

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA**

DIEGO DE LIMA COELHO

**ATRIBUTOS DO SOLO E DO SISTEMA RADICULAR EM DISTINTOS SISTEMAS
DE PRODUÇÃO DE FORRAGEM**

**RECIFE
2022**

DIEGO DE LIMA COELHO

**ATRIBUTOS DO SOLO E DO SISTEMA RADICULAR EM
DISTINTOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE FORRAGEM**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Doutor em Zootecnia

Área de concentração: Zootecnia

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Batista Dubeux Júnior

Coorientadores: Prof. Dr. Alexandre Carneiro Leão de Mello
Prof^a. Dr^a. Mercia Virginia Ferreira dos Santos

**RECIFE
2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

C672a Coêlho, Diego de Lima
Atributos do solo e do sistema radicular em distintos sistemas
de produção de forragem / Diego de Lima Coêlho. – 2022.
141 f. : il.

Orientador: José Carlos Batista Dubeux Júnior.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Recife,
BR-PE, 2022.
Inclui bibliografia.

1. Pastagem 2. Zona da Mata (PE : Mesorregião) 3. Palma
forrageira I. Dubeux Júnior, José Carlos Batista, orient. II. Título

CDD 636



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

**ATRIBUTOS DO SOLO E DO SISTEMA RADICULAR EM DISTINTOS
SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE FORRAGEM**

Tese elaborada por
DIEGO DE LIMA COELHO

Aprovado em 25/02/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos Batista Dubeux Júnior
Universidade da Flórida - UF
(Orientador)

Prof. Dr. Márcio Vieira da Cunha
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Prof. Dr. Mario de Andrade Lira Junior
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Prof. Dr. Valdson José da Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Prof^a. Dr^a. Valéria Xavier de Oliveira Apolinário
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

DEDICO

Aos meus pais, Ladjane Ferreira de Lima Coêlho e Jackson Coêlho e aos meus avós,
Geraldo Ferreira de Lima e Antonia Abreu Coêlho (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e força para a conclusão desta etapa da vida profissional.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia (PPGZ), pela oportunidade de realização do curso.

Ao meu orientador, professor Dr. José Carlos Batista Dubeux Júnior, pela orientação, dedicação e apoio.

Aos meus coorientadores, professor Dr. Alexandre Carneiro Leão de Mello e professora Dr^a. Mercia Virginia Ferreira dos Santos pelas contribuições, dedicação e apoio.

Aos professores e funcionários do Departamento de Zootecnia (DZ), em especial aos professores Márcio Vieira da Cunha e Valdson José da Silva e do Departamento de Agronomia (DEPA), principalmente aos professores Dr. Brivaldo Gomes de Almeida e Dra. Giselle Gomes Monteiro Fracetto e ao Dr. Felipe José Cury Fracetto, pelas contribuições e apoio.

Ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), principalmente às Estações Experimentais de Arcoverde-PE e Itambé-PE e aos funcionários e colaboradores Dr. Erinaldo Viana de Freitas, Me. Djalma Cordeiro dos Santos, Dra. Maria da Conceição Silva, Dra. Maria Cristina Lemos da Silva, Wêdson da Silva, Ana Paula, José Robson, Maria de Fátima, João Bosco, Flávio Lino, Daniela Mello, José Pessoa, Leônio Siqueira, Valdeir Viana e Edvaldo Araujo, pelo apoio para a realização da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro para a realização da pesquisa e à *dryGrow Foundation*, pelo apoio financeiro concedido em algumas etapas do estudo.

Aos colegas do PPGZ, pelas experiências profissionais compartilhadas.

E aos meus familiares que contribuíram de forma direta ou indireta para a concretização desta etapa profissional.

ATRIBUTOS DO SOLO E DO SISTEMA RADICULAR EM DISTINTOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE FORRAGEM

RESUMO

Elevada proporção dos alimentos consumidos é proveniente do solo, porém, 1/3 dos solos do mundo já estão degradados. Objetivou-se avaliar atributos do solo e do sistema radicular em distintos sistemas de produção de forragem. Os experimentos foram realizados nas Estações Experimentais do Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA) situadas em Itambé, na Zona da Mata Norte de Pernambuco (PE) e em Arcoverde, no sertão do estado. Em Itambé, o experimento foi instalado em abril de 2011 e os tratamentos experimentais consistiram em: i) pastagens consorciadas de *Urochloa decumbens* (Stapf) R. D. Webster (braquiária) + *Mimosa caesalpinifolia* Benth. (sabiá) (B+S) e ii) braquiária + [*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.] (gliricídia) (B+G), em delineamento experimental casualizado em blocos, com três repetições. Foram coletadas amostras de solos em duas distâncias das leguminosas, sendo a 0 m de distância das fileiras duplas das leguminosas (NL) e a 8 m de distância das fileiras duplas das leguminosas (EL), no mês de outubro de 2019, para análises de estoque de raízes, físicas do solo e químicas do solo nas profundidades 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 e 100-120 cm; fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS) nas profundidades 0-20 e 20-40 cm e do teor de carbono (C-BMS) e nitrogênio (N-BMS) da biomassa microbiana do solo a 0-20 cm. Em Arcoverde, o cultivar avaliado, em dois experimentos (I e II), foi a palma ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) e os experimentos foram estabelecidos em junho (estação chuvosa) de 2011. No experimento I, o delineamento experimental foi de parcelas subdivididas em blocos ao acaso, onde a parcela principal foi formada pelas diferentes densidades de plantio e as subparcelas, pelo arranjo fatorial entre frequências e intensidades de corte. Enquanto que no experimento II, o delineamento experimental foi em parcelas subdivididas em blocos ao acaso; as parcelas principais foram constituídas por distintos níveis de adubação orgânica, as subparcelas por diferentes níveis de adubação nitrogenada e as subsubparcelas, frequências de corte da palma forrageira, em quatro blocos experimentais. Em ambos os experimentos (I e II), foram coletadas amostras para análises de estoque de raízes, físicas do solo e químicas do solo nas profundidades 0-10 e 10-20 cm e fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS) a 0-10 cm. As coletas de amostras para análises experimentais, nos experimentos I e II, foram realizadas em agosto de 2019, mas para análises de estoque de raízes e densidade do solo (Ds) ocorreram também em setembro de 2021. No Experimento em Itambé, o estoque de raízes ao longo do perfil edáfico (0-120 cm), sendo 22,96 t ha⁻¹ no sítio de amostragem NL e 11,97 t ha⁻¹ EL no tratamento B+G e 22,61 t ha⁻¹ NL e 11,06 t ha⁻¹ EL no tratamento B+S ressalta a importância da gramínea e das leguminosas forrageiras para benefícios de atributos edáficos em sistemas silvipastoris. No Experimento I (Arcoverde), não foram verificados efeitos significativos em relação ao estoque de raízes nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, sendo os valores médios experimentais de 12,45 t ha⁻¹ e 6,06 t ha⁻¹, respectivamente, nem quanto à Ds nesta maior profundidade (p>0,05), cujo valor médio foi de 1,28 g cm⁻³. No experimento II (Arcoverde), a Ds experimental ficou abaixo do limite crítico. Adubação orgânica e nitrogenada de, pelo menos, 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente e frequência de corte bienal contribuem para maiores estoques de raízes de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm.

Palavras-chave: densidade de solo, *Urochloa decumbens*, *Gliricidia sepium*, *Mimosa caesalpinifolia*, semiárido.

SOIL AND ROOT SYSTEM ATTRIBUTES IN DIFFERENT FORAGE PRODUCTION SYSTEMS

ABSTRACT

High proportion of the food consumed comes from the soil, however, 1/3 of the world's soils are already degraded. The objective was to evaluate soil and root system attributes in different forage production systems. The experiments were carried out at the Experimental Stations of the Agronomic Institute of Pernambuco (IPA) located at Itambé, in the North Forest Zone of Pernambuco State and at Arcoverde, in the Sertão region of the State. At Itambé, the experiment was installed in April 2011 and the experimental treatments consisted of i) intercropped pastures *Urochloa decumbens* (Stapf) R. D. Webster (braquiária) + *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. (sabiá) (B+S) and ii) braquiária + [*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.] (gliricídia) (B+G) in a randomized complete block design, with three replications. Soil samples were collected at two distances from the legumes, being 0 m away from the double rows of legumes (WR) and 8 m away from the double rows of legumes (BR), in the month of October 2019 to analysis of roots stock, soil physics and chemical analyzes at 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 and 100-120 cm depths; physical fractionation of soil organic matter (SOM) at 0-20 and 20-40 cm depth and soil microbial biomass carbon (SMBC) and nitrogen (SMBN) content at 0-20 cm depth. In Arcoverde, the cultivar evaluated in two experiments (I and II) was forage cactus (*Opuntia stricta* Haw. Cv. 'Orelha de Elefante Mexicana') and the experiments were established in June (rainy season) 2011. In experiment I, the experimental design was split-plot in a randomized complete block design, where the main plot was formed by different planting density and the subplots, by the factorial arrangement between frequency, and harvest intensity. While in experiment II, the experimental design was in split-split-plot in a randomized complete blocks, in which the main plots were formed by different doses of organic fertilization, the subplots by different doses of N fertilization and the sub-subplots, harvest frequency of forage cactus, in four experimental blocks. In both experiments (I and II), samples were collected to analysis of roots stock, soil physics and chemical analyzes at 0-10 and 10-20 cm depths and physical fractionation of soil organic matter (SOM) at 0-10 cm depth. Sample collections for experimental analyzes in experiments I and II were carried out in August 2019, but for roots stock and soil bulk density (BD) analyzes also took place in September 2021. In the Experiment at Itambé, the roots stock along the edaphic profile (0-120 cm), being 22.96 t ha⁻¹ at the sampling site WR and 11.97 t ha⁻¹ in 8 m away in BR in treatment B+G and 22.61 t ha⁻¹ WR and 11.06 t ha⁻¹ BR in treatment B+S highlights the importance of grass and forage legumes for the benefits of edaphic attributes in silvopastoral systems. In the Experiment I at Arcoverde, there were no significant effects in relation to the roots stock at 0-10 and 10-20 cm depth, being the experimental mean values 12.45 t ha⁻¹ and 6.06 t ha⁻¹, respectively, nor for the soil BD at this greater depth (p>0.05) whose mean value was 1.28 g cm⁻³. In the Experiment II at Arcoverde, the experimental soil BD was below the critical limit. Organic and nitrogen fertilization of at least 10 t ha⁻¹ year⁻¹ and 120 kg ha⁻¹ year⁻¹, respectively, and biennial harvest frequency contribute to higher roots stocks of forage cactus Orelha de Elefante Mexicana at depth 0-10 cm.

Keywords: soil bulk density, *Urochloa decumbens*, *Gliricidia sepium*, *Mimosa caesalpiniiifolia*, semiarid.

LISTA DE TABELAS

Página

Capítulo I. Atributos do solo e do sistema radicular em sistemas silvipastoris na Zona da Mata Norte de Pernambuco, Brasil.

Tabela 1. Estoque de raízes vegetais em sistemas silvipastoris, Itambé-.....	55
Tabela 2. Média \pm desvio padrão amostral de características físicas de amostras de solos, conforme profundidades edáficas da área experimental e de mata nativa, Itambé-PE.....	57
Tabela 3. Densidade do solo em sistemas silvipastoris, Itambé-PE.....	58
Tabela 4. Diâmetro médio ponderado do solo e diâmetro médio geométrico do solo em sistemas silvipastoris, Itambé-PE.....	60
Tabela 5A. Propriedades químicas do solo em sistemas silvipastoris, Itambé-PE.....	63
Tabela 5B. Propriedades químicas do solo em sistemas silvipastoris, Itambé-PE.....	66
Tabela 6. Fração mineral do solo, fração leve da matéria orgânica do solo e fração pesada da matéria orgânica do solo em sistemas silvipastoris, Itambé-PE.....	68
Tabela 7. Carbono da biomassa microbiana do solo e nitrogênio da biomassa microbiana do solo em sistemas silvipastoris, Itambé-PE.....	70

Capítulo II. Atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) submetida a diferentes densidades de plantio, frequências e intensidades de corte no Sertão de Pernambuco, Brasil.

Tabela 1. Média \pm desvio padrão amostral de características físicas de amostras de solos, conforme profundidades edáficas da área experimental e de mata nativa, Arcoverde-PE.....	92
Tabela 2. Interação intensidade de corte x ano de amostragem para densidade do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade de solo 0-10 cm, Arcoverde-PE.....	93
Tabela 3. Média \pm desvio padrão amostral de diâmetro médio ponderado do solo e diâmetro médio geométrico do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana, Arcoverde-PE.....	93
Tabela 4. Interação frequência de corte x intensidade de corte sobre CTC do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE.....	95

Tabela 5. Interação densidade de plantio x frequência de corte x intensidade de corte sobre V do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE..... 97

Tabela 6. Interação densidade de plantio x intensidade de corte para teores de carbono e nitrogênio do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE..... 99

Tabela 7. Interação densidade de plantio x intensidade de corte para teores e estoques de carbono e nitrogênio e relação C/N do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE..... 101

Capítulo III. Atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) submetida a distintos níveis de adubação orgânica e nitrogenada e frequências de corte no Sertão de Pernambuco, Brasil.

Tabela 1. Média \pm desvio padrão amostral de características físicas de amostras de solos, conforme profundidades edáficas da área experimental e de mata nativa (MN), Arcoverde-PE..... 121

Tabela 2. Interação frequência de corte x ano de amostragem para densidade do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE..... 122

Tabela 3. Média \pm desvio padrão amostral de diâmetro médio ponderado do solo e diâmetro médio geométrico do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana, Arcoverde-PE..... 123

Tabela 4. Interação adubação orgânica x frequência de corte para teor de K^+ do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE..... 128

Tabela 5. Interação adubação orgânica x nitrogenada para relação C/N do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE... 133

LISTA DE FIGURAS

Página

Revisão de literatura

Figura 1. Palma Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia Stricta* Haw.)..... 31

Capítulo I. Atributos do solo e do sistema radicular em sistemas silvipastoris na Zona da Mata Norte de Pernambuco, Brasil.

Figura 1. Precipitação pluviométrica em Itambé-PE, no ano de coleta de amostras experimentais..... 49

Figura 2. Detalhe da unidade experimental de leguminosas arbóreas consorciadas com *Urochloa decumbens*, Itambé-PE..... 50

Capítulo II. Atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) submetida a diferentes densidades de plantio, frequências e intensidades de corte no Sertão de Pernambuco, Brasil.

Figura 1. Precipitação pluviométrica no Município de Arcoverde-PE, nos anos de coletas de amostras experimentais..... 87

Figura 2. Efeito da frequência de corte sobre teor de P do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE..... 95

Figura 3. A. Efeito da intensidade de corte sobre teor de Na⁺ do solo; **B.** Efeito da intensidade de corte sobre m do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE..... 95

Figura 4. A. Efeito da frequência de corte sobre teor de P do solo; **B.** Efeito da frequência de corte sobre teor de Ca⁺² do solo; **C.** Efeito da frequência de corte sobre SB do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE..... 96

Figura 5. Efeito da intensidade de corte sobre teor de Na⁺ do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE..... 97

Figura 6. Efeito linear da densidade de plantio sobre a fração leve da matéria orgânica do solo cultivado com palma Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE..... 103

Capítulo III. Atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) submetida a distintos níveis de adubação orgânica e nitrogenada e frequências de corte no Sertão de Pernambuco, Brasil.

Figura 1. Efeito linear plano da adubação orgânica sobre o estoque de raízes de palma Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE..... 119

Figura 2. Efeito linear da adubação nitrogenada sobre o estoque de raízes de palma Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE..... 120

Figura 3. A. Efeito linear da adubação orgânica sobre a densidade do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE; **B.** Efeito linear da adubação orgânica sobre a Ds cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE..... 121

Figura 4. A. Efeito linear da adubação orgânica sobre pH do solo; **B.** Efeito quadrático da adubação orgânica sobre teor de P do solo; **C.** Efeito linear da adubação orgânica sobre teor de Ca^{+2} do solo; **D.** Efeito linear da adubação orgânica sobre teor de Mg^{+2} do solo; **E.** Efeito linear da adubação orgânica sobre teor de Na^{+} do solo; **F.** Efeito linear da adubação orgânica sobre teor de K^{+} do solo; **G.** Efeito saturação cinética da adubação orgânica sobre teor de Al^{+3} do solo; **H.** Efeito linear da adubação orgânica sobre SB do solo; **I.** Efeito linear da adubação orgânica sobre CTC do solo; **J.** Efeito linear da adubação orgânica sobre V do solo; **K.** Efeito logístico da adubação orgânica sobre m do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE..... 124

Figura 5. A. Efeito linear da adubação orgânica sobre pH do solo; **B.** Efeito linear da adubação orgânica sobre teor de P do solo; **C.** Efeito linear da adubação orgânica sobre teor de Ca^{+2} do solo; **D.** Efeito linear da adubação orgânica sobre teor de Mg^{+2} do solo; **E.** Efeito linear da adubação orgânica sobre teor de Na^{+} do solo; **F.** Efeito quadrático da adubação orgânica sobre teor de Al^{+3} do solo; **G.** Efeito linear da adubação orgânica sobre SB do solo; **H.** Efeito linear da adubação orgânica sobre CTC do solo; **I.** Efeito linear da adubação orgânica sobre V do solo; **J.** Efeito logístico da adubação orgânica sobre m do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE..... 127

Figura 6. A. Efeito linear da adubação orgânica sobre o teor de carbono do solo; **B.** Efeito linear da adubação orgânica sobre o estoque de carbono do solo; **C.** Efeito linear da adubação orgânica sobre o teor de nitrogênio do solo; **D.** Efeito linear da adubação orgânica sobre o estoque de nitrogênio do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE..... 131

Figura 7. A. Efeito linear da adubação orgânica sobre o teor de carbono do solo; **B.** Efeito linear da adubação orgânica sobre o estoque de carbono do solo; **C.** Efeito linear da adubação orgânica sobre o teor de nitrogênio do solo; **D.** Efeito linear da adubação orgânica sobre o estoque de nitrogênio do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE..... 132

Figura 8. A. Efeito quadrático da adubação orgânica sobre a fração mineral do solo; **B.** Efeito quadrático da adubação orgânica sobre a fração pesada da matéria orgânica do solo; **C.** Efeito quadrático da adubação orgânica sobre a fração leve da matéria orgânica do solo cultivado com palma Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE..... 134

Figura 9. Efeito linear da adubação nitrogenada sobre a fração leve da matéria orgânica do solo cultivado com palma Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE..... 135

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2. 1. Estoque de carbono no solo.....	17
2. 2. Sistemas silvipastoris.....	20
2. 3. Palma forrageira na Região semiárida do Nordeste brasileiro.....	26
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
CAPÍTULO I.....	44
Atributos do solo e de sistema radicular em sistemas silvipastoris na Zona da Mata Norte de Pernambuco, Brasil.....	44
RESUMO.....	45
ABSTRACT.....	46
1. INTRODUÇÃO.....	47
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	49
2. 1. Descrição local e estabelecimento do experimento.....	49
2. 2. Coleta e processamento de amostras.....	51
2. 3. Análises laboratoriais.....	52
2. 3. 1. Análise nos sistemas radiculares vegetais.....	52
2. 3. 2. Análises físicas de solos.....	53
2. 3. 3. Análises químicas de solos.....	53
2. 3. 4. Fracionamento físico da MOS e determinação do teor de carbono e nitrogênio da biomassa microbiana de solos.....	54
2. 4. Análises estatísticas.....	54
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4. CONCLUSÕES.....	72

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
CAPÍTULO II.....	82
Atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (<i>Opuntia stricta</i> Haw.) submetida a diferentes densidades de plantio, frequências e intensidades de corte no Sertão de Pernambuco, Brasil.....	82
RESUMO.....	83
ABSTRACT.....	84
1. INTRODUÇÃO.....	85
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	87
2. 1. Descrição local e estabelecimento do experimento.....	87
2. 2. Coleta e processamento de amostras.....	88
2. 3. Análises laboratoriais.....	89
2. 3. 1. Análise nos sistemas radiculares vegetais.....	89
2. 3. 2. Análises físicas de solos.....	89
2. 3. 3. Análises químicas de solos.....	90
2. 3. 4. Fracionamento físico da MOS.....	90
2. 4. Análises estatísticas.....	90
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
4. CONCLUSÕES.....	104
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
CAPÍTULO III.....	110
Atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (<i>Opuntia stricta</i> Haw.) submetida a distintos níveis de adubação orgânica e nitrogenada e frequências de corte no Sertão de Pernambuco, Brasil.....	110
RESUMO.....	111
ABSTRACT.....	112
1. INTRODUÇÃO.....	113

2. MATERIAL E MÉTODOS	115
2. 1. Descrição local e estabelecimento do experimento.....	115
2. 2. Coleta e processamento de amostras.....	116
2. 3. Análises laboratoriais.....	116
2. 3. 1. Análise nos sistemas radiculares vegetais.....	116
2. 3. 2. Análises físicas de solos.....	117
2. 3. 3. Análises químicas de solos.....	117
2. 3. 4. Fracionamento físico da MOS.....	117
2. 4. Análises estatísticas.....	118
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	119
4. CONCLUSÕES	136
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

1. INTRODUÇÃO

A produção agropecuária mundial ganhou maior importância, especialmente, ao fim da segunda Grande Guerra Mundial (1939-1945), muito devido à preocupação com uma possível escassez de alimentos em certas localidades do mundo, tendo em vista a assimetria em relação às capacidades naturais de produção dos diferentes Estados. Além disso, a Europa se via devastada e deveria *a priori* passar por um período de reconstrução para retomar um estágio elevado da produção em geral. Assim, gerou-se uma maior demanda mundial por alimentos, de modo a elevar o patamar da agroindústria dentro do Mercado Mundial (VIAN, 2017).

O crescimento da população e a diversificação dos produtos são fatores indutores do aumento da demanda por alimentos em escala global. E o Brasil encontra-se em posição de destaque no mercado agropecuário global, como país chave para que a oferta de alimentos possa ser suficiente para atender à demanda crescente (EMBRAPA, 2018). Uma característica importante da pecuária brasileira é ter a maior parte de seu rebanho criado a pasto (DIAS-FILHO, 2015), que se constitui na forma mais econômica e prática de produzir e oferecer alimentos para os ruminantes, refletindo as condições favoráveis da produção brasileira, como clima e disponibilidade de água.

A área global da terra agrícola é de aproximadamente cinco bilhões de hectares, ou 38% da superfície global da terra. Cerca de um terço disso é usado com culturas agrícolas, enquanto os dois terços restantes consistem em pastagens naturais e cultivadas (FAO, 2020). Porém, apesar de cerca de 95% dos alimentos consumidos serem provenientes do solo, 33% dos solos do mundo já estão degradados e cerca de 95% podem ser degradados até 2050 (FAO, 2021). Estima-se que entre 50 e 70% da área de pastagens do Brasil apresentem algum estágio de degradação, levando a uma queda significativa de produtividade (DIAS-FILHO, 2014).

No relatório intitulado Status dos Recursos do Solo Mundial (FAO; ITPS, 2015), identificam-se como as principais ameaças observadas no processo de degradação do solo, a erosão, a compactação e a perda de matéria orgânica. Essas, por sua vez, comprometem o papel de prestação de serviços ecossistêmicos dos solos (SEs), representando, portanto, a maior ameaça global às funções do solo (MONTANARELLA et al., 2016). Esse processo eleva o risco da segurança alimentar, qualidade da água e mitigação das mudanças climáticas. Novas estimativas indicam a perda anual do PIB global em ~ US \$ 8 bilhões, reduzindo os rendimentos em 33,7 milhões de toneladas e aumentando a utilização de água em 48 bilhões de m³ (SARTORI et al., 2019).

O modelo de produção agropecuário em curso, baseado em atividades intensivas em capital, larga escala de produção e pouca diversificação de produtos, apesar de apresentar altas taxas de produtividade e resultado econômico fundamental para os saldos positivos da balança comercial brasileira (BARROS, 2016), tem apresentado, como contrapartida: i) intensificação da degradação ambiental; ii) índices elevados de emissão de gases de efeito estufa, visto que cerca de 31% das emissões globais de gases de efeito estufa estão diretamente relacionadas à agricultura e às mudanças no uso da terra (FAO, 2021); iii) destruição das florestas e da biodiversidade genética; iv) erosão dos solos; v) contaminação dos recursos naturais e dos alimentos e vi) aprofundamento dos problemas de concentração de terras e rendas no meio rural (BALSAN, 2006).

A intensificação do uso do solo nos sistemas agrícolas comumente acarretam efeitos sobre suas características, com aparecimento de camadas compactadas limitantes ao desenvolvimento radicular, às taxas de infiltração de água, à aeração e à permeabilidade dos solos. Além disso, a redução dos espaços entre as partículas aumenta a coesão do solo, dificultando o seu preparo (FONTANA et al., 2016). Processos erosivos naturais e a mudança do uso da terra podem trazer perdas, por vezes, irreversíveis à capacidade produtiva da terra. As consequências do desequilíbrio causado podem ser avaliadas no ambiente pedogenético ao longo do seu perfil de solo, através dos componentes da matéria orgânica do solo (MOS), pela respiração basal e pelo carbono presente na biomassa microbiana (MARTINS et al., 2010).

Um relatório recente do Painel de Alto Nível de Especialistas em Segurança Alimentar e Nutricional do Comitê de Segurança Alimentar Mundial destaca vulnerabilidades no sistema alimentar global na sequência da pandemia do COVID-19 e solicita reformas políticas para construir um sistema alimentar resiliente, incluindo, por exemplo, a promoção da agroecologia e cadeias de abastecimento agrícola mais curtas (HLPE, 2020).

Aliado a isso, as pesquisas relacionando manejo forrageiro e propriedades do solo precisam ser contínuas. Tais informações contribuem para uma melhor caracterização de áreas de pastagem, podendo auxiliar no manejo, levando à maior capacidade de suporte de animais e, conseqüentemente, maiores rendimentos pecuários, bem como evitar a degradação do solo e mais desmatamento para estabelecer novas pastagens (FIGUEIREDO et al., 2016).

