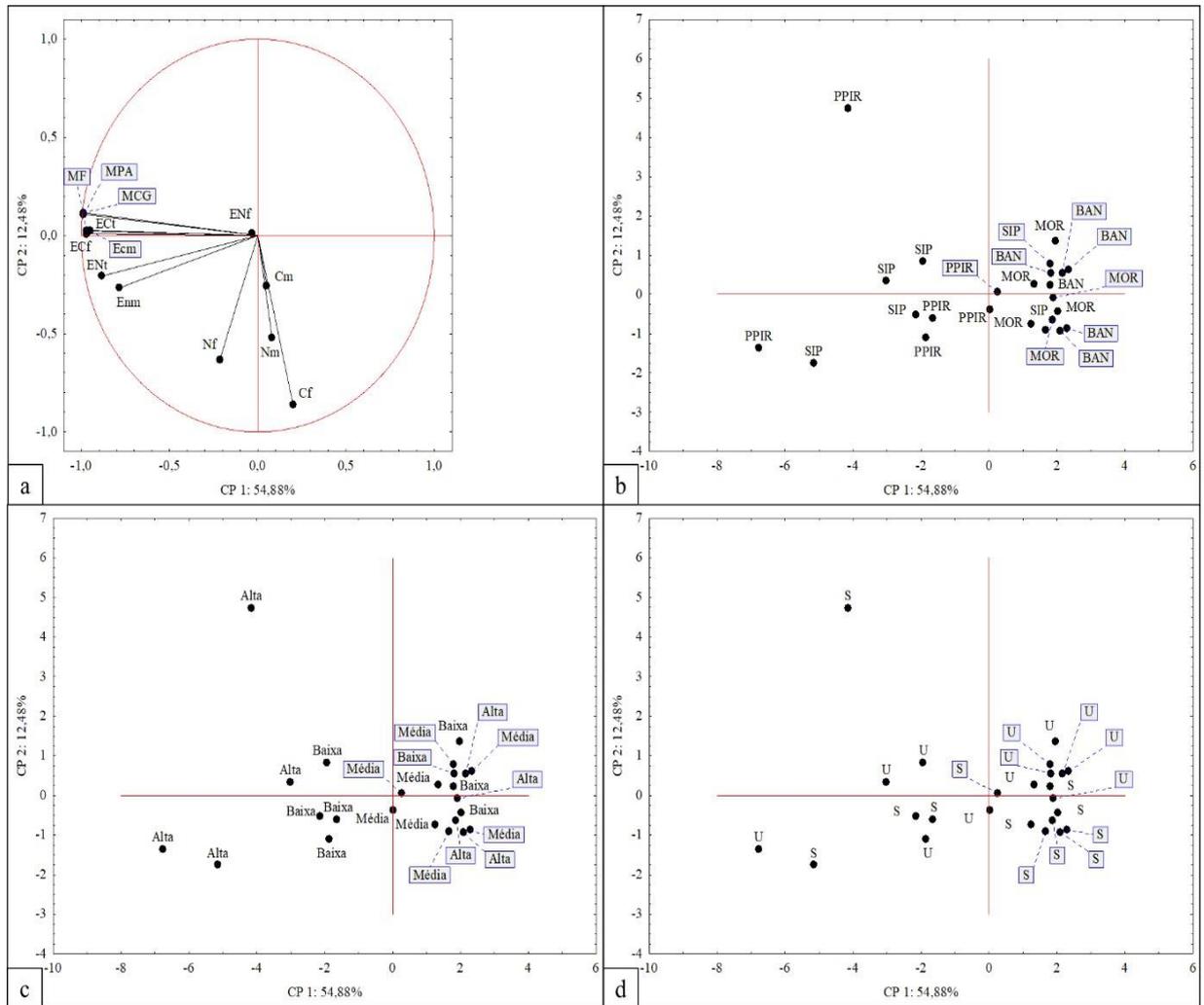


Figura 7. Biplots das variáveis das plantas sob as espécies florestais, ambientes de altitude e períodos do ano, no Araripe em Pernambuco, Brasil. Variáveis da planta: MF - Biomassa da folha (kg); MCG - Biomassa de caule e galhos (kg); MPA - Biomassa da parte aérea (kg); Cf - Teor de C da folha (%); Nf - Teor de N da folha (%); Cm - Teor de C do lenho (%); Nm - Teor de N no lenho (%); Ecf - Estoque de C na folha (kg indivíduo^{-1}); ENf - Estoque de N na folha (kg indivíduo^{-1}); Ecm - Estoque de C no lenho (kg indivíduo^{-1}); ENm - Estoque de N no lenho (kg indivíduo^{-1}); Ect - Estoque de C total (kg indivíduo^{-1}); ENt - Estoque de N total (kg indivíduo^{-1}). Espécies florestais: BAN -Bananinha; MOR - Mororo; SIP - Sipaubá; PPIR - Pau piranha; Ambientes de altitude: Baixa, Média e Alta altitude; Períodos do ano: U - Úmido; S - seco.

As variáveis das plantas se distribuíram em três quadrantes do biplot, separando-se as

variáveis relacionadas à produção de biomassa, dos estoques de C e N e, por fim, dos teores de C e N (Figura 7a). A partir dessa distribuição, observou-se que as espécies florestais Sipauba e Pau piranha apresentaram as maiores produções de biomassa e, conseqüentemente, os maiores estoques de C e N (Figura 7b). Por outro lado, a Bananinha e o Mororo apresentaram os maiores teores de C e N (Figura 7b), principalmente no período seco (Figura 7d). Concomitantemente, as áreas de alta altitude produziram mais biomassa e estocaram mais C e N (Figura 7c).

4. CONCLUSÕES