A hipótese da tese foi que práticas de manejo e uso da terra afetam os atributos do solo de sistemas de produção de forragem. E objetivou avaliar atributos do solo e do sistema radicular em distintos sistemas de produção de forragem, envolvendo gramínea, leguminosas e cactácea, sendo dois sistemas na Zona Fisiográfica do Sertão do Estado e um na Zona da Mata Seca de Pernambuco.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2. 1. Estoque de carbono no solo

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) define o solo como sendo uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos; contêm matéria viva e podem ser vegetados na natureza e, eventualmente, terem sido modificados por ações do homem (SANTOS et al., 2018). E entre os indicadores de qualidade do solo relacionados às variações e formas de carbono (C), destaca-se o estoque de C, em função de sua grande importância na predição da sustentabilidade dos sistemas de produção; pois, a depender do sistema de manejo adotado, os seus teores podem permanecer estáveis, aumentar ou diminuir em relação as áreas onde não há interferência de ordem antrópica (NANZER et al., 2019).

Com base nos mecanismos de estabilização da matéria orgânica do solo (MOS) (isto é, físico, químico, bioquímico, microbiano e ecológico), o C do solo pode permanecer sequestrado no solo por milhares de anos (WIESMEIER et al., 2019). Entretanto, os solos cultivados do mundo perderam entre 25 a 75 % do seu estoque de C original (LAL, 2018; LORENZ; LAL, 2018) que foi lançado na atmosfera na forma de dióxido de carbono (CO₂), principalmente devido às práticas de manejo insustentáveis que resultam na degradação do solo e no aumento das mudanças climáticas e seus impactos. A degradação do solo reduz a capacidade do solo de manter e armazenar C, contribuindo para ameaças globais como mudança do clima, com um custo estimado de trilhões de dólares todos os anos (DAVIES, 2017).

O aumento induzido antropogenicamente de 146 % na atmosfera da concentração de CO₂, de 278 ppm na era pré-industrial (cerca de 1750) para 405,5 ppm em 2017, está aumentando, atualmente, a uma taxa de 2,24 ppm ano⁻¹ (0,55 %) (WMO, 2018). Este acréscimo, junto com aqueles do metano (CH₄; de 722 ppb para 1859 ppb em 257% e aumentando a uma taxa de 0,38 % ou 6,9 ppb ano⁻¹) e óxido nitroso (N₂O; de 270 ppb para 330 ppb na taxa de 0,27 % ou 0,93 ppb ano⁻¹) já causou aumento de ~ 1 °C (1,8 °F) na temperatura global desde a Revolução Industrial (IPCC, 2018) com consequências terríveis, como exemplificado pelo aumento na frequência de eventos extremos ao longo do mundo.

O processo básico de sequestro de C na biosfera terrestre ocorre principalmente como resultado da fixação de C via fotossíntese, que remove CO₂ da atmosfera e o armazena como carbono orgânico do solo (COS), por meio da formação de complexos organo-minerais, o qual representa 58% da MOS, a qual pode ser descrita, de acordo com Hayes e Swift (1978), como

o componente não-vivo da fração orgânica do solo, formada por uma mistura heterogênea composta, principalmente, pelos produtos resultantes da transformação química e microbiana de detritos orgânicos.

A retenção de uma parte da produtividade primária líquida (PPL) na biosfera terrestre como produtividade líquida do ecossistema (PLE) e formação de COS e CIS constituem os principais processos de sequestro de C terrestre. Portanto, a estratégia básica do sequestro de C terrestre é (1) aumentar PPL e PLE, e (2) aumentar seu armazenamento no solo como COS e CIS. Enquanto que a PPL e PLE dependem em grande parte de um fornecimento adequado de nutrientes essenciais às plantas (macro e micronutrientes) e capacidade de água disponível da zona da raiz (água verde), a formação de complexos organo-minerais estáveis como COS depende das características do perfil do solo (isto é, profundidade, horizonte, textura, composição mineralógica, capacidade de água disponível e reservas de nutrientes) e atributos da paisagem (ou seja, terreno, posição, aspecto e drenagem) (LAL et al., 2018).

Sequestro de C na biosfera terrestre, com uma capacidade técnica de sumidouro cumulativo de C de 155 Pg C ($158,6 \times 10^9$ tn C) na vegetação e 178 Pg C ($182,1 \times 10^9$ tn C) no solo até 2100 (LAL et al., 2018) é equivalente à redução do CO₂ atmosférico em 156 ppm.

Além disso, o uso da terra (por exemplo, culturas agrícolas, pastagens, florestas, áreas urbanas, de mineração e alagadas) e manejo (ou seja, agricultura de conservação [AC], agrossilvicultura, cultivo de cobertura, manejo de nutrientes, irrigação, rotação de culturas) e o uso de insumos (por exemplo, biochar e fertilizante) também impactam a proporção, valor cumulativo e o período para atingir a saturação do solo. Esse último também depende do C histórico perdido ou esgotado da biosfera pelas atividades antrópicas (LAL, 2018).

Avaliando práticas individuais, Conant et al. (2016) estimaram mudanças de estoque positivo médio para pastagens melhoradas bem manejadas ($0,28 \text{ tC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), semeadura de leguminosas ($0,66 \text{ tC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e fertilização ($0,57 \text{ tC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

Além do sequestro de C, a MOS engloba a mineralização-N, agregação, promoção da saúde vegetal e retenção de nutrientes. As interações entre a MOS e os minerais do solo são fundamentais na definição da estrutura do solo e na formação de microagregados, formação de poros, aeração, retenção de água e metabolismo de C, nitrogênio (N), fósforo (P), enxofre (S) e ferro (Fe). MOS e COS têm se mostrado importantes para o crescimento saudável das plantas, agindo suprimindo patógenos e fornecendo nutrientes essenciais necessários para o crescimento vegetal. A MOS pode promover, por exemplo, o crescimento de micróbios saprofitos que secretam compostos antifúngicos e bactericidas solúveis, bem como voláteis que estão

envolvidos na indução de resistência sistêmica em plantas (HAMMERBACHER; COUTINHO; GERSHENZON, 2019; VLOT et al., 2020; CAMARENA-POZOS et al., 2021).

A interação entre MOS e micróbios é tão crítica que foi proposto que MOS e micróbios juntos podem ser explorados para ajudar na transformação de solos semiáridos em solos férteis (VIDIELLA; SARDANYÉS; SOLÉ, 2020), e para neutralizar a desertificação promovida pelas mudanças climáticas.

Os estoques de COS são o maior reservatório de carbono na biosfera, importantes sumidouros de CO₂ da atmosfera e têm o potencial de mitigar os impactos das mudanças climáticas atuais e futuras (EDENHOFER et al., 2014). No entanto, a predição dos estoques globais do COS é altamente variável; Scharlemann et al. (2014) revisaram 27 estudos e encontraram valores variando de 504 a 3000 Pg C (média de 1460,5 Pg C) até 1 m de profundidade, possivelmente resultante de diferentes dados de solo e métodos empregados.

Pastagens são componentes importantes do ciclo terrestre do C, armazenando 119-121 Pg C em pastagens (ERB et al., 2018) e 10- 30% do COS com uma taxa de sequestro de 0,5 Pg C ano⁻¹ (FOLLETT; REED, 2010). Sequestram grandes quantidades de COS por causa de alocação de C abaixo da superfície do solo e renovação das raízes, ou seja, pela rizodeposição ativa (JONES; DONNELLY, 2004) e a incorporação direta na matriz do solo permite um alto grau de proteção física do COS. Em particular, a transformação da serapilheira é um determinante importante do ciclo do C nos ecossistemas de pastagem, que é afetada tanto pela qualidade desses resíduos quanto pela atividade da rizosfera (PERSONENI; LOISEAU, 2005).

Intervenções de manejo como corte versus intensidade de pastejo (ou seja, a fração de PPL consumida por animais em pastejo) pode influenciar particularmente o estoque de COS. As pastagens trocam C como CO₂ entre plantas e solos, e a atmosfera pela fotossíntese e respiração (CHANG et al., 2015), que dentre os parâmetros fisiológicos, são comumente estudados com a finalidade de avaliar a eficiência da captura do C atmosférico para o crescimento, manutenção e acúmulo de biomassa pelas plantas.

As plantas também apresentam um papel fundamental no desenvolvimento da estrutura do solo, incluindo a formação de bioporos do crescimento e renovação das raízes e estabilização dos agregados do solo (OADES, 1993). Macroagregados do solo (isto é, >0,250 mm), por exemplo, são formados e estabilizados pelo emaranhamento físico de raízes e hifas fúngicas, incluindo as de micorrizas vesicular arbusculares (MVA) e a deposição de mucilagens microbianas e vegetais, particularmente polissacarídeos (TISDALL; OADES, 1982; OADES, 1993). Esses agentes estabilizadores tendem a ser transitórios em natureza e requerem entradas contínuas de materiais orgânicos e atividade microbiana para manter a estabilidade (TISDALL;

OADES, 1982; BLANKINSHIP et al., 2016). Além disso, atividades de minhocas e outras faunas nas pastagens também auxiliam na formação de macro e microagregados, os quais protegem o COS da decomposição por longos períodos (BOSSUYT; SIX; HENDRIX, 2005).

A quantidade de COS é determinada pelas entradas e saídas de C no solo (XIAO et al., 2017). Entradas de C são derivadas naturalmente da captação fotossintética anual de C de todas as folhas de uma pastagem ou produção primária bruta (PPB), na forma de exsudatos de raízes e serapilheira. A PPL de pastagens é o C líquido armazenado como novo material vegetal antes da colheita e outras perdas. Entradas adicionais de C são derivadas de esterco animal. As perdas de C ocorrem através de processos naturais de respiração, decomposição, erosão, lixiviação, atividade microbiana, fogo e remoção de biomassa via pastejo animal e intervenções humanas através da colheita de biomassa.

Para os pastos que são cortados, regularmente, para produzir forragem, a biomassa colhida é, posteriormente, retornada à atmosfera na forma de CO₂ e CH₄ emitidos por digestão animal ou por decomposição de esterco e chorume (CHANG et al., 2015). Quando os pastos são pastejados, a biomassa ingerida pelos animais contém compostos orgânicos digestíveis e não digestíveis. A fração de C não digestível (25-40%) da ingestão é devolvida ao solo através de excreta (fezes e urina). A parte digestível é respirada como CO₂ logo após a ingestão (CHANG et al., 2015). Uma pequena fração do total de C ingerido é utilizado nos processos metabólicos, anabólicos e produtivo pelos animais e os produtos como carne e leite são uma fonte de exportação de C do ecossistema de pastagem (SOUSSANA; TALLEC; BLANFORT, 2010). Outra pequena parte do C digerido é emitida na forma de CH₄ pela fermentação entérica de ruminantes (SEJIAN et al., 2012).

2. 2. Sistemas silvipastoris

Os sistemas de cultivo podem proporcionar mudanças significativas em diversas propriedades do solo, sejam físicas (ZHANG et al., 2017), químicas (AGEGNEHU; AMEDE, 2017) ou biológicas (LÖBMANN et al., 2016) em relação à comunidade clímax pré-estabelecida. Portanto, o uso correto do solo e recursos hídricos são considerados princípios fundamentais do desenvolvimento sustentável (FALLAH; KAVIAN; OMIDVAR, 2016).

Dentre as alternativas de produção agropecuária sustentável, se destacam os sistemas silvipastoris (SSPs), uma das modalidades da integração lavoura pecuária floresta (ILPF), que são associações de árvores, pastagens e gado numa mesma área (PACIULLO; PIRES; MÜLLER, 2017). Esses sistemas podem fornecer diversos benefícios como diversificação da

produção agrícola (COSTA et al., 2016), recuperação de áreas degradadas (SILVA et al., 2017), serviços ecossistêmicos (SOLLENBERGER et al., 2019), aumento da fertilidade do solo (PACIULLO et al., 2014) e da infiltração de água no solo (SAHIN et al., 2016), controle de erosão (VANDERMEULEN et al., 2018), bem estar animal (DOMICIANO et al., 2018).

A ILPF faz parte do “Plano Setorial para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura”, o que se convencionou chamar de “Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono)”, assumido pelo governo brasileiro na Conferência das Partes (COP 15, Copenhague), em 2009, sendo coordenado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Este programa disponibiliza crédito, dentre outros, para recuperação de 15 milhões de hectares com pastagens degradadas e para implantação de cinco milhões de hectares com sistema de ILPF, no intuito de zerar o desmatamento ilegal da Amazônia até 2030 e, com isso mitigar as mudanças climáticas, otimizando a produção sustentável da pecuária brasileira (MAPA, 2015).

Até 2018, por meio das medidas do Plano, entre 100,21 e 154,38 milhões Mg de gás carbônico (CO₂) já haviam sido mitigados, já estando em cumprimento com as metas estabelecidas, de modo que a maior parte delas já haviam sido batidas até o período supramencionado. Além disso, metas em área de expansão de recuperação de pastagens, ILPF, Sistema de plantio direto (SPD) e Fixação biológica de nitrogênio (FBN) foram cumpridas até o período supracitado (MAPA, 2018).

Além desse compromisso assumido na COP 15, o Brasil apresentou à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (CQNUMC) sua pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (*intended Nationally Determined Contribution – iNDC*), durante a COP 21 em Paris (MRE, 2015). Com o depósito do instrumento de ratificação do acordo pelo país, em setembro de 2016, a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil deixou de ser “pretendida” e o país se comprometeu a reduzir as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, além de uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de GEE em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030 (MRE, 2015).

A utilização de leguminosas forrageiras em consórcio com gramíneas pode proporcionar incremento na produção de forragem, possibilidade de aumento da oferta de proteína na dieta dos animais e grande potencial para FBN (SADEGHPOUR et al., 2013), além de potencial de mitigação dos GEE através da absorção de CO₂, presente no ambiente, e da compensação de gases como o metano (CH₄) produzido pelos ruminantes através da fermentação entérica e o óxido nitroso (N₂O), resultante da deposição de dejetos associada à adubação nitrogenada (PIVA, 2012).

A FBN é determinada pela biodiversidade, história evolutiva à perturbação no bioma tropical (WURZBURGUER; HEDIN, 2016) e varia com as espécies, e características específicas da espécie (taxa de crescimento arbóreo, altura do dossel e resposta ambiente e manejo). Franco e Faria (1997) avaliaram 616 espécies de leguminosas arbóreas para nodulação em diferentes regiões do Brasil e verificaram que 387 das 616 espécies nodularam. A proporção de espécies nodulantes foi menor para a subfamília Caesalpinioideae (25%) em comparação com as subfamílias Mimosoideae (76%) e Papilionoideae (80%). Dubeux et al. (2015) relataram a FBN em leguminosas arbóreas variando de 24 a 304 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ para diferentes espécies e locais; entretanto, a faixa representativa é de 50 a 150 kg N ha⁻¹ ano⁻¹.

As gramíneas se beneficiam da FBN via raízes de leguminosas e degradação de nódulos, decomposição de serrapilheira de leguminosas, nutrientes reciclados por meio da excreta e, em menor escala, exsudatos nitrogenados de raízes e redes miceliais de fungos micorrízicos (JALONEN; NYGREN; SIERRA, 2009). Mais de 80% das plantas terrestres associam-se a fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) (BRUNDRETT; TEDERSOO, 2018), formando associações micorrízicas em plantas com raízes e associações semelhantes a micorrizas em plantas sem raízes (FIELD; PRESSEL, 2018). Os FMAs pertencentes ao filo Glomeromycota e classe Glomeromycetes, são organismos biotróficos obrigatórios que estabelecem relação simbiótica mutualista com raízes de angiospermas, gimnospermas, além de alguns representantes das briófitas e pteridófitas (SOUZA et al., 2010).

Os FMAs podem desempenhar um papel importante na mitigação das mudanças climáticas (BENDER et al., 2014), devido à tolerância a uma faixa mais ampla de temperaturas. FMAs também atuam na redução das emissões de N₂O pelo aumento da absorção e assimilação de N pelas plantas. Consequentemente, como resultado, o N solúvel no solo diminui e pode afetar negativamente o processo de desnitrificação (BENDER et al., 2014; BERRUTI et al., 2016).

Já em relação à ocorrência de pastejo animal nos SSPs, este pode melhorar a ciclagem de nutrientes devido ao retorno mais rápido de nutrientes (WESP et al., 2016). O desempenho animal em pastagens varia e está, diretamente, relacionado à proporção das espécies forrageiras de maior qualidade presente e acessível aos animais. Durante os meses da estação seca, as gramíneas forrageiras fornecem ao gado pouca proteína bruta (PB) e elevado teor de fibra que resulta em baixa digestibilidade (SILVA et al., 2017). Os ruminantes podem reduzir essa deficiência nutricional através da ingestão de maiores proporções de leguminosas naquela estação.

No entanto, há aspectos a considerar em SSPs que podem ser prejudiciais à produtividade da pastagem. Como exemplo, a possibilidade de compactação do solo nas áreas sombreadas, devido à permanência de animais ao longo do tempo. Tais aspectos negativos, contudo, podem ser atenuados ou até mesmo neutralizados pela escolha adequada das forrageiras e o manejo da pastagem.

Além disso, a utilização de fertilizantes N também podem ameaçar a resiliência do funcionamento do sistema terrestre (STEFFEN et al., 2015). As entradas globais de N pela fixação biológica chegam a 21 Tg N ano⁻¹, enquanto as entradas de N via fertilizantes sintéticos atingiram 51 Tg N ano⁻¹ (UWISEYE et al., 2020).

Entradas de N no solo estão, diretamente, associadas às emissões de N₂O e outros gases NO_x que contribuem para as mudanças climáticas (TIAN et al., 2020) e causam outras modificações atmosféricas, incluindo formação de poluentes e depleção de ozônio na estratosfera (GALLOWAY et al., 2003). Entradas excessivas de N no solo através de fertilizantes aumentam as perdas de N reativo para os ecossistemas circundantes (DELGADO; FOLLET, 2010). N reativo é altamente móvel e é facilmente e amplamente disperso por processos de transporte hidrológico, principalmente na forma de nitratos (NO₃⁻) (GALLOWAY et al., 2003), que é o poluente de água potável mais comumente detectado em lençóis freáticos (WEIL; BRADY, 2017), cujo excesso pode causar eutrofização, hipóxia e perda de biodiversidade em lagos, córregos e ecossistemas costeiros (SCHLESINGER, 2009), bem como desequilíbrios de biodiversidade e invasão de espécies, como proliferação excessiva de algas no Oceano Atlântico (WANG et al., 2019).

Neste sentido, a escolha das leguminosas deve levar em consideração a adaptação edafoclimática das plantas, sua aceitabilidade pelos animais, a velocidade de crescimento e competição com a pastagem, além da capacidade de fornecer produtos alternativos e fixar N (APOLINÁRIO et al., 2016). E dentre as espécies que vêm sendo estudadas para a implantação em SSPs, podem-se citar a [*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.], pertencente à família Fabaceae, conhecida popularmente como gliricídia, com origem na América Central, característica de regiões tropicais e que se adapta a elevadas altitudes, desde o nível do mar até 1.500 m, apresentando boa plasticidade a distintas zonas ecológicas, sendo uma plantas rústica, de rápido crescimento, adaptada a condições de baixa fertilidade e elevadas temperaturas (AGUIAR JÚNIOR et al., 2011).

A referida leguminosa apresenta inúmeras vantagens, tais como adição de N atmosférico, provisão de sombra aos animais em pastejo e aumento do desempenho animal pela oferta de forragem de melhor qualidade quando comparado ao pasto exclusivo de *Urochloa*

decumbens (Stapf) R. D. Webster (braquiária) (GOMES da SILVA et al., 2021). Além disso, essa leguminosa pode produzir serapilheira com menos compostos fenólicos, menor relação C/N, levando a uma ciclagem de nutrientes mais eficiente por meio da decomposição microbiana mais rápida (SÁ et al., 2017).

O gênero *Mimosa*, atualmente reclassificado na subfamília Caesalpinioideae, no clado mimosoid (AZANI et al., 2017) possui mais de 500 espécies que podem ser encontradas em diferentes ambientes (SIMON et al., 2011). Dentre essas, está a *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth., conhecida popularmente como sabiá ou sansão do campo, nativa do Nordeste do Brasil.

Essa leguminosa apresenta sistema radicular profundo, embora concentre o maior volume de raízes nos primeiros 20 cm de profundidade, favorecendo, dessa forma, a absorção de água e auxiliando o desenvolvimento da espécie em condições ambientais limitantes (PARDON et al., 2017). A madeira produzida pela leguminosa apresenta elevado valor comercial, sobretudo na venda de estacas e mourões (APOLINÁRIO et al., 2015), a qual tem potencial de permitir uma renda anual da produção total do sistema de U\$ 500-600 ha⁻¹ (APOLINÁRIO et al., 2015), e sua implantação pode contribuir na redução da exploração irracional da floresta nativa, produto da extração irregular de madeira (NÓBREGA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2019).

Sua capacidade de nodular com rizobia, especialmente a β -rizobia do gênero *Paraburkholderia* (anteriormente classificada em *Burkholderia*) (SAWANA; ADEOLU; GUPTA, 2014) pode estar, diretamente, relacionada à sua boa adaptação a outras regiões do Brasil, como Sudeste onde predomina o bioma Mata Atlântica. Por esse motivo, a sabiá é um modelo potencial para entender como a interação com microrganismos simbióticos influencia a adaptação de espécies vegetais a novos habitats.

Após a senescência das folhas e morte das raízes, o N orgânico contido no tecido é convertido em N mineral por meio do processo de mineralização, em que micro-organismos utilizam os compostos nitrogenados contendo C como fonte de energia na respiração e os convertem em formas inorgânicas passíveis de serem absorvidas pelas plantas. Caso o teor de N presente nos resíduos vegetais não satisfaça os requisitos nutricionais para o crescimento microbiano, característica comum da serapilheira formada por gramíneas forrageiras tropicais, o N inorgânico do solo é absorvido pelas comunidades microbianas no processo de imobilização (CHEN et al., 2014).

As bactérias são fundamentais na mineralização do N, atuando por meio da produção de exoenzimas, como as proteases, que agem na despolimerização de proteínas, primeira fase da mineralização. Entre as principais proteases microbianas, estão as serinas endopeptidases e

cisteínas endopeptidases, produzidas por bactérias abundantes no solo, como *Bacillus*, *Pseudomonas* e *Clostridium* (VRANOVA; REJSEK; FORMANEK, 2013). Após a despolimerização, os aminoácidos são desaminados produzindo NH_3 e compostos orgânicos intermediários por amonificação (GAO et al., 2017). Maior diversidade bacteriana na rizosfera das plantas pode aumentar a atividade proteolítica no solo, elevando a mineralização do N, resultando em maiores concentrações de N disponível para as plantas (WEIDNER et al., 2015).

As leguminosas glicirídia e sabiá são capazes de contribuir mensalmente com 6 e 9 kg N ha⁻¹, respectivamente, após um e dois anos de estabelecimento dos SSPs, por meio da FBN em sistema de consórcio com a gramínea braquiária na mesorregião da Mata de Pernambuco (APOLINÁRIO et al., 2015). Essas espécies de leguminosas podem ser noduladas por diversas bactérias diazotróficas (FLORENTINO et al., 2014), algo de grande importante, visto que a baixa disponibilidade de N pode afetar o desenvolvimento da raiz, a produção de fotoassimilados e a taxa de crescimento como um todo, podendo alterar as características estruturais das plantas (GIMENES et al., 2017).

Nos primeiros três anos de estabelecimento, a produtividade animal, geralmente, é similar entre os SSPs contendo sabiá ou glicirídia comparados à monocultura de braquiária (COSTA et al., 2016). No entanto, com o desenvolvimento da sabiá, a competição com vegetação de estrato herbáceo pode reduzir a capacidade de suporte do sistema (DUBEUX Jr. et al., 2017). Apesar da redução, a venda de estacas de madeira pode compensar a perda de produtos de origem animal e, de fato, pode dobrar a renda bruta do sistema.

Uma característica importante, responsável pela grande aptidão das pastagens em acumular COS é a alta relação raiz/parte aérea, decorrente, em grande parte, das pastagens serem basicamente formadas por plantas perenes, principalmente gramíneas, com taxas fotossintéticas elevadas e capazes de rápido acúmulo de biomassa, sobretudo nas raízes. Além disso, outras funções das plantas de cobertura são suprimir o crescimento de ervas daninhas, manter a umidade do solo, fornecer grandes quantidades de matéria seca (MS) e nutrientes vegetais para melhoria da fertilidade do solo (ARAUJO-JUNIOR et al., 2015).

O gênero *Urochloa* consiste em cerca de 100 espécies que crescem nos trópicos e subtropicais. A maioria dessas espécies são nativas da África, onde constituem componentes importantes da paisagem natural da savana (GHIMIRE et al., 2015). Fora da África, a ampla adaptação comercial e adoção de espécies de *Urochloa* em ambientes não nativos melhorou a indústria pecuária mundial, notadamente na América Latina, bem como na Ásia e na Austrália (GHIMIRE et al., 2015).

Uma das espécies do gênero *Urochloa* mais cultivada na região tropical do Brasil é a *Urochloa decumbens* (Stapf) R. D. Webster, popularmente conhecida por braquiária. É originária de Uganda, África. Atualmente, a espécie forrageira já está difundida pela América do Sul, Austrália, Indonésia, Vanuatu e Malásia devido à sua adaptação a uma ampla variedade de tipos de solos e ambientes (LOW, 2015). É uma gramínea tropical altamente produtiva, de longa duração e se espalha através dos estolões e é de longa vida, crescendo formando canteiros grossos, e se espalhando por meio de seus estolões. Fanindi (2016) relatou que a braquiária pode desenvolver amplamente em áreas marginais, especialmente em solos ácidos que mostra alta adaptabilidade.

Gómez et al. (2012) estudaram a braquiária sob três níveis de sombreamento (70, 50 e 0%), na Venezuela, e constataram que a produtividade final da pastagem diminuiu 34% com o sombreamento de 50%, e 57% com 70% de sombreamento. Além disso, o sombreamento aumentou a área foliar específica em até 46%. Dessa forma, esses autores concluíram que tal gramínea apresenta alta plasticidade ao sombreamento, o que explica o sucesso de sua utilização em SSPs.

Além da possibilidade de elevada produção e persistência da palha, as forrageiras perenes têm sido consideradas plantas melhoradoras do ambiente solo, seja pelos seus sistemas radiculares agressivos ou associação com micro-organismos de modo a favorecer a mineralização de nutrientes ampliando a capacidade produtiva do solo e, até mesmo redução populacional de alguns fitopatógenos, a exemplo de alguns nematoides e doenças como o mofo branco (BOGIANI; FERREIRA, 2017).

2. 3. Palma forrageira na Região semiárida do Nordeste brasileiro

O Semiárido brasileiro com predominância de um bioma exclusivo (Caatinga) estende-se por uma área igual 1.127.953 km², representando 12% do território Nacional. A região abriga uma população superior a 28 milhões de pessoas, dos quais 10,6 milhões residem no meio rural e 17,3 milhões em áreas urbanas. Uma parcela significativa da população vivencia uma dinâmica rural, uma vez que 90% dos municípios de região semiárida são classificados como pequenos, por apresentarem menos de 50.000 habitantes. A região apresenta 1,7 milhões de estabelecimentos rurais, sendo 1,0 milhão com menos de 5,0 hectares, mas que respondem por 31% do valor da produção dessa região (BRASIL, 2017).

As cactáceas apresentam grande importância econômica com diversas utilidades, sendo relacionadas a várias práticas, como ornamentação, medicina tradicional, culinária, produção

de forragem, como bioindicador da chuva, construção de cercas vivas e produtos diversos (BRAVO FILHO et al., 2018). E dentre as mais utilizadas no Brasil, especialmente no semiárido do Nordeste, destaca-se a palma forrageira. Existem 2.000 espécies de cactáceas pertencentes a 178 gêneros, entretanto dois gêneros se destacam, *Opuntia* e *Nopalea*, que têm sua origem Mexicana associada à economia agrícola do Império Asteca (MARQUES et al., 2017) e que possuem espécies de maior potencial para produção de forragem, quando comparadas a outras espécies de Cactáceas (DUBEUX Jr. et al., 2017).

A palma, quanto ao solo, é exigente às condições físico-químicas, sendo adaptada a solos arenosos e a argilosos, sendo mais recomendado os argiloarenosos. Ademais, deve-se ter foco na adubação e na drenagem, pois solos propícios a alagamentos se tornam um problema grande para a produção. A precipitação pluviométrica média ideal para o cultivo da palma forrageira varia entre 360 mm a 820 mm. A adubação do solo deve seguir análise do solo, pois é através dela que o produtor vai ter a noção da situação nutricional do solo onde se pretende plantar, sendo a adubação mineral e/ou orgânica a ideal (PEREIRA et al., 2020).

E é um importante recurso forrageiro para a região semiárida do Brasil, com elevada capacidade de produção de biomassa se comparada à vegetação nativa do bioma Caatinga (NETO et al., 2016), região essa que possui solos bastante diversificados e com elevada variação nas características físico-químicas. Os solos vão desde Neossolos Litólicos (19,2% dos solos do semiárido nordestino), os quais são pouco desenvolvidos (muito rasos), com horizonte A assentado diretamente sobre a rocha, até Latossolos (21% da região), profundos, bem drenados, no entanto com baixos teores de MO.

A produção dessa forrageira no Brasil é de aproximadamente 3.581 t em 126.925 estabelecimentos. Os estados com maiores produções em ordem decrescente são: Bahia, Paraíba, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte e Ceará (IBGE, 2017). Para o estado de Pernambuco, do ponto de vista climático, Moura et al. (2011) constataram que 42,3 % da área apresentou condições adequadas ao cultivo da palma, 54,4 % apresentou alguma restrição, mas que não impede seu cultivo, e o restante do estado (3,3 %), se mostrou inadequado ao cultivo, especialmente devido às áreas com excesso de chuvas (próximas ao litoral).

A palma forrageira apresenta o metabolismo ácido das crassuláceas (CAM), uma resposta evolutiva ao estresse hídrico. Esse mecanismo faz com que haja a abertura estomática noturna e o fechamento diurno. O CO₂ fixado à noite pela PEP-carboxilase nas células do mesófilo paliçádico em forma de malato, em sequência é transformado em ácido málico e armazenado nos vacúolos, onde durante o dia é reconvertido em malato, e depois em CO₂,

quando introduzido ao ciclo de Calvin pela Rubisco (INGLESE et al., 2017), completando assim todas as etapas da fotossíntese da planta.

As adaptações anatômicas e morfofisiológicas adquiridas, evolutivamente, pelas cactáceas contribuíram para o sucesso agroecológico dessa cultura; principalmente à elevada absorção de água e eficiência de uso, resultando em sua adaptabilidade às condições ambientais que envolvem elevada demanda evaporativa atmosférica e menor teor de água no solo (HARTZELL; BARTLETT; PORPORATO, 2018).

O número de estômatos nos cladódios da palma é baixo, de 10 a 30 mm^{-2} , enquanto as folhas de plantas C3 possuem cerca de 300 estômatos mm^{-2} (LIGUORI et al., 2013). Além disso, uma planta CAM, durante processos metabólicos, gasta de 50 a 100 g de água para cada grama de matéria seca (MS) produzida, quantidade bem inferior quando comparado com valores de 250 a 300 g e 400 a 500 g para plantas C4 e C3, respectivamente (TAIZ; ZEIGER, 2013). Entretanto, assim como as demais plantas CAM, a palma forrageira mesmo requerendo menos água que outras plantas, necessita de solos bem adubados e manejo adequado para obter alta produção por área e boa qualidade (SILVA et al., 2015).

Além das características adaptativas e de tolerância a restrição hídrica, a palma forrageira se destaca em seus atributos nutricionais, por ser um alimento rico em energia, carboidratos não-fibrosos (CNF) e matéria mineral, como ferro, zinco, potássio e, principalmente, o cálcio (COSTA et al., 2012; DESSIMONI et al., 2014), além de alto rendimento de biomassa com produtividades médias de aproximadamente 380, 393 e 480 t MV ha^{-1} a cada dois anos para as cultivares Gigante, Redonda e Miúda respectivamente (CAVALCANTE et al., 2014).

Cladódios do gênero *Opuntia*, por exemplo, são altamente utilizados em alimentos industriais (AMMAR; ENNOURI; ATTIA, 2015). Siqueira et al. (2017) ressaltam que a palma forrageira tem o custo de US\$ 0,13 kg^{-1} de MS para o produtor, menor, quando comparado a outras forrageiras como silagem de milho e feno de Tifton, que custa US\$ 0,27 kg^{-1} MS.

No entanto, as regiões áridas, semiáridas e subúmidas secas são as mais vulneráveis à ocorrência da desertificação, isto é, degradação da terra nestas regiões, resultante de vários fatores, entre eles as variações climáticas e as atividades humanas (ONU, 1994), como práticas agrícolas como cultivo excessivo e irrigação inadequada, desmatamento, mineração, latifúndio, superpastejo na criação de animais, queimada, de tal modo que esgota os nutrientes e degrada o solo, mas também podem-se levar em consideração os aspectos sociais, políticos, econômicos, culturais, dentre outros (SANTOS; GALVINCIO, 2013; ARAÚJO; SOUZA, 2017).

O texto da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (UNCCD, siglas em inglês) menciona a ocorrência da desertificação às áreas entendidas como “todas, com exceção das polares e subpolares, nas quais a razão entre a precipitação anual e a evapotranspiração potencial está compreendida entre 0,05 e 0,65”.

As áreas susceptíveis à desertificação no Brasil compreendem 1.340.863 km², incluindo 1.488 municípios, localizados em nove estados da região semiárida do Nordeste, municípios no norte de Minas Gerais e do Espírito Santo (PBMC, 2014; UNCCD, 2015).

A ONU denomina essas áreas como Núcleos de Desertificação, como é o caso em destaque de Cabrobó no estado de Pernambuco. A CGEE (2016) destaca que em Pernambuco, a concentração das áreas degradadas situa-se na região centro sul do Estado. Manchas esparsas se encontram distribuídas por toda a área. O total de área degradada mapeada atinge 3.286,42 km², que representam 3,67% de sua ASD. No Estado, encontra-se o Núcleo de Desertificação de Cabrobó, indicado por Vasconcelos Sobrinho e confirmado pelo PAN-Brasil (CGEE, 2016, p. 67).

De modo geral, os solos nordestinos são muito susceptíveis à degradação, a qual começa, geralmente, com o decréscimo do conteúdo de MO da camada superior do solo e redução da sua fertilidade (RIBEIRO; SAMPAIO; GALINDO, 2009). Estima-se que a cada tonelada de MS colhida de palma forrageira são extraídos do solo 9 kg de nitrogênio, 1,6 kg de fósforo, 25,8 kg de potássio e 23,5 kg de cálcio. Ou seja, admitindo-se uma produtividade de 25 t ha⁻¹ ano⁻¹ de MS, a palma extrairia 225 kg de nitrogênio, 40 kg de fósforo, 645 kg de potássio e 588 kg de cálcio (DUBEUX JÚNIOR e SANTOS, 2005). Diversos outros autores têm comprovado a importância da adubação orgânica, química e ambas no cultivo da palma forrageira no semiárido brasileiro (PADILHA JUNIOR et al., 2016; PEIXOTO et al., 2018; SOUZA et al., 2017).

Diante disso, o sistema radicular da palma forrageira, cultura perene, é de suma importância, pois, é responsável pela absorção de água e nutrientes, elementos vitais para o desenvolvimento da planta e atinge, em geral, profundidade de até 30 cm em diferentes tipos de solo, com predominância de raízes superficiais, distribuídas na horizontal, conferindo maior sobrevivência a grandes períodos de seca, sobretudo por apresentarem características xeromórficas (MARQUES et al., 2017).

Uma das modificações mais básicas da raiz de palma forrageira para aumentar o estabelecimento no solo é o aumento na circunferência da raiz principal, pois raízes com diâmetros maiores são menos propensas a deformar ou quebrar (BOBICH; NORTH, 2009). Conforme estes mesmos autores, as raízes de *Opuntia* sp. São compostas por tecidos axiais, que

são vasos orientados longitudinalmente, fibras e raios parenquimatosos, que são radialmente orientados e formados por células de armazenamento de água e amido.

Uma característica importante nas raízes das cactáceas é o desenvolvimento de um tecido suberizado e periderme lignificada que auxilia a retardar a perda de água das raízes para um solo seco (DUBROVSKY; NORTH; NOBEL, 1998). Outra característica é a presença de células ou ductos de mucilagem, que são produzidos nos tecidos secundários das raízes da maioria das cactáceas, incluindo *Opuntia ficus-indica* e *O. acanthocarpa*. A presença de mucilagem nas raízes pode atuar como capacitor e ajudar a atenuar mudanças no potencial de água dos tecidos circundantes (NOBEL; CAVELIER; ANDRADE, 1992).

Além disso, os sistemas de cultivo para produção de palma forrageira podem ser influenciados por diversos fatores, como: condições climáticas, qualidade do solo, tamanho da propriedade, oferta de mão de obra, assistência técnica, possibilidade de mecanização, custos de aquisição de insumos, disponibilidade de adubo orgânico, níveis e fontes dos adubos, pragas e doenças, cultivo consorciado ou exclusivo, espaçamento utilizado, uso ou não da irrigação, dentre outros (PADILHA JUNIOR et al., 2016).

No ponto de vista agrônomo, a palma Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* Haw.), originária do México e que foi introduzida pelo Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) em 1996, cedida pela Universidade de Chapingo, México (SANTOS et al., 2020), tem se mostrado menos exigente em nutrientes, mais tolerante às condições de estresse hídrico e também tem apresentado maior produção de matéria seca (MS) por unidade de área em relação a outros genótipos (SILVA et al., 2017). Os clones IPA Sertânia (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck), Miúda e Orelha de Elefante Mexicana são resistentes à praga cochonilha-do-carmim (*Dactylopius* sp.) e suas áreas de cultivo estão em expansão no Nordeste brasileiro (SILVA et al., 2015).

A palma Orelha de Elefante Mexicana (Figura 1) pertence à divisão Embryophyta, subdivisão Angiospermea, classe Equisetopsida C. Agardh, subclasse Magnoliidae Novák ex Takht., família Cactaceae e gênero *Opuntia* (TROPICOS, 2020). É do tipo arborecente com mais de 1 m de altura; coroa larga; glabra; cladódios obovalados com 30-60 cm de comprimento, 20-40 cm de largura, verde escuros, cobertos com uma camada de cera (ZAPPI et al., 2015).



Figura 1. Palma Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia Stricta* Haw.).

Apresenta plantas de porte médio, mal conformadas, com raquetes ovoides de cor verde-cinza e com bastante pelos, além de bordas recortadas. As raquetes são, em sua maioria, de tamanho médio à grande (LOPES; VASCONCELOS, 2012), variando entre 26 x 21 cm e 47 x 34 cm de comprimento e largura, respectivamente. Seu peso varia entre 0,6 kg a 1,5 kg, com número médio de 15 raquetes planta⁻¹, um ano após o plantio. Possui espinhos, característica indesejável para a alimentação dos animais, pois dificulta o manejo. Entretanto, os espinhos auxiliam na redução da temperatura do caule durante o dia e assim, aumenta a tolerância à seca (NEVES et al., 2010). Além disso, conforme Dubeux Júnior et al. (2019), a presença de espinhos em Orelha de Elefante Mexicana é uma estrutura física de proteção e pode ser um dos motivos de sua resistência em áreas de super pastejo, onde a palma forrageira não sobreviveria.

Características edafoclimáticas podem influenciar na composição química dos genótipos. Silva (2017) em Arcoverde-PE, encontrou composição química do genótipo Miúda em g/kg de MS, 196 de MS, 33,8 de PB, 246 de FDN e 133,4 de FDA, enquanto que para o genótipo da Orelha de Elefante Mexicana, a composição química encontrada foi, em g/kg de MS, 218 de MS, 60 de PB, 262 de FDN e 118,3 de FDA.

Estudos realizados por Silva et al. (2018) e Monteiro et al. (2018) observaram a possibilidade de substituir a palma Miúda pela Orelha de Elefante Mexicana na dieta de vacas leiteiras, sem haver efeito na produção de leite diária dos animais, tanto com 3,5% quanto com 4% de gordura.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGEGNEHU, G.; AMEDE, T. Integrated soil fertility and plant nutrient management in tropical agro-ecosystems: A review. **Pedosphere**, v.27, n.4, p.662-680, 2017.
- AGUIAR JÚNIOR, R. A. et al. Relação entre produção de biomassa e biometria de *Gliricídia* (*Gliricidia sepium* (Jacq.)). **Cadernos de Agroecologia**, v.6, n.2, p.1-5, 2011.
- AMMAR, I.; ENNOURI, M.; ATTIA, H. Phenolic content and antioxidant activity of cactus (*Opuntia ficus-indica* L.) flowers are modified according to the extraction method. **Industrial Crops and Products**, v.64, p.97-104, 2015.
- APOLINÁRIO, V. X. O. et al. Decomposition of Arboreal Legume Fractions in a Silvopastoral System. **Crop Science**, v.56, n.3, p.1356-1363, 2016.
- APOLINÁRIO, V. X. O. et al. Tree legumes provide marketable wood and add nitrogen in warmclimate silvopasture systems. **Agronomy Journal**, v.107, n.5, p.1915-1921, 2015.
- ARAÚJO, J. A.; SOUZA, R. F. Abordagens sobre o processo de desertificação: uma revisão das evidências no Rio Grande do Norte. **Geosul**, v.32, n.65, p.122-143, 2017.
- ARAÚJO-JUNIOR, C. F. et al. The role of weed and cover crops on soil and water conservation in a tropical region. In: **Weed biology and control**. Rijeka Croatia, In Tech Publisher, p.1-18, 2015.
- AZANI, N. et al. A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny: The Legume Phylogeny Working Group (LPWG). **Taxon**, v.66, p.44-77, 2017.
- BALSAN, R. Impactos decorrentes da modernização da agricultura brasileira. **Campo-Território: Revista de Geografia Agrária**, v.1, n.2, p.123-151, 2006.
- BARROS, G. S. C. Medindo o crescimento do agronegócio: bonança externa e preços relativos. In: VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. **Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade**. Brasília: IPEA, 2016. p.219-249.
- BENDER, S. F. et al. Symbiotic relationships between soil fungi and plants reduce N₂O emissions from soil. **The ISME Journal**, v.8, p.1336-1345, 2014.
- BERRUTI, A. et al. Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Natural Biofertilizers: Let's Benefit from Past Successes. **Frontiers in Microbiology**, v.6, 2016.

BLANKINSHIP, J. C. et al. Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem. **Geoderma**, v.272, p.39-50, 2016.

BOBICH, E. G.; NORTH, G. B. Structural implication of succulence: Architecture, anatomy, and mechanics of photosynthetic stem succulents, pachycauls, and leaf succulents. In: BARRERA, E.; SMITH, W. K. (Ed.). **Perspectives in biophysical plant ecophysiology – A tribute to Park S. Nobel**. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. Ciudad Universitaria, México, p.3-38, 2009.

BOGIANI, J.C.; FERREIRA, A. C. de B. Plantas de cobertura no sistema soja-milho-algodão no Cerrado. **Informações Agronômicas**, n.160, p.1-14, 2017.

BOSSUYT, H.; SIX, J.; HENDRIX, P. F. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts. **Soil Biology and Biochemistry**, v.37, n.2, p.251-258, 2005.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. **Resolução nº 107/2017**. Estabelece critérios técnicos e científicos para delimitação do Semiárido Brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência. Recife, 2017. Disponível em: <http://sudene.gov.br/images/2017/arquivos/Resolucao-107-2017.pdf>. Acesso em: 26 out. 2021.

BRAVO FILHO, E. S. et al. Levantamento etnobotânico da família Cactaceae no estado de Sergipe, **Revista Fitos Eletrônica**, v.12, n.1, p.41-53, 2018.

BRUNDRETT, M. C.; TEDERSOO, L. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. **New Phytologist**, v.220, p.1108–1115, 2018.

CAMARENA-POZOS, D. A. et al. Fungal volatiles emitted by members of the microbiome of desert plants are diverse and capable of promoting plant growth. **Environmental Microbiology**, v.23, n.4, p.2215-2229, 2021.

CAVALCANTE, L. A. D. et al. Respostas de genótipos de palma forrageira a diferentes densidades de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.44, n.4, p.424-433, 2014.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Desertificação, degradação da terra e secas no Brasil**. Brasília. 2016. 252 p.

CHANG, J. et al. The greenhouse gas balance of European grasslands. **Global Change Biology**, v.21, p.3748-3761, 2015.

CHEN, B. et al. Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.34, p.429-442. 2014.

CONANT, R. T. et al. Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. **Ecological Applications**, v.27, p.662-668, 2016.

COSTA, R. G. et al. Effects of replacing corn with cactus pear (*Opuntia ficus indica* Mill) on the performance of Santa Inês lambs. **Small Ruminant Research**, v.102, n.1, p.13-17, 2012.

COSTA, S. B. M. et al. Livestock performance in warm-climate silvopastures using tree legumes. **Agronomy Journal**, v.108, n.5, p.2026-2035, 2016.

DAVIES, J. The business case for soil. **Nature**, v.543, n.7645, p.309-311, 2017.

DELGADO, J. A.; FOLLETT, R. F. Advances in Nitrogen Management for Water Quality. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.66, n.1, p.25A-26A., 2010.

DESSIMONI, G. V. et al. Composição bromatológica, mineral e fatores antinutricionais da palma forrageira. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v.8 n.3, p.51-55, 2014.

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de Pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação**. 4ª ed. com correções e revisão. Belém, PA: Ed. do Autor, 2015. 215 pgs.

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. 36 pgs.

DOMICIANO, L. F. et al. Performance and behaviour of Nellore steers on integrated systems. **Animal Production Science**, v.58, p.920-929, 2018.

DUBEUX JR., J. C. B. et al. Forage production and supply for animal nutrition. In: INGLESE, P.; MONDRAGON, C.; NEFZAOU, A.; SAENZ, C. (Eds). **Crop ecology, cultivation and uses of cactus pear**. Proceedings of IX International congress on cactus pear and cochineal CAM crops for a hotter and drier World, Coquimbo, Chile, p.73-92, 2017.

DUBEUX JÚNIOR, J. C. B. et al. Nutritive value of raketamena (*Opuntia stricta*) as a fodder in Madagascar. **Acta Horticulturae**, v.1247, p.73-80, 2019.

DUBEUX Jr., J. C. B. et al. Tree legumes: an underexploited resource in warm-climate silvopastures. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.46, n.8, p.689-703, 2017.

DUBEUX, J. C. B., Jr.; MUIR, J. P.; NAIR, P. K. R.; SOLLENBERGER, L. E.; SILVA, H. M. S.; MELLO, A. C. L. **The advantages and challenges of integrating tree legumes into pastoral systems**. p.141-164. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FORAGES IN WARM CLIMATES, Lavras, Brazil. EVANGELISTA, A. R.; AVILA, C. L. S.; CASAGRANDE, D. R.; LARA, M. A. S.; BERNARDES, T. F. (eds) UFLA, Lavras, 2015.

DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; SANTOS, M. V. F. **Exigências nutricionais da palma forrageira**. In: MENEZES, R. S. C.; SIMÕES, D. A.; SAMPAIO, E. V. S. B. A Palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso. 2ª ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2005, p.105-127.

DUBROVSKY, J. G.; NORTH, G. B.; NOBEL, P. S. Root growth, developmental changes in the Apex, and hydraulic conductivity for *Opuntia ficus-indica* during drought. **New Phytologist**, v.138. p.75-82, 1998.

EDENHOFER, O. et al. 2014. IPCC, 2014: **Climate Change 2014**: Mitigation of climate change. In: Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. Brasília: 2018. Disponível em: <http://www.embrapa.br/visao/o-futuro-da-agricultura-brasileira>. Acesso em: 10 mar. 2020.

ERB, K. H. et al. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. **Nature**, v.553, p.73-76, 2018.

FALLAH, M.; KAVIAN, A.; OMIDVAR, E. Watershed prioritization in order to implement soil and water conservation practices. **Environmental Earth Sciences**, v.75, n.18, p.1248-1265, 2016.

FANINDI, A. Respon Fisiologis Rumput *Brachiaria* sp pada Lahan Masam. **Wartazoa**, v.26, n.3, p.143-150, 2016.

FAO - Food and agriculture Organization of the United Nations. **FAO no Brasil**. 2021. Disponível em: <http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1401429/>. Acesso em: 02 nov. 2021.

FAO - Food and agriculture Organization of the United Nations. **Sustainable Food and Agriculture**. 2020. Disponível em: <http://fao.org/sustainability/news/detail/en/c/1274219/>. Acesso em: 04 mai. 2021.

FAO and ITPS - Food and agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on soils. **Status of the world's soil resources (SWSR) – main report**. Rome, Italy, 2015. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2020.

FIELD, K. J.; PRESSEL, S. Unity in diversity: structural and functional insights into the ancient partnerships between plants and fungi. **New Phytologist**, v.220, p.996-1011, 2018.

FIGUEIREDO, E. B. de. et al. Soil CO₂-C emissions and correlations with soil properties in degraded and managed pastures in southern Brazil. **Land Degradation & Development**, v.28, n.4, p.1263-1273, 2016.

FLORENTINO, L. A. et al. Diversidade e potencial de utilização dos rizóbios isolados de nódulos de *Gliricidia sepium*. **Revista de Ciências Agrárias**, v.37, n.3, p.320-338, 2014.

FOLLETT, R. F.; REED, D. A. Soil carbon sequestration in grazing lands: societal benefits and policy implications. **Rangeland, Ecology and Management**, v.63, p.4-15, 2010.

FONTANA, A. et al. Características e atributos de Latossolos sob diferentes usos na região Oeste do Estado da Bahia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1457-1465, 2016.

FRANCO, A. A.; FARIA, S. M. The contribution of N₂-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. **Soil Biology and Biochemistry**, v.29, n.5-6, p.897-903, 1997.

GALLOWAY, J. N. et al. The nitrogen cascade. **BioScience**, v.53, n.4, p. 341-356, 2003.

GAO, H. et al. Transfer behavior of odorous pollutants in wastewater sludge system under typical chemical conditioning processes for dewaterability enhancement. **Scientific Reports**, v.7, n.3417, 2017.

GHIMIRE, S. R.; NJARUI, D.; MUTIMURA, M.; CARDOSO, J.A.; JOHNSON, L.; GICHANGI, E.; TEASDALE, S.; ODOKONYERO, K.; CARADUS, J. R.; RAO, I. M.; DJIKENG, A. **Climate-smart *Brachiaria* for improving livestock production in East Africa: Emerging opportunities**. In: VIJAY, D; SRIVASTAVA, M. K.; GUPTA, C. K.; MALAVIYA, D. R.; ROY, M. M.; MAHANTA, S. K.; SINGH, J. B.; MAITY, A.; GHOSH, P. K. (Eds.). Proceedings of the XXIII International Grassland Congress, New Delhi, India, 20-24 November 2015. p. 361-370, 2015.

GIMENES, F. M. A. et al. The utilization of tropical legumes to provide nitrogen to pastures: A review. **African Journal of Agricultural Research**. v.12, n.2, p.85-92, 2017.

GOMES da SILVA, I. A. et al. Tree legume enhance livestock performance in silvopasture system. **Agronomy Journal**, v.113, p.358-369, 2021.

GÓMEZ, S. et al. Growth, leaf photosynthesis and canopy light use efficiency under differing irradiance and soil N supplies in the forage grass *Brachiaria decumbens* Stapf. **Grass and Forage Science**, v.68, n.3, p.395-407, 2012.

HAMMERBACHER, A.; COUTINHO, T. A.; GERSHENZON, J. Roles of plant volatiles in defence against microbial pathogens and microbial exploitation of volatiles. **Plant, Cell & Environment**, v.42, p.2827-2843, 2019.

HARTZELL, S.; BARTLETT, M. S.; PORPORATO, A. Unified representation of the C3, C4 and CAM photosynthetic pathways with the Photo3 model. **Ecological Modelling**, v.384, p.173-187, 2018.