As variáveis de biomassa de folha, biomassa de lenho, biomassa da parte aérea, estoque de C na folha, estoque de N na folha, estoque de C no lenho, estoque de N no lenho, estoque de C total e estoque de N total foram altamente correlacionadas entre si, sugerindo que variáveis fortemente relacionadas tendem a variar juntas.

O aumento do N no lenho relacionou-se com a diminuição do N e seu estoque no solo. Isso é importante para direcionar o manejo de corte das espécies florestais, de modo, que se mantenha os estoques de N sustentáveis, preservando a Chapada do Araripe e todo seu ecossistema. No entanto, observou-se uma correlação fraca entre o C da planta e o estoque de C do solo, evidenciando um ambiente desequilibrado, com um desprendimento de C do solo maior do que seu ciclo natural. Isso pode estar associado uma exploração pouco monitorada da Caatinga, expondo a matéria orgânica do solo a uma decomposição mais acelerada, o que leva a perdas elevadas de C do solo.

Constatou-se uma correlação, de maneira geral, positiva entre variáveis do solo com variáveis da planta, mostrando haver ciclagem de nutrientes, com uma significativa participação dos nutrientes do solo.

As espécies florestais Sipaua e Pau piranha apresentaram as maiores produções de biomassa e, conseqüentemente, os maiores estoques de C e N. Por outro lado, a Bananinha e o Mororo apresentaram os maiores teores de C e N, principalmente no período seco. Concomitantemente, as áreas de alta altitude produziram mais biomassa e estocaram mais C e N, evidenciando que essas áreas e essas espécies precisam ser monitoradas para que os planos de manejo na Chapada do Araripe se tornem mais sustentáveis.