HAYES, M. H. B.; SWIFT, R. S. The chemistry of soil organic colloids. In: GREENLAND, D. J.; HAYES, M. H. B. (Ed.). **The chemistry of soil constituents**. Chichester: Wiley, 1978. p.179-320.

HLPE (High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition). 2020. **Food Security and Nutrition: Building A Global Narrative Towards 2030**. Report #15. High Level Panel of Experts (HLPE), Committee on World Food Security. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ca9731en/ca9731en.pdf>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Resultados preliminares produção de palma forrageira no Brasil**. Disponível em: http://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/ce_nso_agro/resultadosagro/agricultura.html?localidade=76582. Acesso em: 02 abr. 2020.

INGLESE, P. et al. **Ecophysiology and reproductive biology of cultivated cacti**. In: Food and agriculture organization of the United Nations 2017. Crop ecology, cultivation and uses of cactus pear. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas Rome, p. 29-39, 2017.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Global warming of 1.5°C. Summary for Policy Makers. Switzerland**: World Meteorological Organization, United Nations Environment Program, and Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.

JALONEN, R.; NYGREN, P.; SIERRA, J. Transfer of nitrogen from a tropical legume tree to an associated fodder grass via root exudation and common mycelial networks. **Plant, Cell & Environment**, v.32, p.1366-1376, 2009.

JONES M. B.; DONNELLY, A. Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO₂. **New Phytologist**, v.164, p.423-439, 2004.

LAL, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology**, v.24, n.8, p.3285-3301, 2018.

LAL, R. et al. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.73, n.6, p.145A-152A, 2018.

LIGUORI, G. et al. CO₂ uptake of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. whole tress and single cladodes, in relation to plant water status and cladode age. **Italian Journal of Agronomy**, v.8, n.1, p.14-20, 2013.

LÖBMANN, M. T. et al. The occurrence of pathogen suppressive soils in Sweden in relation to soil biota, soil properties, and farming practices. **Applied Soil Ecology**, v.107, p.57-65, 2016.

LORENZ, K.; LAL, R. **Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems**. Springer International Publishing, 2018. 392 pgs.

LOPES, E. B.; VASCONCELOS, M. F. de. Zoneamento agrícola de risco climático para a cultura da palma forrageira no estado da Paraíba. In: LOPES, E.B. (Org.) **Palma Forrageira: cultivo, uso atual e perspectivas de utilização no Semiárido nordestino**. João Pessoa: EMEPA-PB, 2012, p.169-201.

LOW, S. G. Signal grass (*Brachiaria decumbens*) toxicity in grazing ruminants. **Agriculture**, v.5, n.4, p.971-990, 2015.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília: 2015. Disponível em: http://bbeletronica.cpac.embrapa.br/2015/livros/cordeiro_01.pdf. Acesso em: 24 mar. 2020.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio: Brasil 2017/18 a 2027/28 projeções de longo prazo**/Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Política Agrícola. Brasília: MAPA/ACE, 2018. p.112.

MARQUES, O. F. C. et al. Palma forrageira: cultivo e utilização na alimentação de bovinos. **Caderno de Ciências Agrárias**, v.9, n.1, p.75-93, 2017.

MARTINS, C. M. et al. Atributos químicos e microbianos do solo de áreas em processo de desertificação no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.6, p.1883-1890, 2010.

MONTANARELLA, L. et al. World's soils are under threat. **Soil**, v.2, p.79-82, 2016.

MONTEIRO, C. C. F. et al. A new cactus variety for dairy cows in areas infested with *Dactylopius opuntiae*. **Animal Production Science**, v.59, n.3, p.479-485, 2018.

MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F.; SÁ, I. I. S. **Zoneamento agroclimático da palma forrageira para o Estado de Pernambuco**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. p.26 (Embrapa Semiárido. Documentos, 242). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/916061>. Acesso em: 20 dez 2021.

MRE - Ministério das Relações Exteriores. **Contribuição apresentada pelo Brasil às Nações Unidas (INDC) para o acordo sobre mudança do clima que será adotado na Conferência de Paris (COP-21) – 27 de setembro de 2015**. Disponível em: <http://www.Itamaraty.gov.br/pt-BR/ficha-pais/11915-contribuicao-brasil-indc-27-de-setembro>. Acesso em: 10 jul. 2020.

NANZER, M. C. et al. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.18, n.1, p.1-10, 2019.

NETO, J. P. et al. Balanço hídrico e excreção renal de metabólitos em ovinos alimentados com palma forrageira (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck), **Revista Pesquisa Veterinária Brasileira**, v.36, n.4, p.322-328, 2016.

NEVES, A. L. A.; PEREIRA, L. G. R.; SANTOS, R. D. dos; VOLTOLINI, T. V.; ARAUJO, G. G. L. de; MORAES, S. A. de; ARAGÃO, A. S. L. de; COSTA, C. T. F. **Plantio e uso da palma forrageira na alimentação de bovinos leiteiros no semiárido brasileiro**. Juiz de Fora, MG: Embrapa Gado Leiteiro, 2010. p.7 (Comunicado Técnico, 62).

NOBEL, P. S.; CAVELIER, J.; ANDRADE, J. L. Mucilage in cacti: its apoplastic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. **Journal of Experimental Botany**, v.43, p.641-648, 1992.

NÓBREGA, C. C. et al. Artificial pruning of forest tree species in response to cultivation method. **BIOFIX Scientific Journal**, v.4, n.2, p.124-129, 2019.

OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, v.56, p.377-400, 1993.

OLIVEIRA, O. F. de. et al. *Mimosa caesalpinifolia* Benth: an important legume in Brazil semiarid. **The journal of the International Legume Society**, v.1, n.17, p.18-19, 2019.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular en África**. 1994. Disponível em: <http://www.unccd.int/en/About-the-convention/Pages/About-the-Convention.aspx>. Acesso em: 08 abr. 2021.

PACIULLO, D. S. C.; PIRES, M. F. A.; MÜLLER, M. D. Oportunidades e desafios dos sistemas integrados na produção animal: ênfase nos sistemas silvipastoris. **Archivos Latinoamericanos de Producción Animal**, v.25, n.1-2, p.25-35, 2017.

PACIULLO, D. S. C. et al. Sward characteristics and performance of dairy cows in organic grass–legume pastures shaded by tropical trees. **Animal**, v.8, n.8, p.1264-1271, 2014.

PADILHA JUNIOR, M. C. et al. Características morfológicas e rendimento da palma forrageira ‘Gigante’ sob diferentes adubações e configurações de plantio. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.11, n.1, p.67-72, 2016.

PARDON, P. et al. Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.247, p.98-111, 2017.

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Base científica das mudanças climáticas**. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014, 464 p.

PEIXOTO, M. J. A. et al. Características agronômicas e composição química da palma forrageira em função de diferentes sistemas de plantio. **Archivos de Zootecnia**, v.67, n.257, p.35-39, 2018.

PEREIRA, S. L. et al. **Palma-forrageira**: opção e potencialidades para alimentação animal e humana em propriedades rurais do Estado do Espírito Santo. Vitória: Incaper, 2020. p.52 (Incaper. Documentos, 276).

PERSONENI, E.; LOISEAU, P. Species strategy and N fluxes in grassland soil—a question of root litter quality or rhizosphere activity? **European Journal of Agronomy**, v.22, p.217-229, 2005.

PIVA, J.T. **Fluxo de gases de efeito estufa e estoque de carbono do solo em sistemas integrados de produção no sub trópico brasileiro**. 2012. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós Graduação em Produção Vegetal. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

RIBEIRO, M. R.; SAMPAIO, E. V. S. B.; GALINDO, I. C. L. Os solos e o processo de desertificação no semi-árido brasileiro. In: RIBEIRO, M. R.; NASCIMENTO, C. W. A. do; RIBEIRO FILHO, M. R.; CANTALICE, J. R. B. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v.6, p.413-459.

SÁ, F. A. et al. Fenação de leguminosas tropicais como alternativa para aumentar a segurança alimentar do rebanho. **Revista Electrónica de Veterinaria**, v.18, p.1-15, 2017.

SADEGHPOUR, A. et al. Forage yield, quality and economic benefit of intercropped barley and annual medic in semiarid conditions: Additive series. **Field Crops Research**, v.148, p.43-48, 2013.

SAHIN, H. et al. Water infiltration and soil water content in claypan soils influenced by agroforestry and grass buffers compared to row crop management. **Agroforestry Systems**, v.90, p.839-860, 2016.

SANTOS, A. M.; GALVÍNCIO, J. D. Mudanças climáticas e cenário de susceptibilidade ambiental à desertificação em municípios do estado de Pernambuco. **Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia**, v.5, n.13, p.66-83, 2013.

SANTOS, D. C.; SILVA, M. C.; ALVES, F. A. L.; FREITAS, E. V. Botânica e cultivares. In: DONATO, S. L. R.; RODRIGUES, M. G. V. **Palma Forrageira do plantio à colheita**. 22^a ed. Belo Horizonte: EPAMIG, 2020, v.01, cap.2, p.21-41.

SANTOS, H. G. dos. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed., rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 pgs.

SARTORI, M. et al. A linkage between the biophysical and the economic: Assessing the global market impacts of soil erosion. **Land Use Policy**, v.86, p.299-312, 2019.

SAWANA, A.; ADEOLU, M.; GUPTA, R. S. Molecular signatures and phylogenomic analysis of the genus *Burkholderia*: proposal for division of this genus into the emended genus *Burkholderia* containing pathogenic organisms and a new genus *Paraburkholderia* gen. nov. harboring environmental species. **Frontiers in Genetics**, v.5, p.1-22, 2014.

SCHARLEMANN, J. P. et al. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. **Carbon Management**, v.5, n.1, p.81-91, 2014.

SCHLESINGER, W. On the fate of anthropogenic nitrogen. **Proceedings of the National Academy of Science**, v.106, n.1, p.203-208, 2009.

SEJIAN, C.; NAQVI, S. M. K.; EZEJI, T.; LAKRITZ, J.; LAL, R. (Eds). **Environmental stress and amelioration in livestock production**. Springer-Verlag, Berlin, 2012.

SILVA, E. T. D. S. et al. 'Acceptability by Girolando heifers and nutritional value of erect prickly pear stored for different periods', **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, n.9, p.761-767, 2017.

SILVA, M. J. S. et al. Influence of the period of year on the chemical composition and digestibility of pasture and fodder selected by goats in caatinga. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.18, n. 3, p. 402-416, 2017.

SILVA, R.C. **Substituição de palma Miúda por palma Orelha de Elefante Mexicana para vacas mestiças em lactação**. 2017. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Programa de Pós-graduação em Zootecnia. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SILVA, R. C. et al. Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* [Haw.] Haw.) spineless cactus as an option in crossbred dairy cattle diet. **South African Journal of Animal Science**, v.48, n.3, p.516-525, 2018.

SILVA, R. O. et al. Sustainable intensification of Brazilian livestock production through optimized pasture restoration. **Agricultural Systems**, v.153, p.201-211, 2017.

SILVA, T. G. F. et al. Crescimento e produtividade de clones de palma forrageira no semiárido e relações com variáveis meteorológicas. **Revista Caatinga**, v.28, n.2, p.10-18, 2015.

SIMON, M. F. et al. The evolutionary history of *Mimosa* (Leguminosae): Toward a phylogeny of the sensitive plants. **American Journal of Botany**, v.98, n.7, p.1201-1221, 2011.

SIQUEIRA, M. C. B. et al. Optimizing the use of spineless cactus in the diets of cattle: Total and partial digestibility, fiber dynamics and ruminal parameters. **Animal Feed Science and Technology**, v.226, p.56- 64, 2017.

SOLLENBERGER, L. E. et al. Grassland management affects delivery of regulating and supporting ecosystem services. **Crop Science**, v.19, p.1-19, 2019.

SOUSSANA, J. F.; TALLEC, T.; BLANFORT, V. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. **Animal**, v. 4, n.3, p. 334-350, 2010.

SOUZA, E. D. et al. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.79-88, 2010.

SOUZA, T. C. de. et al. Productivity and nutrient concentration in spineless cactus under different fertilizations and plant densities. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.12, n.4, p.555-560, 2017.

STEFFEN, W. et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Science**, v.347, n.6223, 2015.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 pgs.

TIAN, H. et al. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. **Nature**, v.586, p.248-271, 2020.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **European Journal of Soil Science**, v.33, n.2, p.141-163, 1982.

TROPICOS. **Missouri Botanical Garden**. 2020. Disponível em: <http://www.tropicos.org>>. Acesso em: 04 dez. 2020.

UNCCD. **Climate change and desertification: anticipating, assessing & adapting to future change in drylands**. Impulse report for the 3^o UNCCD Scientific conference. [Mark, S and Lindsay C.S (eds)]. UNCCD, Agropolis International, Cancún, Mexico, 2015. 140p.

UWIZEYE, A. et al. Nitrogen emissions along global livestock supply chains. **Nature Food**, v.1, p.437-446, 2020.

VANDERMEULEN, S. et al. Agroforestry for ruminants: a review of trees and shrubs as fodder in silvopastoral temperate and tropical production systems. **Animal Production Science**, v.58, p.767-777, 2018.

VIAN, C. E. F. **Qual o papel das certificações na agropecuária e na agroindústria?** 2017. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opiniao-cepea/qual-o-papel-das-certificacoes-na-agropecuaria-e-na-agroindustria.aspx>. Acesso em: 12 mar. 2021.

VIDIELLA, B.; SARDANYÉS, J.; SOLÉ, R. V. Synthetic soil crust against green-desert transitions: a spatial model. **Royal Society Open Science**, v.7, n.8, 2020.

VLOT, A. C. et al. Systemic propagation of immunity in plants. **New Phytologist**, v.229, p.1234-125, 2020.

VRANOVA, V.; REJSEK, K.; FORMANEK, P. Proteolytic activity in soil: A review. **Applied Soil Ecology**, v.70, p.23-32, 2013.

WANG, M. et al. The great Atlantic *Sargassum* belt. **Science**, v.365, n.6448, p.83-87, 2019.

WEIDNER, S. et al. Bacterial diversity amplifies nutrient-based plant-soil feedbacks. **Functional Ecology**, v.29, n.10, p.1341-1349, 2015.

WEIL, R. R.; BRADY, N. C. **The Nature and Properties of Soils**. England: Pearson Education Limited, 2017. 1105 pgs.

WESP, C. L. et al. Steers production in integrated crop-livestock systems: pasture management under different sward Heights. **Revista Ciência Agronômica**, v.47, n.1, p.187-194, 2016.

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, p.149-162, 2019.

WMO - World Meteorological Organization. **The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2017**. 2018 (Greenhouse Gas Bulletin 8).

WURZBURGUER, N.; HEDIN, L. O. Taxonomic identity determines N₂ fixation by canopy trees across lowland tropical forests. **Ecology Letters**, v.19, p.62-70, 2016.

XIAO, H. et al. Soil erosion-related dynamics of soil bacterial communities and microbial respiration. **Applied Soil Ecology**, v.119, p.205- 213, 2017.

ZAPPI, D.; TAYLOR, N.; SANTOS, M. R.; LAROCCA, J. *Cactaceae* in **Lista de Espécies da Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB70>. Acesso em: 02 fev. 2021.

ZHANG, X. et al. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain. **Catena**, v.156, p.176-183, 2017.

CAPÍTULO I

**Atributos do solo e do sistema radicular em sistemas silvipastoris na Zona da Mata
Norte de Pernambuco, Brasil**

Atributos do solo e do sistema radicular em sistemas silvipastoris na Zona da Mata Norte de Pernambuco, Brasil

RESUMO

Sistemas silvipastoris (SSPs) apresentam grande potencial de benefícios econômicos e ambientais para os produtores e à sociedade em geral, são sistemas multifuncionais, em que existe a possibilidade de intensificar a produção pelo manejo integrado dos recursos naturais. Objetivou-se avaliar atributos do solo e do sistema radicular em SSPs na Zona da Mata Norte de Pernambuco, Brasil. O experimento foi instalado em abril de 2011 na Estação Experimental de Itambé do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA). Os tratamentos experimentais consistiram em: i) pastagens consorciadas de *Urochloa decumbens* (Stapf) R. D. Webster (braquiária) + *Mimosa caesalpinifolia* Benth. (sabiá) e ii) braquiária + [*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.] (gliricídia), em delineamento experimental casualizado em blocos, com três repetições. Foram coletadas amostras de solos em duas distâncias das leguminosas, sendo a 0 m de distância das fileiras duplas das leguminosas (NL) e a 8 m de distância das fileiras duplas das leguminosas (EL), no mês de outubro de 2019, para análises de estoque de raízes; físicas do solo, incluindo densidade do solo (Ds), diâmetro médio ponderado (DMP) e geométrico (DMG) do solo; químicas do solo, a partir de potencial hidrogeniônico (pH), fósforo disponível (P), íons cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), alumínio (Al^{3+}) e hidrogênio (H^+) nas profundidades 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 e 100-120 cm; fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS) nas profundidades 0-20 e 20-40 cm e do teor de carbono (C-BMS) e nitrogênio (N-BMS) da biomassa microbiana do solo na profundidade 0-20 cm. Foram verificados efeitos de sítio de amostragem e de profundidade de solos sobre a densidade do solo (Ds) ($p < 0,05$) e os valores médios da Ds em todas as profundidades edáficas, caracterizaram os solos como não compactados. Maiores valores de estoques de raízes foram encontrados no sítio de amostragem na linha (NL) em todas as profundidades edáficas ($p < 0,05$). Valores médios de DMP variaram de 3,18 a 3,06 mm nos tratamentos B+G e B+S, respectivamente, sendo bem superiores ao limite mínimo crítico de 0,5 mm. O estoque de raízes ao longo do perfil edáfico (0-120 cm), sendo 22,96 t ha⁻¹ NL e 11,97 t ha⁻¹ EL no tratamento B+G e 22,61 t ha⁻¹ NL e 11,06 t ha⁻¹ EL no tratamento B+S ressalta a importância da gramínea e das leguminosas forrageiras para benefícios de atributos edáficos em SSPs.

Palavras-chave: forrageiras, *Gliricidia sepium*, massa seca de raízes, *Mimosa caesalpinifolia*, sustentabilidade.

Soil and root system attributes in silvopastoral systems in the North Forest Zone of Pernambuco, Brazil

ABSTRACT

Silvopastoral systems (SPSs) have great potential for economic and environmental benefits for producers and society in general. They are multifunctional systems, in which there is the possibility of intensifying production through the integrated management of natural resources. The objective was to evaluate soil and root system attributes in SPSs in the North Forest Zone of Pernambuco State, Brazil. The experiment was installed in April 2011 at the Itambé Experimental Station of Agronomic Institute of Pernambuco (IPA). The experimental treatments consisted of i) intercropped pastures *Urochloa decumbens* (Stapf) R. D. Webster (braquiária) + *Mimosa caesalpinifolia* Benth. (sabiá) and ii) braquiária + [*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.] (gliricídia) in a randomized complete block design, with three replications. Soil samples were collected at two distances from the legumes, being 0 m away from the double rows of legumes (WR) and 8 m away from the double rows of legumes (BR), in the month of October 2019 to analysis of root stock; soil physics such as soil bulk density (BD), weighted mean diameter (WMD) and geometric (WMG) of soils; chemical analyzes included pH, available phosphorus (P), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), aluminum (Al^{3+}) and hydrogen (H^+) at 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 and 100-120 cm depths; physical fractionation of soil organic matter (SOM) at 0-20 and 20-40 cm depth and soil microbial biomass carbon (SMBC) and nitrogen (SMBN) content at 0-20 cm depth. Effects of sampling site and soil depth on soil bulk density (BD) were verified ($p < 0.05$) and the average values of soil BD in all edaphic depths, characterized the soils as not compacted. Greater root stocks values were found at the sampling site WR in all edaphic depths ($p < 0.05$). Mean values of WMD between the experimental treatments ranged from 3.18 to 3.06 mm in B+G and B+S treatments, respectively, being well above the critical minimum limit of 0.5 mm. The root stock along the edaphic profile (0-120 cm), being 22.96 t ha⁻¹ WR and 11.97 t ha⁻¹ BR in treatment B+G and 22.61 t ha⁻¹ WR and 11.06 t ha⁻¹ BR in treatment B+S highlights the importance of grass and forage legumes for the benefits of edaphic attributes in SPSs.

Keywords: forages, *Gliricidia sepium*, roots dry mass, *Mimosa caesalpinifolia*, sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Nos sistemas de produção de gado, a sustentabilidade pode ser alcançada por meio do uso de técnicas agrícolas que integram componentes distintos como o cultivo de árvores e forragem e a produção de animais, caracterizando um sistema silvipastoril (SSP) (BOSI et al., 2014; LOPES et al., 2017).

E a utilização da leguminosa gliricídia [*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.], nesses sistemas, permite uma boa adaptação da pecuária através da palatabilidade da forragem, e essa leguminosa pode produzir serapilheira com menos compostos fenólicos que incorpora C ao solo, mais rapidamente, por meio da decomposição microbiana (de SÁ et al., 2017). Já o uso da leguminosa sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.) tem sido bem aceita pelos agricultores para melhorar a economia local com seu suprimento de madeira comercializável e também promove áreas amplas de sombreamento, levando a uma melhor distribuição do gado ao redor da pastagem, o que fornece diferentes caminhos para o N entrar no solo (CUBILLOS et al., 2016).

Leguminosas arbóreas possuem sistema radicular profundo e desenvolvido e apresentam potencial de aumentar a atividade microbiana em camadas mais profundas do solo. E como as raízes das espécies mistas interagem diretamente, a distribuição das raízes é fator essencial que afeta a absorção de água e nutrientes pelas plantas e também determina a magnitude da competição subterrânea nesses sistemas (ZHANG et al., 2014).

Os indicadores de qualidade do solo podem representar propriedades físicas, químicas ou biológicas associadas aos diferentes processos que ali ocorrem, tais como ciclagem de nutrientes, potencial de erosão e atividade biológica. Textura, porosidade, densidade e estabilidade de agregados são propriedades físicas mais usadas como indicadores de solo (OLIVEIRA SILVA et al., 2020).

Para a avaliação da estabilidade dos agregados, por exemplo, são levados em consideração variáveis como o diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG). O maior DMP ocorre em função da maior porcentagem de agregados grandes. Já o DMG relaciona-se ao tamanho da classe de agregado que ocorre em maior porcentagem na amostra de solo (PEREIRA; THOMAZ, 2014). A agregação do solo contribui para o aumento do diâmetro do agregado e dos estoques de C e N no solo e minimiza as mudanças no ciclo do carbono que são influenciadas pela disponibilidade de nitrogênio do solo (ZHU et al., 2017), porque quanto maior a agregação, menor o fluxo de CO₂ do solo (ABDALLA et al., 2016).

Já os atributos microbiológicos comumente utilizados são aqueles que se relacionam com os ciclos biogeoquímicos ou indicam atividade microbiana no solo, tais como carbono da biomassa microbiana (C-BMS) e nitrogênio da biomassa microbiana (N-BMS) (ELEFTHERIADIS; TURRIÓN, 2014; ZHOU et al., 2017).

Por meio dos atributos do solo, é possível estabelecer a ocorrência de degradação ou melhoria da qualidade do solo (NICODEMO; BORGES; SOUZA, 2018). Dessa forma, o conhecimento desses atributos e a influência do manejo sobre estes é fator primordial para tomada de decisões para os sistemas produtivos de pastagem (FREITAS, et al., 2014). No entanto, a adoção do SSPs em várias partes de mundo, como na América Latina, ainda é limitada principalmente devido à escassez do acesso ao conhecimento técnico e capital financeiro (DING et al., 2017).

Diante desse contexto, a hipótese do trabalho foi que sistemas silvipastoris com utilização da gramínea *Urochloa decumbens* (Stapf) R. D. Webster consorciada com leguminosas forrageiras *Mimosa caesalpinifolia* Benth. ou [*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.] contribuem para benefícios de atributos do solo e do sistema radicular vegetal. E o objetivo do trabalho foi avaliar atributos do solo e do sistema radicular em sistemas silvipastoris na Zona da Mata Norte de Pernambuco.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição local e estabelecimento do experimento

As coletas de amostras de solos, no experimento de campo e em mata nativa remanescente, foram realizadas na Estação experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) (7°23'S, 35°10'L, 189 m de altitude), situada no município de Itambé-PE, na microrregião fisiográfica Zona da Mata Norte de Pernambuco, com médias pluviométricas > 1.000 mm e 25°C de temperatura anual média (RIMA, 2014), no mês de outubro de 2019.

A distribuição da precipitação pluviométrica total mensal no Município de Itambé-PE, em 2019 está expressa na Figura 1.

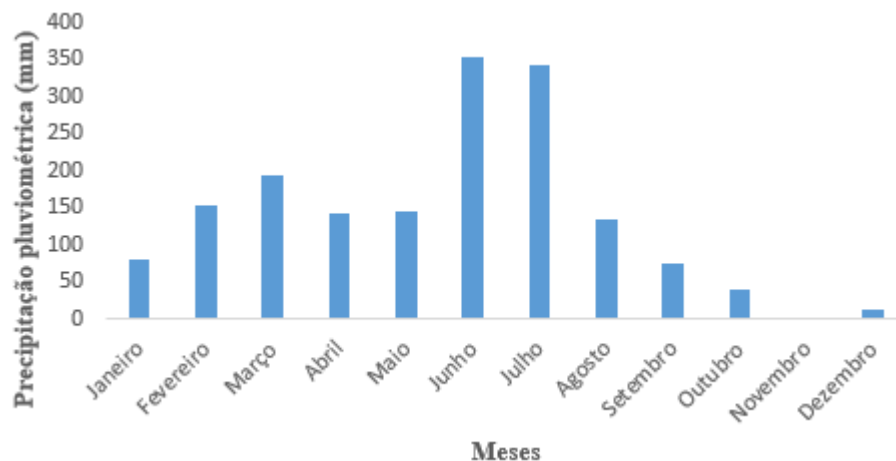


Figura 1. Precipitação pluviométrica (mm mês⁻¹) em Itambé-PE, no ano de coleta de amostras experimentais. Fonte: IPA (2021).

Os solos predominantes da área experimental são classificados como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico úmbrico, com horizonte A proeminente textura média/argilosa, relevo suave ondulado (SANTOS et al., 2018).

O experimento foi estabelecido em abril de 2011 e os tratamentos experimentais consistiram em: i) pastagens consorciadas de *Urochloa decumbens* (Stapf) R. D. Webster (braquiária) + *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. (sabiá) (B+S) e ii) braquiária + [*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.] (glicírdia) (B+G), em delineamento experimental casualizado em blocos, com três repetições.

As leguminosas foram implantadas por mudas em 14 fileiras duplas com espaçamento de 15,0 x 1,0 x 0,5 m, perfazendo, aproximadamente, uma população de 2.500 plantas ha⁻¹ (Figura 2) com plantio da gramínea nas faixas entre as fileiras duplas. Cada unidade

experimental consistiu em piquete de 1 ha (43,5 x 230,0 m), com bebedouro e sal mineral disponíveis.

As mudas das leguminosas foram produzidas na estação experimental de Itapirema, pertencente ao IPA, localizada no município de Goiana-PE. As sementes foram inoculadas com estirpes específicas de microorganismos do gênero *Bradyrhizobium*, obtidas junto ao laboratório de microbiologia do solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Na área da fila dupla, o herbicida (N-fosfometilglicina) foi usado para controle da vegetação pré-existente, nessas filas a braquiária foi pulverizada com o herbicida Glyphosate e foram aplicados 100 kg P₂O₅ ha⁻¹ de superfosfato simples e 120 kg K₂O ha⁻¹ de cloreto de potássio, de acordo com as recomendações da análise de solo. Durante o estabelecimento das mudas, as espécies daninhas foram controladas através de capinas manuais e as formigas *Atta* spp. (cortadeiras) usando formicida Mirex-S (8g de isca m⁻²). O plantio foi realizado em covas com 20 cm de profundidade, quando as mudas atingiram cerca de 30 cm de altura.

O plantio da braquiária ocorreu no final do período seco, onde foram feitas covas e em seguida colocadas as sementes, não fechando completamente as covas, nas faixas entre as fileiras duplas. Quando as leguminosas atingiram cerca de 1,5 m de altura, houve a introdução dos animais na área experimental.

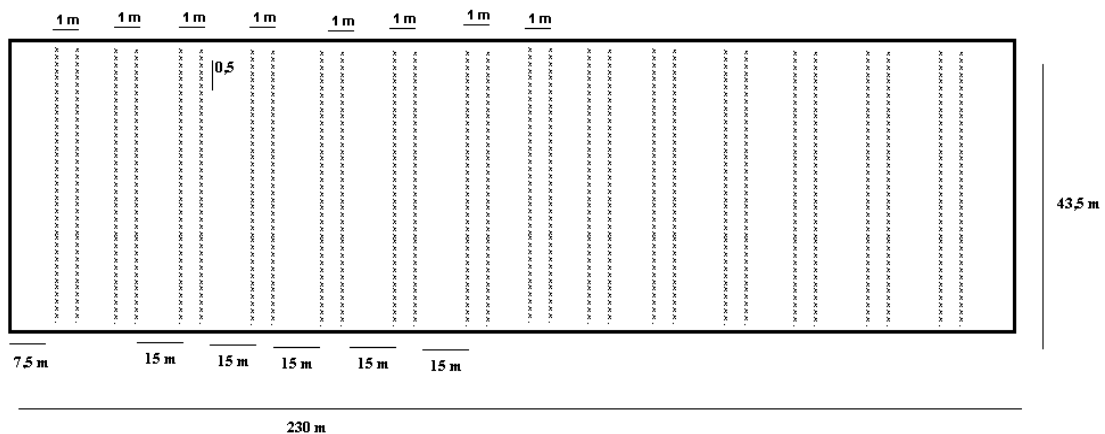


Figura 2. Detalhe da unidade experimental de leguminosas arbóreas consorciadas com *Urochloa decumbens*, Itambé-PE.

As pastagens foram manejadas com uso do método de lotação contínua com carga variável, conforme metodologia proposta por Mott e Lucas (1952) sendo utilizados bovinos machos mestiços, resultante do cruzamento das raças Holandês e Gir (Girolando), os quais entraram na área experimental com peso inicial de, aproximadamente, 175 kg de peso vivo.

Durante o período que antecedeu a entrada dos animais na área experimental, o rebanho foi submetido à pesagem e controle de endo e ectoparasitas.

O ajuste dos animais nos piquetes seguiu recomendações de Sollenberger et al. (2005), ajustando a oferta de forragem por meio da relação direta entre massa de forragem verde seca e o peso vivo dos animais. Desse modo, os animais testadores permaneceram na parcela pelo tempo necessário e, quando preciso, foi utilizado um número variável de animais reguladores para a manutenção da oferta de forragem em torno de 3kg de matéria seca verde por quilo de peso vivo animal (MSV/kg PV).

2. 2. Coleta e processamento de amostras

Em cada unidade experimental foram traçados três transectos representativos, cada um com dois sítios de amostragem, um no ponto central entre as leguminosas das fileiras duplas (0 m, isto é, na linha [NL]), e o outro no ponto central entre as fileiras duplas das leguminosas (8 m, ou seja, entre linhas [EL]) e na mata nativa foram levadas em consideração espécies arbóreas/arbustivas.

Para fins de análises físicas de densidade aparente e real do solo, composição granulométrica, argila natural e grau de floculação para caracterização da área experimental e da mata nativa, foram coletadas amostras nos sítios de amostragem e nas profundidades de solos de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 e 100-120 cm e confeccionadas amostras compostas de cada profundidade edáfica e bloco da área experimental e de cada profundidade e cada um de três locais representativos da mata nativa. Já para análises experimentais de estoque de raízes vegetais, densidade aparente do solo (Ds), caracterização dos agregados do solo e química do solo, fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS) e teor de carbono (C-BMS) e nitrogênio (N-BMS) da biomassa microbiana do solo, foram coletadas amostras nos sítios de amostragem e em cada profundidade edáfica (0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 e 100-120 cm para análises de estoque de raízes, Ds, caracterização dos agregados do solo e química do solo; 0-20 e 20-40 cm para fracionamento físico da MOS; e 0-20 cm para teor de C-BMS e N-BMS e elaboradas amostras compostas de cada sítio de amostragem, profundidade, tratamento e bloco experimental para as análises químicas do solo, fracionamento físico da MOS e de cada sítio de amostragem, tratamento e bloco experimental para teores de C-BMS e N-BMS.

Para análises de estoque de raízes vegetais e Ds, foram coletadas amostras com auxílio de amostrador com cilindro volumétrico acoplado, alocadas em recipientes adequados,

identificadas e encaminhadas ao Laboratório do IPA/Itambé. Para análises de caracterização dos agregados do solo, amostras foram coletadas, em torrões, com auxílio de trado “boca de lobo” e embaladas em papel plástico e plástico bolha, identificadas e transportadas para o Laboratório de Física do solo do Departamento de Agronomia (DEPA), UFRPE, Sede/Recife.

Enquanto que para análises físicas do solo para caracterização da área experimental e da mata nativa, química do solo, fracionamento físico da MOS e teor de C-BMS e N-BMS, foram coletadas amostras com trado “holandês”. Após as coletas, as amostras foram devidamente armazenadas, identificadas e encaminhadas ao IPA, Recife-PE, onde foram secas ao ar, destorroadas, homogeneizadas e processadas em peneiras com malha de crivo de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

As amostras direcionadas para análises físicas do solo (caracterização da área experimental e da mata nativa) foram encaminhadas para o Laboratório de Física do solo, enquanto que as utilizadas para análises químicas foram levadas ao Laboratório de Fertilidade do solo, ambos situados no IPA, Recife. Já as amostras utilizadas para fracionamento físico da MOS foram levadas ao Laboratório de Forragicultura Prof. Iderval Farias do Departamento de Zootecnia, UFRPE, Sede e as usadas para análises de teores de C-BMS e N-BMS, foram encaminhadas para o Laboratório de Microbiologia do solo, do DEPA, UFRPE, Sede.

2. 3. Análises laboratoriais

2. 3. 1. Análise nos sistemas radiculares vegetais

A partir da massa de solo com raízes e da densidade do solo nas diferentes profundidades, calculou-se o volume de solo coletado, permitindo, portanto, o cálculo das quantidades proporcionais de massa de raízes secas extraídas por volume de solo amostrado. As raízes foram separadas do solo pela lavagem com jato de água, em peneiras, segundo Böhm (1976), e levadas para secagem em estufa com circulação forçada de ar, a 70 °C até massa constante das amostras. Em seguida, as raízes foram separadas do solo, com auxílio de pinça e procedeu-se a pesagem em balança analítica, determinando-se a massa radicular seca. Em seguida, os valores foram convertidos em hectares ($t\ MS\ ha^{-1}$) utilizando a densidade aparente e a massa de solo coletada.

2. 3. 2. Análises físicas de solos

A composição granulométrica, argila natural e grau de flocculação, bem como a Ds, determinada pelo método da proveta (caracterização da área experimental) e também por meio do método do cilindro volumétrico, foram determinados segundo metodologia da EMBRAPA (2017).

A caracterização dos agregados do solo foi realizada por peneiramento via úmida (YODER, 1936). Os agregados utilizados foram retidos na peneira de 4,70 mm e submetidos ao processo de peneiramento, sendo utilizados 25 g em cada um de três conjuntos de peneiras de malhas 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm e 0,105 mm, em oscilador vertical. A distribuição dos agregados por classe de diâmetro foi expressa pelo diâmetro médio ponderado (DMP) por meio da equação:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (X_i \cdot W_i)$$

Onde: “Xi” é o diâmetro médio das classes (mm); “Wi” é a proporção de cada classe em relação ao total.

E pelo diâmetro médio geométrico (DMG), através da equação:

$$DMG = \exp \frac{\sum_{i=1}^n n \cdot \log X_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Em que: “n” é a porcentagem de agregados estáveis em cada classe.

2. 3. 3. Análises químicas de solos

O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado em água (H₂O) na relação 1:2,5; acidez potencial (H+Al) extraídos com acetato de cálcio 1,0 mol L⁻¹ a pH 7,0 e determinado por titulação; cátions trocáveis de cálcio (Ca⁺²), magnésio (Mg⁺²) e alumínio (Al⁺³) extraídos com KCl 1,0 mol L⁻¹ e determinados por titulação; potássio (K⁺), sódio (Na⁺) e fósforo (P) foram extraídos com Mehlich⁻¹ (HCl 0,05 mol L⁻¹ e H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹), sendo os íons K⁺ e Na⁺ determinados por fotometria de chama e o P por colorimetria na presença de ácido ascórbico, via metodologias propostas pela EMBRAPA (2017). E a partir dos valores de acidez potencial, bases trocáveis e Al⁺³ trocável foram calculados a capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB), saturação por bases (V) e saturação por Al⁺³ (m).

2. 3. 4. Fracionamento físico da MOS e determinação do teor de carbono e nitrogênio da biomassa microbiana de solos

O fracionamento físico da MOS foi determinado segundo metodologia proposta por Meijboom, Hassink e Van Noordwijk (1995) e adaptada por Dubeux Jr. et al. (2006). E os teores de C-BMS e N-BMS foram estimados por meio do método da irradiação-extração. Foram pesados 20 g de solo, levados para micro-ondas por três minutos, ocorrendo a lise das células microbianas. Em seguida, a extração foi realizada com sulfato de potássio 0,5 mol L⁻¹. Posteriormente, os extratos de C-BMS sofreram a oxidação com dicromato de potássio 0,066 mol L⁻¹ e a titulação, com sulfato ferroso amoniacal 0,033 mol L⁻¹. Para os extratos de N-BMS foram determinados pelo método de Kjeldahl (ISLAM; WEIL, 1998).

2. 4. Análises estatísticas

Dados de caracterização física da área experimental e de mata nativa foram apresentados através de médias e desvios padrões amostrais.

Análises de variância utilizando o procedimento GLIMMIX do SAS, versão 9.4. foram realizadas para as variáveis estoque de raízes vegetais, Ds, DMP e DMG do solo, química do solo, fracionamento físico da MOS e C-BMS e N-BMS, utilizando-se o teste de Tukey, quando o teste F foi significativo ($p < 0,05$).

Para as variáveis estoque de raízes, Ds, DMP e DMG do solo, química do solo, fracionamento físico da MOS foram considerados como fatores fixos os tratamentos, profundidade de coleta e sítios de amostragem e como fatores aleatórios, os blocos e suas interações.

Nas propriedades de C-BMS e N-BMS foram considerados como fatores fixos os tratamentos e sítios de amostragem e como fatores aleatórios, os blocos e suas interações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estoque de raízes

Para estoque de raízes das plantas, foram verificados efeitos da interação tratamento x sítio de amostragem e da interação sítio de amostragem x profundidade de solos ($p < 0,05$) (Tabela 1). Foram observados maiores valores médios no sítio de amostragem a 0 m de distância das fileiras duplas das leguminosas (NL), em diferença entre tratamentos, em relação ao sítio a 8 m de distância das fileiras duplas das leguminosas (EL), no qual o consórcio da B+G apresentou maiores resultados ($p < 0,05$) em relação à B+S. Makumba et al. (2011) indicou que a gliricídia tem poucas raízes superficiais, reduzindo a competição com espécies herbáceas.

Tabela 1. Estoque de raízes vegetais ($t\ ha^{-1}$) em sistemas silvipastoris, Itambé-PE.

Fator	Estoque de raízes $t\ ha^{-1}$	
	Tratamento	
Sítio de amostragem	braquiária+gliricídia	braquiária+sabiá
NL	3,28 Aa	3,23 Aa
EL	1,71 Ba	1,58 Bb
Valor-P	0,03	
Erro padrão	0,08	
	Sítio de amostragem	
Profundidade (cm)	NL	EL
0-10	8,10 Aa	4,56 Ab
10-20	4,05 Ba	2,15 Bb
20-40	4,01 Ba	2,0 Bb
40-60	2,54 Ca	1,40 Cb
60-80	2,14 Ca	0,73 Db
80-100	1,13 Da	0,40 Db
100-120	0,83 Da	0,30 Db
Valor-P	<0,0001	
Erro padrão	0,12	

NL = 0 e EL = 8 m representam distâncias das fileiras duplas das leguminosas; Letras maiúsculas distintas na coluna e letras minúsculas distintas na linha indicam diferença significativa ($p < 0,05$).

Magalhães (2017) também verificou que a leguminosa sabiá, além das espécies *Auxemma oncochalis*, *Poincianera pyramidalis*, implantadas há 19 anos, apresentaram maiores médias de estoques de raízes ($0,13\ g\ cm^{-3}$; $0,09\ g\ cm^{-3}$ e $0,07\ g\ cm^{-3}$, respectivamente) dentro

da projeção da copa, na camada 0-10 cm. E Albuquerque et al. (2015) em estudo realizado em seis locais diferentes sob manejo florestal sustentável, três dos quais no estado de Pernambuco e outros três no estado do Ceará, também encontraram maior concentração de raízes de sabiá sob a base do tronco do que entre árvores e isso, provavelmente, se deve à estrutura dessas raízes.

Foram verificadas maiores estoques radiculares na camada mais superficial do solo ($p < 0,05$) (Tabela 1) em cada um dos sítios de amostragem. Enquanto gramíneas perenes normalmente possuem grande volume de raízes nos primeiros 5-10 cm do solo (EMMET-BOOTH et al., 2018), isto é, um sistema radicular mais superficial, leguminosas geralmente têm sistema radicular mais desenvolvido em comparação com a gramínea e são capazes de absorver nutrientes de perfis mais profundos do solo, pois a forma do sistema de raízes difere entre as espécies vegetais (TAIZ; ZEIGER, 2017). Essa diferença entre os arranjos dos sistemas radiculares gramíneas x leguminosas contribui para a eficiência de SSPs, onde árvores devem retirar água e alimento das partes mais profundas do solo e a gramínea da parte mais superficial (SOUZA et al., 2017).

Maiores médias de estoques de raízes foram encontradas NL em todas as profundidades edáficas ($p < 0,05$) (Tabela 1). Diferentes sistemas radiculares mistos das espécies forrageiras presentes na linha das leguminosas demonstram ser uma maneira de incrementar a MO em profundidade, melhorando a estrutura do solo, o que promove a atividade de microrganismos, contribuindo para o provável aumento da taxa de infiltração, redução da erosão edáfica, além de estabelecer efeitos positivos sobre a porosidade, D_s (Tabela 3) e estabilidade de agregados (Tabela 4) (SPERA et al., 2010).

Além disso, o crescimento do sistema radicular da braquiária além de 1 m de profundidade pôde contribuir, significativamente, para a formação de caminhos dentro dos solos onde o sistema radicular da gliricídia pode se desenvolver rapidamente ao longo do perfil do solo (RIBEIRO et al., 2019), auxiliando na obtenção de água e na manutenção de raízes superficiais também (NICODEMO, 2011).

E o desenvolvimento das leguminosas arbóreas também foi importante na proteção da área experimental pela copa e raízes, podendo evitar a erosão e lixiviação de sedimentos para os corpos hídricos pela chuva e reduzir a perda de MO proveniente da serapilheira que vai se formando ao longo do tempo (MARCHETTI; BARP, 2015).

Propriedades físicas de solos

A classe textural verificada em todas as profundidades e em praticamente todas da mata nativa foi franco argilo arenosa (Tabela 2), que apresenta a seguinte composição granulométrica: $45 \leq \text{areia} \leq 80\%$, $20\% \leq \text{argila} < 35\%$, silte $< 27,5$, conforme o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), representando solos com boas condições físicas, podendo-se esperar boas produções, se outros fatores de produção não forem limitantes (LETEY, 1985).

Tabela 2. Média \pm desvio padrão amostral de características físicas de amostras de solos, conforme profundidades edáficas (cm) da área experimental e de mata nativa (MN), Itambé-PE.

Local	Ds (g cm ⁻³)		Composição granulométrica (%)						
	Aparente	Real	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	AN (%)	GF (%)	CT
Exp. (0-10)	1,18 \pm 0,01	2,49 \pm 0,76	40,67 \pm 4,93	17,0 \pm 0	20,67 \pm 5,69	21,67 \pm 1,15	5,33 \pm 1,15	75,33 \pm 5,13	FGA
Exp. (10-20)	1,18 \pm 0,01	2,50 \pm 0,02	42,0 \pm 2,64	16,33 \pm 1,15	20,0 \pm 6,56	21,67 \pm 3,05	5,33 \pm 1,15	75,33 \pm 4,04	FGA
Exp. (20-40)	1,19 \pm 0,01	2,48 \pm 0	37,67 \pm 3,21	17,0 \pm 2,0	22,33 \pm 3,78	23,0 \pm 2,0	6,67 \pm 2,31	71,33 \pm 8,50	FGA
Exp. (40-60)	1,18 \pm 0,01	2,48 \pm 0,01	36,33 \pm 3,21	18,0 \pm 1,0	23,33 \pm 3,05	22,33 \pm 2,31	5,33 \pm 1,15	76,0 \pm 5,0	FGA
Exp. (60-80)	1,18 \pm 0,01	2,50 \pm 0,02	37,0 \pm 4,36	18,67 \pm 1,15	21,33 \pm 5,86	23,0 \pm 5,29	6,0 \pm 3,46	75,33 \pm 8,14	FGA
Exp. (80-100)	1,18 \pm 0,01	2,49 \pm 0,01	39,67 \pm 4,93	19,0 \pm 1,0	21,0 \pm 6,93	20,33 \pm 1,15	4,0 \pm 0	80,33 \pm 1,15	FGA
Exp. (100-120)	1,17 \pm 0,01	2,48 \pm 0,01	39,33 \pm 4,51	18,67 \pm 1,53	18,33 \pm 4,51	23,67 \pm 1,15	6,0 \pm 0	74,67 \pm 1,15	FGA
MN (0-10)	1,18 \pm 0,01	2,48 \pm 0,01	38,67 \pm 3,51	18,33 \pm 3,05	22,67 \pm 3,51	20,33 \pm 3,05	4,0 \pm 2,0	81,0 \pm 7,0	FGA
MN (10-20)	1,18 \pm 0,01	2,48 \pm 0,01	42,67 \pm 2,08	17,0 \pm 2,0	22,0 \pm 2,64	18,33 \pm 3,05	3,33 \pm 1,15	82,33 \pm 4,16	FA
MN (20-40)	1,18 \pm 0,01	2,47 \pm 0,01	41,0 \pm 4,0	18,67 \pm 1,53	18,0 \pm 1,0	22,33 \pm 3,05	5,33 \pm 1,15	76,33 \pm 2,52	FGA
MN (40-60)	1,17 \pm 0,01	2,47 \pm 0,01	34,67 \pm 2,52	19,33 \pm 1,15	21,33 \pm 1,15	24,67 \pm 3,51	6,67 \pm 1,15	72,67 \pm 2,89	FGA
MN (60-80)	1,18 \pm 0,01	2,48 \pm 0,01	33,33 \pm 2,08	19,33 \pm 1,15	23,67 \pm 5,69	23,67 \pm 3,05	5,33 \pm 1,15	77,67 \pm 3,51	FGA
MN (80-100)	1,19 \pm 0,01	2,48 \pm 0	37,0 \pm 3,60	21,0 \pm 1,0	16,33 \pm 4,16	25,67 \pm 1,15	7,33 \pm 2,31	71,67 \pm 7,50	FGA
MN (100-120)	1,18 \pm 0	2,49 \pm 0,02	37,33 \pm 3,21	21,33 \pm 0,58	17,0 \pm 2,0	24,33 \pm 2,31	6,0 \pm 0	75,33 \pm 2,31	FGA

Exp. = Experimento; MN = Mata nativa; Ds = Densidade do solo; AN = Argila natural; GF = Grau de floculação; CT = Classe textural; FGA = Franco argilo arenosa; FA = Franco arenosa.

A textura do solo pode ser usada como fator ambiental, pois influencia diretamente nos processos ecológicos, tais como a ciclagem de nutrientes e troca de íons (HE et al., 2014).

E, nessa perspectiva, diante da quantidade de areia fina (AF) verificada, é possível inferir que não há grandes problemas com perdas de partículas por erosão caso ocorra bom manejo do solo, visto que segundo Nunes e Cassol (2011) as frações que mais são transportadas em processos erosivos encontram-se nas classes de diâmetro de AF e areia muito fina (AMF).

As densidades (g cm⁻³) aparentes do solo encontradas na área experimental e na mata nativa (Tabela 2) foram consideradas em faixa ideal, visto que são consideradas como tal, em torno de 1,3 a 1,6 g cm⁻³ para solos arenosos, 0,9 a 1,1 g cm⁻³ para solos argilosos e 1,1 a 1,5 g cm⁻³ para solos siltosos, levando-se esses valores como referência para a maioria dos solos e

quando o valor desse parâmetro está acima dos indicados, se torna crítico e pode indicar compactação edáfica, resultando em menor capacidade de retenção de água (JESUS et al., 2015), por exemplo.

Não foi observado efeito de tratamento experimental quanto à Ds ($p > 0,05$), porém, foram verificados efeitos de sítio de amostragem e de profundidade do solo sobre a Ds ($p < 0,05$) (Tabela 3). Angulo (2020) trabalhando com os SSPs dessa mesma área experimental, após seis e sete anos de implementação e também após período chuvoso, também não verificou tal efeito na Ds nas camadas analisadas, 0-20 e 20-40 cm.

Tabela 3. Densidade do solo (Ds, g cm^{-3}) em sistemas silvipastoris, Itambé-PE.

Fator	Ds g cm^{-3}
Tratamento	
braquiária+gliricídia	1,32 A
braquiária+sabiá	1,33 A
Valor-P	0,65
Erro padrão	0,005
Sítio de amostragem	
NL	1,30 B
EL	1,35 A
Valor-P	0,02
Erro padrão	0,005
Profundidade (cm)	
0-10	1,25 E
10-20	1,28 E
20-40	1,31 D
40-60	1,33 CD
60-80	1,35 BC
80-100	1,37 AB
100-120	1,38 A
Valor-P	<0,0001
Erro padrão	0,005

NL = 0 e EL = 8 m representam distâncias das fileiras duplas das leguminosas; Letras maiúsculas diferentes na coluna indicam diferença significativa ($p < 0,05$).

Silva et al. (2019) estudaram o sistema de integração lavoura pecuária floresta, através dos tratamentos experimentais da *Gliricidia sepium* + *Brachiaria decumbens* (GS+BD); *Mimosa caesalpiniiifolia* + *Brachiaria decumbens* (MC+BD); *Tabebuia alba* + *Brachiaria decumbens* (TA+BD); *Zea mays* + *Brachiaria decumbens* (ZM+BD); e *Brachiaria decumbens* (BD), implementados em junho de 2015 em solo classificado como planossolo eutrício e

verificaram que também não houve diferença significativa entre os tratamentos quanto à Ds ($p>0,05$) em ambas profundidades analisadas, 0-10 e 10-20 cm.

Na camada mais superficial, os valores médios de $1,26 \text{ g cm}^{-3}$ em ambos tratamentos experimentais (Tabela 3) foram bem menores que $1,60 \text{ g cm}^{-3}$ encontrado na mesma profundidade, em pastagem de *Urochloa brizanta* com bovinos para engorda, em estudo conduzido por Tezolin et al. (2021), que associaram os resultados obtidos ao pisoteio animal ao longo do tempo. E os valores também foram menores que $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ observados por Valadão Júnior, Valadão e Silva (2017), trabalhando com área de pastagem em Latossolo Vermelho Amarelo sob diferentes sistemas de uso edáfico.

Desse modo, o sombreamento promovido pelas leguminosas atenuou problemas relacionados ao pisoteio animal, visto que a Sabiá fornece grandes áreas de sombreamento, levando a melhor distribuição do rebanho ao redor da pastagem, o que proporciona diferentes caminhos para o N entrar no solo (APOLINÁRIO et al., 2015, CUBILLOS et al., 2016) e segundo Sá et al. (2012) a *Gliricidia sepium* também é uma leguminosa que promove sombra em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA).