5. REFERÊNCIAS

- ALLEN, K. *et al.* (2017). Will seasonally dry tropical forests be sensitive or resistant to future changes in rainfall regimes? **Environmental Research Letters**, v.12, n.2, p.23001.
- ARAÚJO FILHO, R.N.; FREIRE, M.B.G.S.; WILCOX, B.P.; WEST, J.B.; FREIRE, F.J.; MARQUES, F.A. Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. **Forest Ecology and Management**, v. 407, p. 210-220, 2018.
- BERNER, R. A.; LAGASA, A. C. Modelling the Geochemical Carbon Cycle. **Scientific American**, vol 260; n° 3, março 1989.
- BROWN M.B.; FORSYTRE A.B. Robust test for equality of variances. **Journal of the American Statistical Association**, 69: 364-367, 1974.
- COSTA, C. R. G. da *et al.* Dinâmica temporal do efluxo de CO₂ e produção de glomalina em área de Caatinga sob Neossolo Litólico. 2019.
- COSTA, E. M. *et al.* Matéria orgânica do solo e seu papel na manutenção e produtividade de sistemas agrícolas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 1842-1860, 2013.
- COSTA, F. S. *et al.* Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, 32(1), p. 323-332, 2008.
- CORADO NETO, F. DA C. *et al.* Variabilidade espacial dos agregados e carbono orgânico total em Neossolo Litólico Eutrófico no município de Gilbués, PI. **Revista de Ciências Agrárias**, 8(1), 75-83, 2015.
- D'ANDRÉA *et al.* Variabilidade espacial do fluxo de CO₂ do solo em povoamento de Eucalipto. **FLORESTA**, v. 41, n. 2, p. 407-422, 2011.
- DZIUBAN, C. D.; SHIRKEY, E. S. When is a correlation matrix appropriate for factor analysis? Some decision rules. **Psychol.** V. 81, p. 358-361. 1974.
- EPIG, S.A. *et al.* Distribuição de nutrientes entre a vegetação florestal e o solo em fragmento de Mata Atlântica. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, n.2, p.132-137, 2008.
- HAIR, J. F. *et al.* Análise multivariada de dados. **Bookman**. Porto Alegre – RS, 5ª edição. 594 p. 2005.
- HOUGHTON, R. A. Biomass. **Encyclopedia of Ecology**. 2nd ed. Falmouth: Elsevier B.V., 2008. vol. 3, p. 253–257.
- KHATTREE, R.; NAIK, D.N. Multivariate data reduction and discrimination with SAS software. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc., 2000. 558 p.
- LIMA, A. L. A. *et al.* Do the phenology and functional stem attributes of woody species allow for the identification of functional groups in the semiarid region of Brazil? **Trees - Structure and Function**, v. 26, n. 5, p. 1605–1616, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0735-2>.

- MA, L. *et al.* Patterns of ecosystem carbon density in edge-affected fengshui forests. **Ecological Engineering**, vol. 107, p. 216–223, 2017.
- MAGNAGO, L. F. S. *et al.* Would protecting tropical forest fragments provide carbon and biodiversity cobenefits under REDD+? **Global Change Biology**, vol. 21, no. 9, p. 3455–3468, 2015.
- MUKAKA, M. M. Statistics corner: a guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**. V. 24, n. 3, p. 69-71. 2012.
- RAULINO, W.N.C. *et al.* Nutrition of tree species in tropical dry forest and rainforest environments. *Revista Ceres, Viçosa*, v. 67, n.1, p. 070-080, 2020.
- RUFINO, D.C. *et al.* Estoque de carbono do solo em agroecossistemas e vegetação secundária. **Research, Society and Development**, v.11, n.11, 2022.
- SANTOS, M. G. *et al.* Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: Can it tolerate climate changes? **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, n. 1, p. 83–99, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40626-014-0008-0>
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality. **Biometrika**, Oxford, v. 52, n.3/4, p. 591-611,1965.
- SOUZA, A. R. S. de; BEZERRA, F.C. O Soldadinho-do-Araripe (*Antilophia bokermanni* Coelho e Silva, 1988) como espécie bandeira no Cariri Cearense. **Meio Ambiente e Sustentabilidade: conceitos e aplicações**. 2022 DOI:10.51161/editoraime/108/92. 2022
- PINHO, B. X. *et al.* Plant functional assembly is mediated by rainfall and soil conditions in a seasonally dry tropical forest. **Basic and Applied Ecology**, v. 40, p. 1–11, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.baae.2019.08.002>.
- SOUSA, M. M. M. de *et al.* Spatial-temporal soil-water content dynamics in toposequences with different plant cover in a tropical semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, 2021.
- VALLADARES, G.S. *et al.* Análise dos componentes principais e métodos Multicritério ordinais no estudo de organossolos e solos afins. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, n. 32, p. 285-296, 2008.
- VALENTINI, C. M. A.; DE ABREU, J. G.; DE FARIA, R. A. P. G. Respiração do solo como bioindicador em áreas degradadas. **Revista Internacional de Ciências**, v. 5, n. 2, p. 127-142, 2015.
- WANG, J.; NAYAK, S.; KOCH, K.; MING, R. Carbon partitioning in sugarcane (*Saccharum* species). **Frontiers in Plant Science**, vol. 4, no. 6, p. 201, 2013.
- WEST, P. W. **Tree and Forest Measurement**. 3rd ed. Lismore: Springer, 2015.