Maior Ds foi verificada no sítio de amostragem localizado a 8 m de distância das fileiras duplas das leguminosas ($p<0,05$) (tabela 3). O sistema radicular das árvores junto das forrageiras promove boa estruturação física do solo e biodiversidade da microbiota. Através da ampliação da complexidade do sistema e da biomassa vegetal aportada (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009) há melhoria na capacidade de suporte do sistema (PAGIOLA et al., 2007).

Martinkoski et al. (2017) também verificaram diferença estatística entre as profundidades analisadas ($p<0,01$), de modo que na profundidade 0-20 cm houve menor Ds, em comparação às de 20-40 e 40-60 cm. Os resultados (Tabela 3) também foram corroborados por Martini et al. (2014) que observaram aumento da Ds com o aumento na profundidade em avaliações de áreas com SSPs.

Conforme Pequeno (2013), este comportamento se deve às condições de adensamento natural do solo, por definição, ocorrendo devido às pressões promovidas pelas camadas superiores sobre as subjacentes. Há, ainda, a movimentação de materiais finos dos horizontes superiores para os inferiores, os quais reduzem os espaços dos poros, promovendo este fenômeno. Além disso, à medida que se aumenta a profundidade no perfil do solo, verifica-se, em geral, redução na quantidade de macroporos, devido ao menor volume de raízes que são responsáveis pelo aumento da aeração e diminuição da Ds (ANDRADE; STONE, 2009).

Os valores médios da Ds em todas as profundidades edáficas (Tabela 3), caracterizaram os solos como não compactados, de acordo com os referenciais propostos por Reinert et al. (2008). Esses autores sugeriram que solos com teor de argila entre 20-55% (Tabela 2) são considerados compactados quando apresentam densidades do solo acima de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$. Estes resultados indicam que os SSPs não oferecem limitação física ao desenvolvimento das plantas.

Quanto aos dados de DMP e DMG edáficos foram verificados efeitos da interação tratamento x sítio de amostragem e da interação tratamento x profundidade do solo ($p < 0,05$) (Tabela 4). DMP e DMG foram maiores no tratamento B+G EL e menores na B+S EL e sem diferenças entre tratamentos NL ($p < 0,05$).

Foram verificados maiores valores de DMP e DMG EL das leguminosas quanto ao tratamento B+G e NL em relação à B+S e também maiores valores de tais variáveis no tratamento B+G em comparação à B+S no sítio de amostragem EL ($p < 0,05$). Coêlho (2016) verificou maior produção de massa de forragem no consórcio B+G em relação B+S tanto no período seco quanto no chuvoso na mesma área experimental do referido trabalho.

Tabela 4. Diâmetro médio ponderado do solo (DMP, mm) e diâmetro médio geométrico do solo (DMG, mm) em sistemas silvipastoris, Itambé-PE.

Fator	DMP		DMG	
	mm			
Sítio de amostragem	Tratamento			
	B+G	B+S	B+G	B+S
NL	3,15 Ba	3,12 Aa	1,60 Ba	1,59 Aa
EL	3,23 Aa	3,01 Bb	1,63 Aa	1,54 Bb
Valor-P	<0,0001		<0,0001	
Erro padrão	0,01		0,006	
Profundidade (cm)	Tratamento			
	B+G	B+S	B+G	B+S
0-10	3,25 Aa	3,24 Aa	1,64 Aa	1,64 Aa
10-20	3,22 Aa	3,19 Aa	1,63 Aa	1,62 ABa
20-40	3,21 Aa	3,14 ABa	1,62 Aa	1,59 ABCa
40-60	3,20 Aa	3,01 BCb	1,62 Aa	1,54 BCb
60-80	3,17 Aa	2,96 Cb	1,61 Aa	1,52 Cb
80-100	3,12 Aa	2,98 BCa	1,59 Aa	1,53 Ca
100-120	3,15 Aa	2,96 BCb	1,60 Aa	1,52 Ca
Valor-P	0,02		0,03	
Erro padrão	0,03		0,01	

B+G = Consórcio de braquiária com gliricídia; B+S = Consórcio de braquiária com sabiá. NL = 0 e EL = 8 m representam distâncias das fileiras duplas das leguminosas; Letras maiúsculas

distintas na coluna e letras minúsculas distintas na linha indicam diferença significativa ($p < 0,05$).

Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos experimentais quanto aos DMP e DMG nas profundidades 0-10, 10-20 e 20-40 cm (Tabela 4). Isso pode estar relacionado ao aporte constante de MO proveniente da rizodeposição das gramíneas e da decomposição de restos vegetais característicos em agroecossistemas SSPs (TORRES et al., 2013).

Silva et al. (2019) também não verificaram diferenças significativas de DMP entre os tratamentos experimentais da GS+BD, MC+BD, TA+BD, ZM+BD e BD a 0-10 e 10-20 cm de profundidade. BATTISTI (2017) também não observou diferenças estatísticas de DMG entre floresta primária, pastoreio racional voisin sem árvore, voisin silvipastoril com núcleos arbóreos e floresta secundária, nos primeiros 10 cm de profundidade do solo.

A distribuição de agregados estáveis em água não foi afetada pela introdução de *Eucalyptus* na pastagem, nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm (SARTO et al., 2020). O sistema integrado de lavoura pecuária (ILP), pastagem de monocultura e savana nativa (Cerrado) apresentaram quantidade de agregados de solo semelhantes. Grandes macroagregados (4-8 mm) constituíram 76,2% no sistema ILP, 82,5% na pastagem de monocultura e 82,8% na savana nativa. O uso de diferentes espécies de *Eucalyptus* não teve efeito na distribuição de agregados no solo.

Além disso, o sistema radicular da gramínea contribui para a melhoria do estado de agregação do solo, elevando a infiltração de água até as camadas mais profundas do solo, além de benefícios da reciclagem de nutrientes, elevação de MO e controle de plantas daninhas (SEIDEL et al., 2017).

Entretanto, o consórcio da B+G apresentou maiores valores de DMP nas profundidades 40-60, 60-80 e 100-120 cm em relação à B+S e de DMG nas profundidades 40-60 e 60-80 cm ($p < 0,05$) (Tabela 4). Esses resultados podem ter sido influenciados pela competição por nutrientes entre braquiária e sábia, visto que esta leguminosa é considerada uma espécie de alto potencial competitivo. Santos et al. (2019) verificaram que a competição da braquiária consorciada com a sábia foi significativa, ocorrendo redução na massa de forragem (MF) da gramínea durante os meses secos.

Mesmo assim, os valores médios de DMP entre os tratamentos experimentais, ao longo do perfil edáfico, variaram de 2,85 a 3,28 mm (Tabela 4), sendo bem superiores ao limite mínimo crítico de 0,5 mm proposto por Kiehl (1979), indicando que os solos apresentaram

baixa erodibilidade, o que é corroborado por Paiva e Araujo (2012) que afirmam que os sistemas agrossilvoculturais representam uma estratégia eficiente para evitar erosão do solo. Loss et al. (2014) relataram melhorias nas características físicas (elevação no volume total de poros e no DMP dos agregados e redução na Ds cinco anos após a implantação de SSP, comparada à área de lavoura e de pastagem exclusiva).

Rosolem e Pivetta (2016) avaliaram o crescimento e a atividade das raízes em experimento conduzido em Botucatu-SP, sob solo argiloso. Os autores mostraram que houve maior crescimento e atividade das raízes de soja no perfil, com aumento na produtividade da cultura, o que foi associado com a presença de bioporos deixados pelas raízes de *U. ruziziensis*

A textura do solo influencia na formação e estabilidade de agregados edáficos (SILVA et al., 2014). Desse modo, valores de argila $\geq 20\%$ encontrados em todas as profundidades (Tabela 2) também contribuíram para a agregação, pois os agregados são estruturas formadas pela união de partículas minerais e orgânicas que se juntam através de uma força mecânica e continuam juntas por ação de agente cimentante de origem mineral ou orgânica.

Os principais agentes cimentantes de origem mineral são as argilas, devido à presença de cargas elétricas em maiores quantidades, os óxi-hidróxidos de ferro e alumínio (WANG et al., 2016; WU et al., 2016) e os de origem orgânica é a MO (YAN et al., 2015; VOLIKOV et al., 2016). Portanto, a agregação do solo está entre as propriedades edáficas melhoradas pela modificação das condições de manejo das culturas sob sistemas agroflorestais (CHEN et al., 2017).

Propriedades químicas de solos

Para as propriedades químicas de solos, foram verificados efeitos apenas de profundidade edáfica quanto aos valores de pH, P, Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Al^{+3} , hidrogênio (H^+), SB, CTC_{potencial}, V e m ($p < 0,05$) (Tabelas 5A e 5B).

Nas profundidades 0-10 cm até 60-80 cm, houve maiores valores de pH, porém, na mais superficial, diferiram significativamente em relação aos encontrados nas maiores profundidades, 80-100 e 100-120 cm ($p < 0,05$) (Tabela 5A). Tais valores podem ser classificados como baixos ($< 5,0$), segundo Sobral et al. (2015). Conforme Caldas (2007), a elevada acidez ativa (pH) em regiões com elevada precipitação pluviométrica (1681 mm anual, Figura 1) é comum, porque ocorre lixiviação de cátions de caráter básico e a concentração residual de cátions de caráter ácido, produtores de H^+ , cujos teores mais elevados foram verificados nas profundidades mais superficiais ($p < 0,05$).

Tabela 5A. Propriedades químicas do solo em sistemas silvipastoris, Itambé-PE.

Fator	pH	P	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺
	(H ₂ O, 1:2,5)	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³			
Tratamento						
braquiária+glicírdia	4,76 A	7,23 A	1,70 A	0,92 A	0,02 A	0,20 A
braquiária+sabiá	4,66 A	6,50 A	1,63 A	0,97 A	0,02 A	0,11 A
Valor-P	0,24	0,64	0,74	0,63	0,16	0,19
Erro padrão	0,04	1,13	0,17	0,06	0,001	0,03
Sítio de amostragem						
NL	4,68 A	8,09 A	1,7 A	0,93 A	0,02 A	0,19 A
EL	4,74 A	5,64 A	1,63 A	0,96 A	0,02 A	0,12 A
Valor-P	0,40	0,20	0,70	0,74	0,17	0,27
Erro padrão	0,03	1,11	0,17	0,05	0,001	0,03
Profundidade (cm)						
0-10	4,85 A	14,83 A	3,55 A	1,80 A	0,03 A	0,29 A
10-20	4,83 AB	15,16 A	3,41 A	1,39 AB	0,02 B	0,27 AB
20-40	4,70 ABC	6,83 B	1,76 B	1,00 BC	0,02 B	0,19 B
40-60	4,71 ABC	3,50 B	1,05 BC	0,68 C	0,02 B	0,11 C
60-80	4,68 ABC	2,58 B	0,66 C	0,58 C	0,02 B	0,08 C
80-100	4,62 BC	2,66 B	0,62 C	0,59 C	0,02 B	0,06 C
100-120	4,57 C	2,50 B	0,62 C	0,59 C	0,02 B	0,07 C
Valor-P	0,005	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0003	<0,0001
Erro padrão	0,05	1,38	0,24	0,10	0,001	0,03

pH = potencial hidrogeniônico; P = Fósforo; Ca⁺² = Íon cálcio; Mg⁺² = Magnésio; Na⁺ = Sódio; K⁺ = Potássio; NL = 0 e EL = 8 m representam distâncias das fileiras duplas das leguminosas; Letras maiúsculas diferentes na coluna indicam diferença significativa (p<0,05).

Além disso, a acidez potencial é associada à liberação de íons H⁺ pelas raízes, para manter o equilíbrio de cargas, quando a planta absorve cátions produtos da decomposição da serapilheira (OLIVEIRA et al., 2015; BATTISTI et al., 2018).

Nas duas profundidades mais superficiais, foram verificados os maiores teores de P (p<0,05) (Tabela 5A), satisfazendo a demanda de grande parte das culturas perenes (PREZOTTI e GUARÇONI, 2013). Angulo (2020) verificou que valores de P no solo, na profundidade 0-20 cm, sofreram diminuição com o decorrer do tempo de avaliação (p<0,05), sendo enquadrados como teores médios nos anos 2013 e 2017 e, como baixos, em 2018. A classificação proposta por Sobral et al. (2015), varia em função da classe textural e do teor de argila, média e 15-35%, respectivamente (Tabela 2), em que os valores de P são considerados baixos, médios e adequados, quando apresentam médias <7, 7-15 e > 15 mg dm⁻³, respectivamente.

Dessa forma, houve aumento nos teores de P, em relação ao ano 2018, sendo classificados como médios. Enquanto, nas camadas subjacentes, não houve diferenças estatísticas entre si e os teores foram classificados como baixos, visto que o P e também o Ca são pouco móveis, tendendo a se acumular na camada superficial do solo, principalmente o P dado à baixa mobilidade em solos mais intemperizados, ricos em óxi-hidróxidos de Fe e Al (OLIVEIRA; PINHEIRO; VEIGA, 2014).

Em manutenção de pastagens, a maior relevância do P ocorre diante de recuperação de pastos degradados, visto que quando a forragem é submetida à contínua restrição fotossintética, observa-se consumo de carboidratos de reserva das raízes, o que pode tornar o sistema radicular superficial (SOARES FILHO et al., 2013). Por isso, nessa situação, o P favorecerá o desenvolvimento radicular, para que, posteriormente, a forrageira seja capaz de absorver os demais nutrientes, o que minimizará perdas excessivas de nitrogênio e potássio por lixiviação e explicar o efeito sinérgico entre a adubação fosfatada e nitrogenada (BÉLANGER et al., 2017).

O retorno e a distribuição dos nutrientes no sistema pastejado não ocorre de forma uniforme. Por exemplo, a maior parte do fósforo (P) retorna ao sistema via fezes animais (DUBEUX JR et al., 2014), evidenciando a complexidade e magnitude dos SIPA. Em condições de maior carga animal, a excreta passa a ser a principal via de retorno, enquanto que, em baixa carga animal, a serapilheira é a principal via de retorno (DUBEUX JR et al., 2007). Essa distribuição heterogênea dos nutrientes nas duas vias de retorno (e.g. excreta animal e resíduo vegetal) aumenta a heterogeneidade de retorno dos nutrientes nos solos (ASSMANN; ASSMANN; ASSMANN, 2008).

Maiores valores de Ca^{+2} foram verificados nas duas profundidades mais superficiais do solo ($p < 0,05$) (Tabela 5A), sendo enquadrados como valores altos ($> 3,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$), conforme Sobral et al. (2015), havendo, portanto, aumento nos teores em relação aos valores médios ao longo do período de avaliação ($p < 0,05$), isto é, 2013, 2017 e 2018, analisados por Angulo (2020) na profundidade 0-20 cm. Nas profundidades 20-40, com teor médio ($1,6-3,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$) e 40-60 cm, não houve diferenças significativas entre si, nem entre os teores nas de 40-60 cm e as subjacentes ($p < 0,05$), classificados como baixos ($< 1,6 \text{ cmolc dm}^{-3}$).

Íons de cálcio (Ca^{2+}) são importantes componentes de sinalização envolvidos na regulação da turgescência da célula-guarda e, por conseguinte, na abertura e fechamento estomático influenciando diretamente no desempenho fotoquímico dos vegetais (ROTHWELL; DODD, 2014).

Maiores valores de Mg^{2+} também foram encontrados nas duas profundidades superficiais ($p < 0,05$) (Tabela 5A), os quais foram classificados como de teores elevados ($> 1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), de acordo com Sobral et al. (2015), havendo, portanto, manutenção desses teores, visto que Angulo (2020) observou esta classificação ao longo dos anos de avaliação ($p < 0,05$). Já em 20-40 cm não houve diferenças significativas em relação à camada superior e às inferiores ($p > 0,05$), sendo de teores médios (variando de 0,4 a $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Íons magnésio (Mg^{2+}) têm um papel específico na ativação de enzimas envolvidas na respiração, na fotossíntese e na síntese de DNA e RNA. Mg^{2+} é também parte da estrutura em anel da molécula de clorofila (TAIZ; ZEIGER, 2017).

Foram verificados teores maiores de Na^+ na profundidade 0-10 cm e não houve diferenças estatísticas de tais teores entre as profundidades subjacentes ($p > 0,05$) (Tabela 5A). Já quanto ao K^+ , valores maiores puderam ser observados nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, na qual tais valores não diferiram dos encontrados na camada 20-40 cm e esses resultados foram classificados como elevados ($> 60 \text{ mg dm}^{-3}$), enquanto que outras profundidades não diferiram entre si quanto a K^+ , sendo os nas profundidades 40-60 e 60-80 cm considerados médios ($30-60 \text{ mg dm}^{-3}$) e nas e nas mais profundas, baixos ($< 30 \text{ mg dm}^{-3}$), de acordo com Sobral et al. (2015).

Lima et al. (2018), analisaram solos do Parque Estadual Dois Irmãos (PEDI), Recife/PE verificaram que teores de K^+ dos solos foram próximos aos de Na^+ , com médias de 0,07, 0,04 e 0,05 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, na camada superficial, ou seja, 0-10 cm, intermediária, 10-30 cm e na mais profunda, 30-60 cm, respectivamente. Tanto o K^+ , como o Na^+ apresentam elevada mobilidade no solo, sendo baixos os seus teores em solos mais evoluídos (CUNHA et al., 2014), como os que compõem o PEDI, ou seja, Latossolo Amarelo e Argissolo Amarelo. Bernardi et al. (2015) relataram que concentrações de K^+ em solos brasileiros normalmente são baixas devido às características litológicas.

Diante disso, pôde-se verificar que os SSPs auxiliaram para níveis elevados de K^+ nas menores profundidades de solos. Em SIPA, a forragem tem grande importância na construção da fertilidade do solo, pois aumenta o fornecimento de nutrientes na camada superior do solo, i.e. seu resíduo associado com as excretas animais acima do solo decompõem mais rapidamente (DUBEUX JR et al., 2014).

Segundo Rosolem, Vicentini e Steiner (2012) o K absorvido permanece a maior parte do tempo no tecido vegetal, vivo ou morto, protegido de perdas por erosão e lixiviação e, portanto, espécies com elevada capacidade de extrair K do solo e, ou, capazes de explorar camadas profundas do solo como as gramíneas forrageiras, são de extrema importância para a

sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola, por maximizar o aproveitamento de K e manter a fertilidade do solo, evidenciando o potencial das gramíneas forrageiras como culturas cicladoras de nutrientes. Além disso, K aumenta a eficiência de uso do N; com teores baixos de K nas plantas os compostos de N solúvel acumulam-se.

Houve menores teores de Al^{+3} nas duas profundidades mais superficiais ($p < 0,05$) (Tabela 5B), que foram classificados como de teores baixos ($< 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), conforme Sobral et al. (2015), havendo estabilidade ao longo do tempo em relação aos verificados por Angulo (2020). E a partir da profundidade 20-40 cm tais teores foram considerados elevados ($> 1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Tabela 5B. Propriedades químicas do solo em sistemas silvipastoris, Itambé-PE.

Fator	Al^{+3}	H^+	SB	CTC _{potencial}	V	m
	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$				%	
Tratamento						
braquiária+gliricídia	1,11 A	6,48 A	2,87 A	10,47 A	25,30 A	35,95 A
braquiária+sabiá	1,19 A	7,30 A	2,75 A	11,25 A	22,97 A	36,50 A
Valor-P	0,62	0,10	0,66	0,11	0,34	0,91
Erro padrão	0,10	0,20	0,17	0,20	1,34	3,04
Sítio de amostragem						
NL	1,18 A	7,02 A	2,88 A	11,07 A	24,19 A	36,16 A
EL	1,12 A	6,76 A	2,74 A	10,64 A	24,09 A	36,28 A
Valor-P	0,62	0,44	0,49	0,26	0,96	0,97
Erro padrão	0,08	0,20	0,14	0,20	1,30	2,92
Profundidade (cm)						
0-10	0,33 C	6,84 B	5,67 A	12,86 A	43,83 A	7,0 C
10-20	0,40 C	7,51 AB	5,11 A	13,02 A	39,16 A	8,33 C
20-40	1,25 B	8,34 A	3,0 B	12,57 AB	23,66 B	29,50 B
40-60	1,62 A	7,95 AB	1,88 BC	11,45 B	16,0 BC	48,41 A
60-80	1,60 A	6,94 B	1,37 C	9,90 C	13,83 C	54,75 A
80-100	1,46 AB	5,52 C	1,33 C	8,30 D	15,91 BC	53,41 A
100-120	1,40 AB	5,15 C	1,32 C	7,89 D	16,58 BC	52,16 A
Valor-P	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Erro padrão	0,10	0,28	0,28	0,31	2,12	3,09

Al^{+3} = Íon alumínio; H^+ = Hidrogênio; SB = Soma de bases; CTC: Capacidade de troca de cátions; V = Saturação por bases; m = Saturação de Al^{+3} ; NL = 0 e EL = 8 m representam distâncias das fileiras duplas das leguminosas; Letras maiúsculas diferentes na coluna indicam diferença significativa ($p < 0,05$).

Maiores valores de S foram observados nas duas menores profundidades de solos ($p < 0,05$) (Tabela 5B), classificados como valores elevados ($> 5,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e na profundidade

20-40, $3,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, enquadrando como valor médio ($2,0\text{-}5,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), não diferiu, significativamente, dos encontrados na profundidade 40-60, mas sim das camadas mais profundas ($p < 0,05$), considerados baixos ($< 2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), consoante Prezotti e Guarçoni (2013).

Maiores resultados de CTC foram verificados nas profundidades 0-10, 10-20, 20-40 ($p < 0,05$) (Tabela 5B), a qual não diferiu significativamente em relação aos de 40-60 cm e essa profundidade teve maiores valores que os encontrados na de 60-80 cm, a qual apresentou maiores valores em relação aos das camadas subjacentes ($p < 0,05$). Em todas as profundidades, os valores foram classificados como médios ($5,0\text{-}15,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), segundo Sobral et al. (2015).

Foram encontrados maiores percentuais de V nas profundidades 0-10 e 10-20 cm e os menores nas camadas subjacentes ($p < 0,05$) (Tabela 5B). Em todas as profundidades, os valores foram classificados como de saturação por bases baixa ($< 50\%$), conforme Sobral et al. (2015), que indicam que solos com saturação por bases menor que 50%, têm cargas ocupadas por componentes da acidez H ou Al e necessitam de correção. E tais valores puderam ser explicados pela ausência de reposição de nutrientes via correção/adubação.

Foram observados menores percentuais de m nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, já na de 20-40 cm foram valores intermediários e nas maiores profundidades houve os maiores percentuais ($p < 0,05$) (Tabela 5B). Até a profundidade 20-40 cm, tais percentuais foram enquadrados como baixos ($< 30,0\%$), enquanto na de 40-60 cm, como médios ($30,0\text{-}50,0\%$).

Tais resultados evidenciam ausência de toxicidade pelo Al^{+3} nas menores profundidades edáficas, algo importante, visto que solos com elevadas concentrações de Al^{+3} afetam também o sistema radicular das plantas, sendo os sintomas mais comuns de toxicidade de alumínio raízes com membranas danificadas, sistema radicular atrofiado com raízes pequenas e grossas, cujas ramificações apresentam pouco crescimento lateral, tornando-se ineficiente na absorção de nutrientes (BRADY; WEIL, 2013).

Já nas camadas subjacentes, os percentuais de m foram elevados ($> 50,0\%$) de acordo com Sobral et al. (2015). No entanto, em solos florestais, parte dos teores de Al^{3+} são normalmente quelatizados por substâncias húmicas decorrentes da decomposição da MO, o que minimiza sua ação tóxica (HARTWIG et al., 2007).

Além disso, a presença das árvores pode afetar em termos de umidade e temperatura do solo pelo fato de proporcionar alterações microclimáticas no ambiente (KARAM et al., 2013). A inserção de árvores com sistema radicular profundo em pastagens de gramíneas apresenta vantagens, não apenas na exploração de diferentes profundidades do solo, aumentando a

eficiência na aquisição de água e nutrientes, mas também na redução das perdas por lixiviação (FRANCHINI et al., 2014).

Fracionamento físico da MOS + Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo

A dinâmica das frações da MOS é afetada pelos mecanismos de estabilização (recalcitrância, proteção física e associação com os minerais), especialmente na profundidade 0-20 cm, na qual, assim como na de 20-40 cm, os manejos SSPs não promoveram diferenças significativas na fração mineral do solo ($p > 0,05$) (Tabela 6), pois conforme Islam e Weil (2000), a textura, que se apresentou estável (Tabela 2), e a mineralogia são características inerentes ao solo, sendo considerados indicadores permanentes para caracterizar a qualidade do solo.

Tabela 6. Fração mineral do solo (g kg^{-1}), fração leve da matéria orgânica do solo (FL-MOS, g kg^{-1}) e fração pesada da matéria orgânica do solo (FP-MOS, g kg^{-1}) em sistemas silvipastoris, Itambé-PE.

Fator	Fração mineral do solo	FL-MOS	FP-MOS
	g kg ⁻¹		
Tratamento			
braquiária+gliricídia	462,56 A	1,76 A	535,65 A
braquiária+sabiá	453,59 A	2,50 A	543,89 A
Valor-P	0,42	0,36	0,45
Erro padrão	6,46	0,45	6,31
Sítio de amostragem			
NL	447,40 A	2,69 A	549,89 A
EL	468,75 A	1,57 A	529,65 A
Valor-P	0,14	0,09	0,15
Erro padrão	6,46	0,37	6,31
Profundidade (cm)			
0-20	470,39 A	3,26 A	526,33 A
20-40	445,76 A	1,00 B	553,22 A
Valor-P	0,12	0,01	0,10
Erro padrão	7,90	0,42	7,85

NL = 0 e EL = 8 m representam distâncias das fileiras duplas das leguminosas; Letras maiúsculas diferentes na coluna indicam diferença significativa ($p < 0,05$).

É possível utilizar as diferentes frações da MOS para inferir sobre os impactos decorrentes dos diferentes usos e manejos aplicados ao solo (SIGNOR et al., 2014; KUNDE et al., 2016; CONCEIÇÃO et al., 2014). A parte não decomposta (ou pouco decomposta) e

fracamente associada às argilas, constitui a fração leve (FL), a qual não foi afetada por efeito de tratamentos experimentais, nem de sítio de amostragem, mas apenas pela profundidade de coleta das amostras de solos ($p < 0,05$) (Tabela 6). Tais resultados também foram verificados por Angulo (2020), cujos valores médios dos anos 2017 e 2018 foram $1,48 \text{ g kg}^{-1}$ e $1,01 \text{ g kg}^{-1}$, nas camadas 0-20 e 20-40 cm, respectivamente.

A quantidade de FL-MOS no sistema tem sido relacionada à quantidade de serapilheira depositada no solo (SOARES et al., 2017; ALFARO; DUBE; ZAGAL, 2018; LIMA et al., 2018). O período de avaliação (Figura 1), no qual provavelmente houve maior deposição de serapilheira advinda notadamente das leguminosas, como verificado por Freire et al. (2010) e Apolinário et al. (2015). Normalmente, ocorre redução na quantidade da FL-MOS com aumento da profundidade edáfica (FRAZÃO et al., 2010). Esse resultado também pode ser atribuído à maior concentração de raízes vegetais nas camadas mais superficiais (Tabela 1), já que a FL-MOS está diretamente relacionada ao material vegetal recentemente adicionado ao solo.

A fração pesada (FP) é constituída por materiais orgânicos, fortemente ligados à fração mineral que se encontra em estágio avançado de humificação, sendo altamente estáveis, devido a sua estabilidade química, pela interação com a fração mineral e a proteção física pela sua localização no interior de microagregados estáveis do solo, além de serem intrinsecamente recalcitrantes (BAYER, 1996). Mudanças nos sistemas de uso e manejo do solo usualmente afetam primeiramente os estoques de FL-MOS e depois a FP-MOS que pode sofrer a influência dos três mecanismos (recalcitrância, oclusão e interação coloidal) (TOMAZI, 2008). Não foram verificados efeitos significativos quanto essa FP-MOS ($p > 0,05$) (Tabela 6). Como a MO da FP apresenta uma ciclagem lenta, faz-se necessário um período maior para que sejam detectadas alterações, devido aos sistemas de uso do solo (BAYER et al., 2004).

Santos et al. (2013) verificaram, em estudo sobre dinâmica da MOS em Argissolo Vermelho submetido a diferentes usos no Rio Grande do Sul, que os estoques de C da FP não foram influenciados pelos sistemas de uso nas camadas estudadas (0,000-0,025 m e 0,025-0,075 m), possivelmente em decorrência do curto período de tempo de instalação dos sistemas (cinco anos). Os autores também constataram que o sistema agrossilvipastoril utilizado apresentou, na camada superficial, valores de carbono orgânico total e da fração grosseira (fração lábil) da MOS semelhantes aos observados no campo nativo, utilizado como referência, demonstrando potencial na conservação dos recursos naturais.

Bactérias e fungos geralmente compõem $>90\%$ da biomassa microbiana total do solo e são responsáveis pela maior parte da decomposição da MOS. As comunidades microbianas do solo são os principais reguladores da dinâmica da MOS e da disponibilidade de nutrientes;

portanto, mudanças na composição e função da comunidade microbiana (por exemplo, utilização de substrato) em resposta a diferentes práticas de manejo podem desempenhar um papel importante na determinação das taxas de perda ou ganho de C (SIX et al., 2006).

A biologia do solo é um componente importante da agregação do solo (Tabela 4) e, eventualmente, do sequestro de C. Carbono incorporado em agregados do solo, especialmente microagregados, é protegido da decomposição pelo impedimento físico dos decompositores e pela criação de O₂ e condições de umidade que limitam a atividade do decompositor (McGOWAN et al., 2019).

Em relação aos dados de C-BMS, não houve efeito significativo de tratamentos experimentais ($p > 0,05$) (Tabela 7). Graciano (2013) não encontrou diferenças significativas entre consórcios de braquiária com leguminosas herbáceas na Zona da Mata Norte de PE.

Tabela 7. Carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS, mg kg⁻¹) e nitrogênio da biomassa microbiana do solo (N-BMS, mg kg⁻¹) em sistemas silvipastoris, Itambé-PE.

Fator	C-BMS	N-BMS
	mg kg ⁻¹	
Tratamento		
braquiária+gliricídia	272,49 A	34,66 A
braquiária+sabiá	446,31 A	52,56 A
Valor-P	0,26	0,35
Erro padrão	80,30	10,56
Sítio de amostragem		
NL	451,06 A	61,05 A
EL	267,74 B	26,17 A
Valor-P	0,0005	0,07
Erro padrão	57,43	10,56

NL = 0 e EL = 8 m representam distâncias das fileiras duplas das leguminosas; Letras maiúsculas diferentes na coluna indicam diferença significativa ($p < 0,05$).

Pastagens bem manejadas tendem a apresentar elevado conteúdo de MO e densa massa radicular, a qual foi maior na linha das leguminosas (Tabela 1), o que contribuiu para maior aporte de C-BMS em tal sítio de amostragem ($p < 0,05$) (Tabela 7), visto que o grau de perturbação, Ds, nível de pH e de P, conteúdo de água no solo, via precipitação pluviométrica (Figura 1), por exemplo, e localização de resíduos são fatores que controlam a proporção de biomassa bacteriana e fúngica em agroecossistemas (SIX et al., 2006; WHITE; RICE, 2009).

A estabilidade do ambiente edáfico proporcionada pelas reduzidas operações agrícolas, influenciou na atividade específica dos microrganismos do solo, justificando os valores de C-BMS e N-BMS para os ambientes avaliados. Além disso, microclima é formado na camada

superficial do solo devido à estrutura das leguminosas arbóreas (MAHECHA; ANGULO, 2012), promovendo ambiente sombreado, o que favorece a redução da perda de umidade do solo para o ambiente. Angulo (2020) verificou que a gliricídia produziu mais folhas até 1,5 m de altura do que a sabiá (94,12 vs. 17,41 kg de MS ha⁻¹) no ano de 2018, favorecendo o sombreamento, redução de temperatura e velocidade do vento sob a copa e, conseqüentemente, a retenção de umidade no solo (PEZZOPANE et al., 2015; LIMA et al., 2018).

Rodrigues et al. (2015) investigaram as características microbiológicas do solo em SSP formado por capim-Marandu com diferentes densidades de palmeira e observaram que o SSP favoreceu a biomassa e atividade microbiana do solo, pois verificaram que o C microbiano, N microbiano, relação biomassa microbiana do solo e C orgânico apresentaram valores mais elevados em solos com alta densidade da palmeira de babaçu, o que favorece a mineralização do solo, aumentando sua fertilidade.

4. CONCLUSÕES

Nos sistemas silvipastoris de braquiária em consórcio com gliricídia ou sabiá, o estoque de raízes ao longo do perfil do solo (0-120 cm) ressalta a importância da gramínea e das leguminosas forrageiras para benefícios de atributos edáficos, como valores adequados de densidade do solo e diâmetro médio ponderado do solo, indicando que esses sistemas representam uma estratégia eficaz para evitar erosão edáfica.

Além disso, os sistemas silvipastoris contribuem para os maiores valores médios de P, Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} , soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por bases e fração leve da matéria orgânica do solo e para menores teores de Al^{+3} e percentual de saturação por Al^{+3} nas camadas mais superficiais do solo, onde há maior estoque de raízes.

Sistemas silvipastoris promovem também a exploração de camadas mais profundas do solo, possibilitando o aumento de absorção de nutrientes e redução de perdas por lixiviação.

Além disso, microclima formado na camada superficial do solo devido à utilização das leguminosas e manejo adequado das pastagens, contribuem para ambiente favorável para a manutenção da biomassa microbiana do solo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, K. et al. Long-term annual burning of grassland increases CO₂ emissions from soils. **Geoderma**, v.282, p.80-86, 2016.

ALBUQUERQUE, E. R. G. M. et al. Root biomass under stem bases and at different distances from trees. **Journal of Arid Environments**, v.116, p.82-88, 2015.

ALFARO, M.; DUBE, F.; ZAGAL, E. Soil quality indicators in an Andisol under different tree covers in disturbed *Nothofagus* forests. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v.78, n.1, p.106-116, 2018.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.4, p.382-388, 2009.

ANGULO, A.M.H. **Sistemas silvipastoris com leguminosas arbóreas e *Brachiaria decumbens* Stapf: Biomassa arbórea, decomposição de folhas e fertilidade do solo**. 2020. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Programa de Pós-graduação em Zootecnia. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

APOLINÁRIO, V. X. O. et al. Tree legumes provide marketable wood and add nitrogen in warmclimate silvopasture systems. **Agronomy Journal**, v.107, n.5, p.1915-1921, 2015.

ASSMANN, T. S.; ASSMANN, A. L.; ASSMANN, J. M. Ciclagem de nutrientes In: ASSMANN, A. L.; SOARES, A. B.; ASSMANN, T. S. **Integração Lavoura - Pecuária para a agricultura familiar**. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná. p.16-24. 2008.

BATTISTI, L. F. Z. **Núcleos arbóreos em pastagens: Efeitos sob os atributos físicos e químicos do solo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Programa de Pós-graduação em Agroecossistemas. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BATTISTI, L. F. Z. et al. Soil chemical attributes in a high biodiversity silvopastoral system. **Acta Agronomica**, v.67, n.4, p.486-493, 2018.

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do solo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BAYER, C. et al. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um latossolo vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.7, p.677-683, 2004.

BÉLANGER, G. et al. Shoot growth and phosphorus–nitrogen relationship of grassland swards in response to mineral phosphorus fertilization. **Field Crops Research**, v.204, p.31-41, 2017.

BERNARDI, A. C. C. et al. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v.32, n.1/2, p.211-227, 2015

BERNOUX, M. et al. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, n.3, p.888-896, 2002.

BÖHM, W. In situ estimation of root length at natural soil profiles. **Journal of Agricultural Science**, v.87, p.365-368, 1976.

BOSI, C. et al. Produtividade e características biométricas do capim-braquiária em sistema silvipastoril. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.6, p.449-456, 2014.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 686 pgs.

CALDAS, A.M. **Solos, antropização e morfometria da microbacia do prata, Recife-PE**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

CHEN, C. et al. Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: Implications for land use. **Geoderma**, v.299, p.13-24, 2017.

COÊLHO, D. L. **Características estruturais e produtivas de *Brachiaria decumbens* Stapf. em monocultivo e em sistemas silvipastoris, na Zona da Mata de Pernambuco**. 2016. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Programa de Pós-graduação em Zootecnia. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, v.44, n.5, p.794-800, 2014.

CUBILLOS, A. M. et al. Effect of the conversion of conventional pastue to intensive silvopastoral systems on edaphic bacterial and ammonia oxidizer communities in Colombia. **European Journal of Soil Biology**, v.72, p.42-50, 2016.

CUNHA, J. C. et al. Quantification of permanent and variable charges in reference soils of the state of Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1162-1169, 2014.

de SÁ, F. A. et al. Fenação de leguminosas tropicais como alternativa para aumentar a segurança alimentar do rebanho. **Revista Electrónica de Veterinaria**, v.18, p.1-15, 2017.

DING, H. et al. **Roots of Prosperity: The Economics and Finance of Restoring Land**. 2017. WRI Washington, DC, USA.

DUBEUX, Jr., J. C. B. et al. Litter mass, deposition rate, and chemical composition in bahiagrass pastures managed at diferente intensities. **Crop Science**, v.46, p.1299-1304, 2006.

DUBEUX JR, J. C. B. et al. Nutrient cycling in warm-climate grasslands. **Crop Science**, v.47, p.915-928, 2007.

DUBEUX JR, J. C. B. et al. Stocking method, animal behavior, and soil nutrient redistribution: how are they linked? **Crop Science**, v.54, p.2341-2350, 2014.

ELEFThERIADIS, A.; TURRIÓN, M. B. Soil microbiological properties affected by land use, management, and time since deforestations and crop establishment. **European Journal of Soil Biology**, v.62, p.138-144, 2014.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo**. 3ª ed. revisada e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 pgs.

EMMET-BOOTH, J. P. et al. GrassVESS: a modification of the visual evaluation of soil structure method for grasslands. **Soil Use and Management**, v.34, p.37-47, 2018.

FRANCHINI, J. C. et al. Yield of soybean, pasture and wood in integrated crop-livestock-forest system in Northwestern Paraná state, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v.45, p.1006-1013, 2014.

FRAZÃO, L. A. et al. Estoques de carbono e nitrogênio e fração leve da matéria orgânica em Neossolo Quartzarênico sob uso agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.10, p.1198-1204, 2010.

FREIRE, J. L. et al. Deposição e composição química de serrapilheira em um bosque de Sabiá. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.39, n.8, p.1650-1658, 2010.

FREITAS, L. et al. Avaliação de atributos químicos e físicos de solos com diferentes texturas sob vegetação nativa. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, v.10, n.18, p.523-534, 2014.

GRACIANO, E.S.A. **Atividade microbiana e decomposição de serapilheira em pastagens consorciadas na zona da mata seca de Pernambuco**. 2013. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-graduação em Agronomia – Ciências do Solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

HARTWIG, I. et al. Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina: Ciências Agrárias**, v.28. n.2, p.219-228, 2007.

HE, Y. et al. A modelling approach to evaluate the long-term effect of soil texture on spring wheat productivity under a rain-fed condition. **Scientific Reports**, v.4, n.5736. p.1-12, 2014.

IPA - Instituto Agronômico de Pernambuco. **Sessão de Índices Pluviométricos**, 2021. Disponível em: http://www.ipa.br/indice_pluv.php#calendario_indices. Acesso em: 06 mar. 2021.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, v.27, p.408-416, 1998.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in mid-atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.55, p.69-78, 2000.

JESUS, G. L. de. et al. Produtividade do eucalipto, atributos Físicos do solo e Frações da Matéria orgânica influenciadas pela intensidade de tráfego e resíduos de colheita. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.4, p.1190-1203, 2015.

KARAM, S. L. et al. Development and evaluation of a nutrient cycling extension for the LANDIS-II landscape simulation model. **Ecological Modelling**, v.250, p.45-57, 2013.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262 pgs.

KUNDE, R. J. et al. Frações físicas da matéria orgânica em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1520- 1528, 2016.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v.1, p.277-294, 1985.

LIMA, H. N. B. et al. Soil attributes of a silvopastoral system in Pernambuco Forest Zone. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v.6, n.1, p.15-25, 2018.

LIMA, M. S. et al. Solos florestais em fragmento de floresta urbana na Mata de Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. **Ciência Florestal**, v.28, n.2, p.542-553, 2018.

LOPES, C. M. et al. Massa de forragem, composição morfológica e valor nutritivo de capim-braquiária submetido a níveis de sombreamento e fertilização. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.69, n.1, p.225-233, 2017.

LOSS, A. et al. Agregação, matéria orgânica leve e carbono mineralizável em agregados do solo. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v.113, n.1, p.1-8, 2014.

MAGALHÃES, R.B. **Aspectos radiculares de espécies arbóreo-arbustivas em sistema agroflorestal e seus efeitos no solo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MAHECHA, L.; ANGULO, J. Nutrient management in silvopastoral systems for economically and environmentally sustainable cattle production: A case study from Colombia. In: WHALEN, J. (Ed.). **Soil Fertility Improvement and Integrated Nutrient Management**. A Global Perspective. Canada: IntechOpen, 2012. p. 201-216.

MAKUMBA, W. et al. Spatial rooting patterns of gliricidia, pigeon pea and maize intercrops and effect on profile soil N and P distribution in southern Malawi. **African Journal of Agricultural Research**, v.4, p.278-288, 2011.

MARCHETTI, M. M.; BARP, E. A. Efeito rizosfera: a importância de bactérias fixadoras de Nitrogênio para o solo/planta – Revisão. **Ignis | Caçador**, v.4, n.1, p.61-71, 2015.

MARTINI, I. C. et al. Propriedades físicas de um Nitossolo sob diferentes usos de exploração agropecuária. **Revista de Agronomia e Medicina Veterinária IDEAU**, v.1, n.1, p.1-12, 2014.

MARTINKOSKI, L. et al. Qualidade Física do Solo Sob Manejo Silvopastoril e Floresta Secundária. **Floresta e Ambiente**, v.24, 2017.

McGOWAN, A. R. et al. Soil organic carbon, aggregation, and microbial community structure in annual and perennial biofuel crops. **Agronomy Journal**, v.111, p.128-142, 2019.

MEIJBOOM, F. W.; HASSINK, J.; VAN NOORDWIJK, M. Density fractionation of soil macroorganic matter using silica suspensions. **Soil Biology & Biochemistry**, v.27, n.8, p.1109-1111, 1995.

MOTT, G. O.; LUCAS, H. L. The design, conduct, and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 6, 1952, Pennsylvania. **Proceedings**. Pennsylvania: State College Press, 1952. p.1380-1385.

NICODEMO, M. L. F.; BORGES, W. L. B.; SOUZA, I. M. D de. Atributos físicos do solo em quarto sistemas de uso da terra em São Carlos, SP. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.13, n.2, 2018.

NICODEMO, M. L. F. **Dinâmica da água em sistemas agroflorestais**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2011. p.36 (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 102).

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Produção de sedimentos pela erosão em entressulcos em três Latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.6, p.541-547, 2011.

OLIVEIRA, A. M. E. et al. Evaluation and comparison of soil under integrated crop- livestock-forest system in the southeast of Gois, Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v.10, n.49, p.4461-4468, 2015.

OLIVEIRA, D. A.; PINHEIRO, A.; VEIGA, M. Effects of pig slurry application on soil physical and chemical properties and glyphosate mobility. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.5, p.1421-1431, 2014.

OLIVEIRA SILVA, M. et al. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.7, p.47838-47855, 2020.

PAGIOLA, S. et al. Paying for the environmental services of silvopastoral practices in Nicaragua. **Ecological Economics**, v.64, n.2, p.374-385, 2007.

PAIVA, A. Q.; ARAUJO, Q. R. **Fundamentos do manejo e da conservação dos solos na região produtora de cacau da Bahia**. In: Valle, R. R. ed. Ciência, tecnologia e manejo do cacauero. 2ª ed. Ilhéus, BA, CEPLAC. pp.115-134, 2012.

PEQUENO, P. L. L. **Noções básicas de uso e manejo do solo**. Porto Velho: EDUFRO, 2013. 59 pgs.

PEREIRA, A. A.; THOMAZ, E. L. Estabilidade de agregados em diferentes sistemas de uso e manejo no município de Reserva-PR. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.7, n.2, p.378-387, 2014.

PEZZOPANE, J. R. M. et al. Microclimate and soil moisture in a silvopastoral system in southeastern Brazil. **Bragantia**, v.74, n.1, p.110-119, 2015.

PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI M., A. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Vitória: Incaper, 2013. 104 pgs.

REINERT, D. J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.5, p.1805-1816, 2008.

RIBEIRO, L. M. et al. Atributos físicos do solo e crescimento de raiz da soja após cultivos de outono-inverno. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v.13, n.1, p.36-43, 2019.

RIMA - Relatório de Impacto Ambiental. **Arco Viário da Região Metropolitana do Recife**, p.36, 2014. Disponível em: http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/rima/rima_arco_recife_skill.pdf. Acesso em: 05 mar. 2021.

RODRIGUES, R. C. et al. Soil microbial biomass in agroforestry system of Northeast Brazil. **Tropical grasslands**, v.3, p.41-48, 2015.

ROSOLEM, C. A.; PIVETTA, L. A. Mechanical and biological approaches to alleviate soil compaction in tropical soils: assessed by root growth and activity (Rb uptake) of soybean and maize grown in rotation with cover crops. **Soil use and Management**, v.33, p.141-152, 2016.

ROSOLEM, C. A.; VICENTINI, J. P. T. M. M.; STEINER, F. Suprimento de potássio em função da adubação potássica residual em um Latossolo vermelho do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.5, p.1507-1515, 2012.

ROTHWELL, S. A.; DODD, I. C. Xylem sap calcium concentrations do not explain liming-induced inhibition of legume gas Exchange. **Plant and Soil**, v.2, p.17-30, 2014.

SÁ, C. O. de. et al. **Glirícidia formas de plantio e cultivo**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012. p.2 (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Folheto, 1).

SANTOS, A. M. G. et al. Animal performance in grass monoculture or silvopastures using tree legumes. **Agroforestry Systems**, v.94, p.615-626, 2019.

SANTOS, D. C. et al. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, v.43, n.5, p.838-844, 2013.

SANTOS, H. G. dos. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed., rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 pgs.

SARTO, M. V. M. et al. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. **Applied Soil Ecology**, v.145, 2020.

SEIDEL, E. P. et al. Evaluation of aggregate distribution and selected soil physical properties under maize jack bean intercropping and gypsum rates. **African Journal of Agricultural Research**, v.12, n.14, p.1209-1216, 2017.

SIGNOR, D. et al. Estoques e qualidade da matéria orgânica do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.5, p.1402-1410, 2014.

SILVA, A. S. et al. Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciência Rural**, v.44, n.10, p.1783-1789, 2014.

SILVA, P. L. F. et al. Water availability in a planosol under integrated crop-livestock-forestry system in the agreste region of Paraíba, Brasil. **Revista Caatinga**, v.32, n.2, p.449-457, 2019.

SISTI, C. P. J. et al. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.76, n.1, p.39-58, 2004.

SIX, J. et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal**, v.70, p.555-569, 2006.

SOARES, E. M. B. et al. Soil organic matter fractions under second-rotation Eucalyptus plantations in Eastern Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, v.41, n.1, p.1-11, 2017.

SOARES FILHO, C. V. et al. Root system and root and stem base organic reserves of pasture Tanzania grass fertilizer with nitrogen under grazing. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, n.5, p.2415-2426, 2013.

SOBRAL, L. F. et al. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solo**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. p.13 (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 206).

SOLLENBERGER, L. E. et al. Reporting forage allowance in grazing experiments. **Crop Science**, v.45, n.3, p.896-900, 2005.

SOUZA, A. G. V. et al. **Cultivo de diferentes gramíneas, biomassa microbiana e carbono orgânico total em um sistema silvipastoril**. In: XIV Semana de Ciências Agrárias e V Jornada de Pós-Graduação em Produção Vegetal Produção Agrícola e Florestal: Tecnologias e seus desafios Universidade Estadual de Goiás – Campus Ipameri, set. 2017.

SPERA, S. T. et al. Atributos físicos de um Hapludox em função de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP), sob plantio direto. **Revista Acta Scientiarum Agronomy**, v.32, n.1, p.37-44, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 pgs.

TEZOLIN, T. A. et al. Atributos físicos do solo em diferentes sistemas de produção agropecuária. **Research, Society and Development**, v.10, n.1, 2021.

TOMAZI, M. **Estabilidade da matéria orgânica em Latossolos do Cerrado sob sistemas de uso e manejo**. 2008. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do solo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TORRES, J. L. R. et al. Alterações nos atributos físicos do solo em função da irrigação e do pastejo rotacionado. **IRRIGA**, v.18, n.3, p.558-571, 2013.

VALADÃO JÚNIOR, D. D.; VALADÃO, F. C. A.; SILVA, G. J. Atributos físicos e matéria orgânica de um Latossolo sob diferentes manejo. **Cultura Agrônômica: Revista de Ciências Agrônômicas**, v.26, n.3, p.237-250, 2017.

VEZZANI, F.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista brasileira de ciência do solo**, v.33, n.4, p.743-755, 2009.

VOLIKOV, A. B. et al. Silanized humic substances act as hydrophobic modifiers of soil separates inducing formation of water-stable aggregates in soils. **Catena**, v.137, p.229-236, 2016.

WANG, J. G. et al. Estimating the influence of related soil properties on macro-and micro-aggregate stability in ultisols of south-central China. **Catena**, v.137, p.545-553, 2016.

WHITE, P. M.; RICE, C. W. Tillage effects on microbial and carbon dynamics during plant residue decomposition, **Soil Science Society of America Journal**, v.73, n.1, p.138-145, 2009.

WU, X. et al. Spatial variations of aggregate stability in relation to sesquioxides for zonal soils, South-central China. **Soil and Tillage Research**. v.157, p.11-22, 2016.

YAN, Y. et al. Effect of greenhouse soil management on soil aggregation and organic matter in northeast China. **Catena**. v.133, p.412-419, 2015.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of American Society of Agronomy**, v.28, p.337-351, 1936.

ZHANG, W. et al. Temporal and spatial distribution of roots as affected by interspecific interactions in a young walnut/wheat alley cropping system in northwest China. **Agroforestry Systems**, v.89, n.2, p.327-343, 2014.

ZHOU, H. et al. Changes in microbial biomass and the metabolic quotient with biochar addition to agricultural soils: A Meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.239, p.80-89, 2017.

ZHU, G. et al. Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon and nitrogen in natural restoration grassland and Chinese red pine plantation on the Loess Plateau. **Catena**, v.149, p.253-260, 2017.