6. CONCLUSÃO GERAL

A produção de biomassa de lenho foi de oito a dez vezes maior do que a biomassa de folhas, principalmente nos ambientes mais altos, destacando-se as espécies *Guapira opposita* e *Combretum glaucocarpum*, como as maiores produtoras de biomassa, sugerindo que essas espécies possam efetivamente integrarem o plano de manejo da região, principalmente nas áreas mais elevadas da Chapada do Araripe.

As espécies estocaram mais N nas folhas e C no lenho. Os estoques de C e N nas espécies *Guapira opposita* e *Combretum glaucocarpum* foram bem mais elevados do que nas espécies *Annona leptopetala* e *Bauhinia subclavata*. Portanto, os planos de manejo na Chapada do Araripe devem monitorar o uso dessas espécies pela capacidade delas de armazenar, principalmente C.

Os estoques de C e N se concentraram nas altitudes mais elevadas da Chapada do Araripe, que estocaram 92%, tanto do C, como do N. Essa é uma constatação importante, porque as áreas baixas da Chapada precisam ser mais preservadas, para qualquer que seja a ação antrópica da exploração da Caatinga.

Os teores de C e N do solo não foram influenciados pelos diferentes ambientes de altitude e o estoque de C do solo só foi influenciado pelos ambientes de altitude, independente do período do ano, tendo o ambiente de média altitude se diferenciado do ambiente de alta altitude e apresentado o mais alto estoque de C do solo.

O estoque de N do solo foi semelhante nas áreas de baixa e média altitude e foram maiores do que nas áreas de alta altitude. O estoque de N do solo no período úmido foi menor que no período seco, indicando que a umidade do solo afeta a disponibilidade de N e, pode influenciar a quantidade de N armazenada no solo.

Todas essas variações de teores e estoques de C e N e relação C/N podem ser consequência de fatores sazonais ou mudanças nas condições ambientais ao longo do tempo, sugerindo o monitoramento dos atributos do solo nos ambientes de altitude e da sazonalidade na Chapada do Araripe, de forma a se obter informações relevantes para a compreensão dos processos ecológicos e da dinâmica do solo nesse ecossistema.

O aumento do N no lenho relacionou-se com a diminuição do N e seu estoque no solo. Isso é importante para direcionar o manejo de corte das espécies florestais, de modo, que se mantenha os estoques de N sustentáveis, preservando a Chapada do Araripe e todo seu ecossistema. No entanto, observou-se uma correlação fraca entre o C da planta e o estoque de

C do solo, evidenciando um ambiente desequilibrado, com um desprendimento de C do solo maior do que seu ciclo natural. Isso pode estar associado uma exploração pouco monitorada da Caatinga, expondo o a matéria orgânica do solo a uma decomposição mais acelerada, o que leva a perdas elevadas de C do solo.