CAPÍTULO II

Atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) submetida a diferentes densidades de plantio, frequências e intensidades de corte no Sertão de Pernambuco, Brasil

Atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) submetida a diferentes densidades de plantio, frequências e intensidades de corte no Sertão de Pernambuco, Brasil

RESUMO

O manejo do cultivo da palma forrageira pode afetar o crescimento do sistema radicular e influenciar atributos do solo. Deste modo, objetivou-se avaliar atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.), submetida a diferentes densidades de plantio, frequências e intensidades de corte no Sertão de Pernambuco. O experimento foi realizado na Estação Experimental de Arcoverde do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA). O cultivar avaliado foi a palma Orelha de Elefante Mexicana e o experimento foi estabelecido em junho (estação chuvosa) de 2011. O delineamento experimental foi de parcelas subdivididas em blocos ao acaso, em que a parcela principal foi formada pelas diferentes densidades de plantio (1,80 x 0,10 m; 1,80 x 0,20 m; 1,80 x 0,40 m; 1,80 x 0,80 m) e as subparcelas, pelo arranjo fatorial entre frequências (colheita anual e bienal) e intensidades de corte (preservação de cladódios mãe ou primários após colheita). Foram coletadas amostras para análises de estoque de raízes; físicas do solo, incluindo densidade do solo (Ds), diâmetro médio ponderado (DMP) e geométrico (DMG) do solo; químicas do solo, a partir de potencial hidrogeniônico (pH), fósforo disponível (P), íons cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), alumínio (Al^{3+}) e hidrogênio (H^+) e teor e estoque de carbono (C) e nitrogênio do solo (N) nas profundidades 0-10 e 10-20 cm e fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS) na profundidade 0-10 cm. As coletas de amostras para análises experimentais foram realizadas em agosto de 2019, mas para análises de estoque de raízes e Ds ocorreram também em setembro de 2021. Não foram verificados efeitos significativos em relação ao estoque de raízes nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, sendo os valores médios experimentais de 12,45 t ha⁻¹ e 6,06 t ha⁻¹, respectivamente, nem quanto à Ds nesta maior profundidade ($p>0,05$), cujo valor médio foi de 1,28 g cm⁻³. Todos os solos experimentais apresentaram Ds em níveis satisfatórios para o desenvolvimento da palma forrageira. Todos os solos experimentais tiveram relação C/N<20. Não há influência da densidade de plantio, da frequência e intensidade de corte sobre a fração mineral do solo nem sobre a fração pesada da MOS cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana, mas quanto à fração leve da MOS, a maior densidade de plantio (55555 plantas ha⁻¹) influencia para menores valores médios.

Palavras-chave: cactácea, manejo, massa seca de raízes da palma, semiárido.

Soil and root system attributes of forage cactus (*Opuntia stricta* Haw. Cv. ‘Orelha de Elefante Mexicana’), managed at different planting density, frequency, and harvest intensity in the Sertão region of Pernambuco, Brazil

ABSTRACT

The management of forage cactus cultivation can affect the growth of the root system and influence soil attributes. Thus, the objective of this work was to evaluate soil and root system attributes of forage cactus (*Opuntia stricta* Haw. Cv. ‘Orelha de Elefante Mexicana’), managed at different planting density, frequency, and harvest intensity. The experiment was carried out at the Arcoverde Experimental Station of Agronomic Institute of Pernambuco (IPA). The cultivar evaluated was Orelha de Elefante Mexicana and the experiment was established in June (rainy season) 2011. The experimental design was split-plot in a randomized complete block design, where the main plot was formed by different planting densities (1.80 x 0.10 m; 1.80 x 0.20 m; 1.80 x 0.40 m; 1.80 x 0.80 m) and the subplots, by the factorial arrangement between frequencies (annual and biennial harvest) and harvest intensities (preservation of mother or primary cladodes after harvest). Samples were collected to analysis of roots stock; soil physics such as soil bulk density (BD), weighted mean diameter (WMD) and geometric (WMG) of soils; chemical analyzes included pH, available phosphorus (P), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), aluminum (Al^{3+}) and hydrogen (H^+) ions and content and stock of soil carbon (C) and nitrogen (N) at 0-10 and 10-20 cm depths; physical fractionation of soil organic matter (SOM) at 0-10 cm depth. Sample collections for experimental analyzes were carried out in August 2019, but for roots stock and soil BD analyzes also took place in September 2021. There were no significant effects in relation to the roots stock at 0-10 and 10-20 cm depth, being the experimental mean values 12.45 t ha⁻¹ and 6.06 t ha⁻¹, respectively, nor for the soil BD at this greater depth ($p>0.05$) whose mean value was 1.28 g cm⁻³. All experimental soils presented BD at satisfactory levels for the development of forage cactus. All experimental soils had a C/N ratio <20. There is no influence of planting density, frequency and harvest intensity on the soil mineral fraction nor on the heavy fraction of SOM cultivated with forage cactus Orelha de Elefante Mexicana, but as for the light fraction of SOM, the higher planting density (55555 plants ha⁻¹) influences to lower average values.

Keywords: cactus, management, forage cactus roots dry mass, semiarid.

1. INTRODUÇÃO

A palma forrageira tem sido considerada como um recurso forrageiro importante cultivado e utilizado na base alimentar dos rebanhos, especialmente em regiões áridas e semiáridas, chegando a compor até 80% das dietas (MARQUES et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2018). Conforme Santos et al. (2016), o uso da palma reduz a área necessária para manter uma unidade animal na Caatinga, o que é de grande importância, dado a diminuição de tamanho das propriedades na região semiárida, assim como as pressões sociais cada vez mais crescentes na preservação da Caatinga. O seu sistema radicular apresenta quatro tipos de raízes (e.g. raízes absorventes, estruturais, esporão e aréolas), que são importantes para o melhor aproveitamento da água em solos com baixa umidade (DUBEUX JÚNIOR et al., 2010; JARDIM et al., 2020).

Porém, para externar seu potencial de crescimento e alta eficiência de uso de água, práticas de manejo adequadas devem ser utilizadas, pois alto potencial de extração de nutrientes pela cultura da palma forrageira fica evidente em estudos sobre o tema, que têm mostrado mudanças quantitativas em resposta aos diferentes manejos de fertilização (SOUZA et al., 2017), frequência e intensidade de corte (ALVES et al., 2007), espaçamento e densidade de plantas (SOUZA et al., 2017), espécie/cultivar cultivada (CAVALCANTE et al., 2014), condições edáficas e climáticas para cultivo (NOBEL et al., 1987) e resistência ao ataque de pragas e doenças (SILVA et al., 2014).

Santos et al. (2013) informaram que a produtividade da população intermediária equivalente a 13889 plantas ha⁻¹ de palma forrageira apresentou produtividade próxima da população mais alta, associada ao fato de que populações intermediárias necessitam de uma menor quantidade de raquetes para a implantação do palmal, além de facilitar a realização de tratamentos culturais durante o cultivo. E Mello et al. (2019) indicaram que a competição de plantas pode diminuir a taxa de crescimento individual de plantas.

O intervalo de corte também é um aspecto de manejo importante, já que o mesmo influencia nas características morfológicas dos cladódios e na estrutura da planta (ROCHA; VOLTOLINI; GAVA, 2017). Em levantamento realizado por Ramos et al. (2014), 52,9% dos produtores realizavam a colheita com frequência entre 2 e 3 anos, enquanto 35,3% faziam com menos de um ano e 11,8% colhiam com mais de três anos. Já quanto à intensidade de corte, a preservação de área de cladódio residual maior promove rebrota mais vigorosa e também maior longevidade do palmal (SANTOS et al., 2020).

Entre as cultivares de palma utilizada no Nordeste do Brasil, destaca-se a Orelha de Elefante Mexicana pela sua resistência à cochonilha do carmim (SILVA et al., 2015). Ao

avaliarem os efeitos de três diferentes intensidades de corte sobre as respostas morfológicas e produtivas da palma forrageira cv. Orelha de Elefante Mexicana em um ciclo de 12 meses, recebendo irrigação suplementar, Pereira et al. (2020) constataram que os melhores resultados para altura e largura de planta, número total de cladódios, índice de área de cladódio, produção de massa seca, taxa de acúmulo de forragem e a eficiência no uso da água foram obtidos quando se preservou os cladódios primários e secundários no momento da colheita em detrimento do corte no cladódio mãe. Entretanto, aspectos do solo e do sistema radicular da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana precisam ser mais avaliados.

A hipótese foi que densidade de plantio intermediária, frequência de corte bienal e intensidade de corte com preservação de cladódios primários da palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) contribuem para benefícios de atributos do solo e do sistema radicular vegetal. E o objetivo foi avaliar atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ submetida a diferentes densidades de plantio, frequências e intensidades de corte no Sertão de Pernambuco.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2. 1. Descrição local e estabelecimento do experimento

O experimento de campo foi realizado na Estação Experimental de Arcoverde do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) (08°25'S, 37°04'O, 681 m de altitude), no semiárido pernambucano, Brasil, com temperatura máxima média de $29,5 \pm 2,6$ ° C e mínima média de $18,5 \pm 1,3$ °C e precipitação média anual de 650 mm (INMET, 2017). Na figura 1, está expressa a distribuição da precipitação pluviométrica total mensal nos anos de 2019 e 2021.

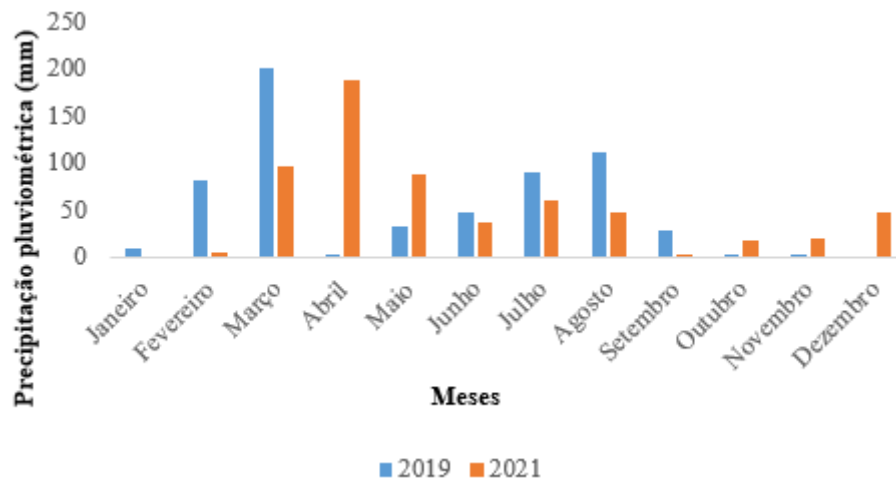


Figura 1. Precipitação pluviométrica (mm mês⁻¹) no Município de Arcoverde-PE, nos anos de coletas de amostras experimentais. Fonte: IPA (2022).

O solo predominante é classificado como Neossolo Regolítico (SANTOS, 2017). O cultivar avaliado foi a palma ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) e o experimento foi estabelecido em junho (estação chuvosa) de 2011 (AMORIM, 2015). E também foram coletadas amostras de solos em área de mata nativa remanescente, localizada nesta Estação experimental.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso em arranjo de parcelas subdivididas com quatro repetições, sendo a parcela principal formada pelas diferentes densidades de plantio/espacamento e as subparcelas, pelo arranjo fatorial entre frequências (colheita anual ou colheita bienal) e intensidades de corte (preservação de cladódios mãe ou primários após colheita). Foram testados os espaçamentos 1,80 x 0,10 m; 1,80 x 0,20 m; 1,80 x 0,40 m; 1,80 x 0,80 m para a palma forrageira, correspondendo a cerca de 55.555; 27.777; 13.888; e 6.944 plantas ha⁻¹, respectivamente.

Cada parcela principal mediu 10,8 x 8,0 m, cada subparcela mediu 5,4 x 8,0 m e cada subsubparcela, 5,4 x 4 m. Em cada subsubparcela foram estabelecidas três fileiras de palma no espaçamento de 1,8 m entre fileiras. Para parcela com densidade de plantio de 1,8 x 0,8 m, a área útil de amostragem correspondeu a 4,32 m² e quanto às demais densidades de plantio, correspondeu a 5,76 m².

Foi realizada adubação anual de 20 t ha⁻¹ de esterco bovino não curtido (base na matéria orgânica [MO]) por ocasião do plantio e colheita, proveniente da própria Estação Experimental do IPA e 200 kg de N parcelados em duas aplicações, sendo a primeira no início do período chuvoso e a segunda no meio desse mesmo período. A fonte de nitrogênio mineral usada foi a ureia CO(NH₂)₂, (45% de N). Este nível, apesar de aparentemente alto para uma região semiárida, é compatível com a extração de nutrientes pelo cultivo de palma adensada no semiárido de Pernambuco bem como com a taxa de decomposição de esterco (DUBEUX JUNIOR; SANTOS, 2005). Tais aplicações ocorreram entrelinha (EL) do cultivo da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana e na superfície do solo.

Antes de realizar a adubação, foram analisados os teores de macro e micronutrientes das diferentes fontes de esterco, segundo metodologia de Silva e Queiroz (2002). Após o plantio da palma, foi efetuado o controle de plantas daninhas por meio de capina, quando necessário.

2. 2. Coleta e processamento de amostras

Em cada unidade experimental foram coletadas amostras, sendo duas entre fileiras do palmal e duas entre palmas da mesma fileira.

Para fins de análises físicas de densidade aparente e real do solo, composição granulométrica, argila natural e grau de floculação para caracterização da área experimental e da mata nativa, as amostras foram coletadas nas profundidades de solos de 0-10 e 10-20 cm e confeccionadas amostras compostas de cada profundidade edáfica e bloco da área experimental e de cada profundidade e cada um de três locais representativos da mata nativa. Já para análises experimentais de estoque de raízes, densidade do solo (Ds), caracterização dos agregados do solo e química do solo as amostras também foram coletadas nas profundidades 0-10 e 10-20 e elaboradas amostras compostas de cada profundidade, tratamento e bloco experimental para análises químicas e de cada profundidade e tratamento experimental para caracterização dos agregados do solo. E quanto às análises de fracionamento físico da MOS, as amostras foram coletadas na profundidade 0-10 cm e elaboradas amostras compostas de cada tratamento e bloco experimental. Na área de mata nativa houve como referência espécies arbóreas/arbustivas.

As coletas de amostras para análises experimentais foram realizadas em agosto de 2019, mas para análises de estoque de raízes e densidade do solo ocorreram também em setembro de 2021. E os equipamentos usados e os laboratórios em que as amostras foram encaminhadas foram os mesmos descritos no capítulo I e as amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) para determinação de teor de C e N de solos foram transportadas para o Laboratório de solos e plantas do Centro Educacional e de Pesquisa do Norte da Flórida, da Universidade da Flórida, em Marianna, Estados Unidos da América.

2. 3. Análises laboratoriais

2. 3. 1. Análise nos sistemas radiculares vegetais

A partir da massa de solo com raízes e da densidade do solo, nas diferentes profundidades, calculou-se o volume de solo coletado, permitindo, assim, o cálculo das quantidades proporcionais de massa de raízes secas extraídas por volume de solo amostrado. As raízes foram separadas do solo pela lavagem com jato de água, em peneiras, segundo Böhm (1976), e levadas para secagem em estufa com circulação forçada de ar, a 70 °C até massa constante das amostras. Posteriormente, as raízes foram separadas do solo, com auxílio de pinça e procedeu-se a pesagem em balança analítica, determinando-se a massa radicular seca. Em seguida, os valores foram convertidos em hectares ($t MS ha^{-1}$) utilizando a densidade aparente e a massa de solo coletada.

2. 3. 2. Análises físicas de solos

A composição granulométrica, argila natural e grau de flocculação, assim como D_s , obtida por meio do método da proveta (caracterização da área experimental) e também através do método do cilindro volumétrico, foram determinados conforme metodologia da EMBRAPA (2017).

A caracterização dos agregados do solo foi realizada a partir de peneiramento via úmida (YODER, 1936). Os agregados usados foram retidos na peneira de 4,70 mm e submetidos ao processo de peneiramento, sendo usados 25 g em cada um de três conjuntos de peneiras de malhas 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm e 0,105 mm, em oscilador vertical. A distribuição dos agregados por classe de diâmetro foi expressa pelo diâmetro médio ponderado (DMP) e pelo diâmetro médio geométrico (DMG).

2. 3. 3. Análises químicas de solos

O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado em água (H₂O) na relação 1:2,5; acidez potencial (H+Al) extraídos com acetato de cálcio 1,0 mol L⁻¹ a pH 7,0 e determinado por titulação; cátions trocáveis de cálcio (Ca⁺²), magnésio (Mg⁺²) e alumínio (Al⁺³) extraídos com KCl 1,0 mol L⁻¹ e determinados por titulação; potássio (K⁺), sódio (Na⁺) e fósforo (P) foram extraídos com Mehlich⁻¹ (HCl 0,05 mol L⁻¹ e H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹), sendo os íons K⁺ e Na⁺ determinados por fotometria de chama e o P por colorimetria na presença de ácido ascórbico, via metodologias propostas pela EMBRAPA (2017). E a partir dos valores de acidez potencial, bases trocáveis e Al⁺³ trocável foram calculados a capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB), saturação por bases (V) e saturação por Al⁺³ (m).

Teores de C e N total do solo foram determinados por meio de combustão seca (CHNS) em analisador elementar. E estoques de C e N foram obtidos de acordo com Bernoux et al. (2002) e seus valores corrigidos pelo método da massa fixa, conforme Sisti et al. (2004).

2. 3. 4. Fracionamento físico da MOS

Determinado conforme metodologia proposta por Meijboom, Hassink e Van Noordwijk (1995) e adaptada por Dubeux Jr. et al. (2006).

2. 4. Análises estatísticas

Dados de caracterização física da área experimental, da mata nativa e também dos agregados do solo foram expressos via médias e desvios padrões amostrais.

Dados de raízes, Ds, química do solo e fracionamento físico da matéria orgânica do solo foram analisados com utilização do PROC GLIMMIX do SAS, na versão 9.4. Para dados de raízes e Ds, a densidade de plantio, frequência e intensidade de corte e ano foram considerados efeitos fixos. O bloco e suas interações com os efeitos fixos foram considerados aleatórios. Anos foram considerados medidas repetidas. Quanto às variáveis químicas do solo e de fracionamento físico da MOS, a densidade de plantio, frequência e intensidade de corte foram considerados efeitos fixos. O bloco e suas interações com os efeitos fixos foram aleatórios. Os LSMEANS foram considerados estatisticamente diferentes ao nível de p<0,05 de acordo com o procedimento PDIFF ajustado pelo teste Tukey. Contrastes polinomiais foram testados ao nível de significância de 5% para determinar efeitos, utilizando o comando *contrast*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estoque de raízes

Para estoque de raízes da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana, não foram verificados efeitos significativos de densidade de plantio, frequência e intensidade de corte nas profundidades 0-10 e 10-20 cm ($p>0,05$).

No entanto, a partir dos valores de g de massa seca de raiz planta⁻¹ verificou-se efeito significativo da população em ambas as profundidades do solo ($p<0,05$). Desse modo, quanto maior a densidade de plantas, menor a massa seca de raiz planta⁻¹. Isso é relevante diante dos períodos de secas severas ocorrentes ciclicamente na região semiárida. Possivelmente, plantas com sistema radicular mais desenvolvido tenham mais chances de sobreviver a esta condição climática.

Assim, faz-se necessário destacar a eficiência no uso da água pela palma forrageira. Mesmo as pequenas precipitações podem ser eficientemente utilizadas pela palma forrageira (SNYMAN, 2006). Isso ocorre devido à superficialidade do sistema radicular da palma, com distribuição horizontal no solo (EDVAN et al., 2013), que possui o papel de absorver água de chuvas leves e até do orvalho, associada a elevada condutividade hidráulica de suas raízes e a existência do tecido parenquimático de armazenamento de água na palma forrageira (BORLAND et al., 2014). Essas condições apresentam-se como uma vantagem para as regiões semiáridas (MARQUES et al., 2017), visto que além dessa forrageira ser um volumoso com grande utilidade na suplementação alimentar dos ruminantes pode ser uma fonte única de água na alimentação dos animais no período seco nessas regiões (CORDOVA TORRES et al., 2017).

Propriedades físicas de solos

Quanto à caracterização da área experimental, foram verificadas altas taxas médias das frações areia na área experimental e na mata nativa em ambas profundidades de solos (Tabela 1). Nessa perspectiva, as frações com maior potencialidade à erosão são as frações silte e areia, sobretudo, areia fina, pois não possuem alta capacidade de agregação, o inverso com a argila, que é a fração mais difícil de remoção, pois possui maior capacidade de agregação. Entretanto, as médias do grau de floculação foram $\geq 70\%$, valores acima do ótimo de 50% recomendado por Goedert (2005), valor que sugere reduzida susceptibilidade à erosão do solo.

Tabela 1. Média \pm desvio padrão amostral de características físicas de amostras de solos, conforme profundidades edáficas (cm) da área experimental e de mata nativa (MN), Arcoverde-PE.

Local	Ds (g cm ⁻³)		Composição granulométrica (%)						
	Aparente	Real	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	AN (%)	GF (%)	CT
Exp. (0-10)	1,22 \pm 0,14	2,54 \pm 0,04	34,75 \pm 2,75	28,0 \pm 2,45	25,75 \pm 1,26	11,5 \pm 1	0,5 \pm 1	96,25 \pm 7,5	FA
Exp. (10-20)	1,27 \pm 0,11	2,54 \pm 0,03	36,50 \pm 1,29	28,5 \pm 1,0	22,0 \pm 2,45	13 \pm 1,63	2 \pm 1,63	85,75 \pm 11,06	FA
MN (0-10)	1,33 \pm 0,04	2,5 \pm 0	47,25 \pm 2,87	20,5 \pm 1,29	14,25 \pm 2,99	18,0 \pm 2	4,50 \pm 1	74,75 \pm 2,5	FA
MN (10-20)	1,33 \pm 0,03	2,5 \pm 0,005	49,75 \pm 4,64	18,0 \pm 0,82	13,75 \pm 3,40	18,5 \pm 1	5,50 \pm 1	70,0 \pm 4,0	FA

Exp. = Experimento; MN = Mata nativa; Ds = Densidade do solo; AN = Argila natural; GF = Grau de flocculação; CT = Classe textural; FA = Franco arenoso.

A classe textural verificada nos solos da área experimental e da mata nativa foi a franco arenosa (Tabela 1), ou seja, um solo franco no qual partículas de areia predominam. Solos de textura franca, também conhecidos como textura média, definem-se como solo com proporções semelhantes de partículas de areia, silte e argila; o que os torna com boa drenagem e capacidade de retenção de água e índice médio de erodibilidade (dependendo do grau de flocculação). E a maioria dos solos do tipo franco arenosos tendem a apresentar deficiências tanto em MO como de fósforo. De modo geral, este tipo de solo necessita de menos cuidados durante seu manejo quando comparado aos solos de textura arenosa (BRADY; WEIL, 2013).

De acordo com o Hybras (2018), para os solos franco arenosos, o valor médio da densidade do solo é 1,51 g cm⁻³, valor médio da propriedade física da base de dados do HYBRAS para a referida classe textural franco arenoso de referência de acordo com o *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) (WRB, 2015). Dessa forma, os resultados obtidos da Ds nesse estudo estão satisfatórios.

Houve menor Ds na área de cultivo da palma manejada com a preservação de cladódios primários em 2019, já no ano de 2021 não houve diferenças significativas ($p > 0,05$) entre intensidades de corte no palmal e tampouco em cada intensidade de corte entre os anos de avaliação ($p > 0,05$), na profundidade 0-10 cm (Tabela 2).

Colheitas bienais preservando os cladódios secundários podem aumentar a longevidade do palmal (FARIAS, SANTOS, DUBEUX JR., 2005; ALVES et al., 2007). Tal manejo resulta em maior índice de área de cladódio (IAC) remanescente após a colheita, o que possibilita às plantas maior eficiência fotossintética. Preservando apenas os artículos primários, a colheita deverá ocorrer de quatro em quatro anos (SILVA; SANTOS, 2006).

Tabela 2. Interação intensidade de corte x ano de amostragem para densidade do solo (Ds, g cm⁻³) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade do solo 0-10 cm, Arcoverde-PE.

Fator	Ds g cm ⁻³	
	Ano de amostragem	
Intensidade de corte	2019	2021
Preservação de cladódios mãe	1,19 Aa	1,12 Aa
Preservação de cladódios primários	1,08 Ba	1,11 Aa
Valor-P	0,03	
Erro padrão	0,02	

Letras maiúsculas distintas na coluna e letras minúsculas distintas na linha indicam diferença significativa ($p < 0,05$).

Santos et al. (2011) verificaram que Orelha de Elefante Mexicana se destacou quanto à produtividade com produção de cerca de 55 t de MS ha⁻¹ ano⁻¹, sendo o corte realizado aos dois anos, conservando-se os cladódios primários e sob condições de sequeiro. Esse manejo é importante para auxiliar as plantas sobreviverem às adversidades climáticas.

Não foram verificados efeitos significativos em relação à Ds na profundidade 10-20 cm ($p > 0,05$). De qualquer forma, a Ds obtida tanto a partir do método do cilindro volumétrico, como via método da proveta (caracterização da área experimental, Tabela 1) ficou abaixo do limite crítico em todos os tratamentos e profundidades avaliados. De acordo com Reichert, Reinert e Braida (2003), este limite crítico para solos franco arenosos (Tabela 1) é de 1,70 a 1,80 g cm⁻³.

Valores médios de DMP dos solos cultivados com palma Orelha de Elefante Mexicana variaram de 2 a 2,66 mm, valores superiores ao mínimo limite crítico de 0,5 mm sugerido por Kiehl (1979), enquanto que de DMG, variaram de 1,12 a 1,4 mm (Tabela 3).

Algo importante especialmente na região semiárida do Nordeste brasileiro, onde muitas áreas estão sofrendo processo de desertificação, visto que os agregados são as unidades básicas da estrutura do solo e regulam as funções ecológicas, como a dinâmica da água no solo, a porosidade do solo, a MOS, a susceptibilidade do solo à erosão e a dinâmica dos nutrientes (CHEN et al., 2017).

Tabela 3. Média \pm desvio padrão amostral de diâmetro médio ponderado do solo (DMP, mm) e diâmetro médio geométrico do solo (DMG, mm) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana, Arcoverde-PE.

	DMP (mm)		DMG (mm)	
	0-10 cm			
	Intensidade de corte			
Densidade plantio (plantas ha⁻¹)	I1	I2	I1	I2
55.555	2,0 ± 0,03	2,31 ± 0,19	1,12 ± 0,01	1,29 ± 0,06
27.777	2,29 ± 0,16	2,64 ± 0,13	1,26 ± 0,06	1,39 ± 0,05
13.888	2,48 ± 0,22	2,37 ± 0,21	1,33 ± 0,09	1,29 ± 0,06
6.944	2,42 ± 0,02	2,13 ± 0,34	1,31 ± 0,01	1,22 ± 0,13
	DMP (mm)		DMG (mm)	
	10-20 cm			
	Intensidade de corte			
Densidade plantio (plantas ha⁻¹)	I1	I2	I1	I2
55.555	2,43 ± 0,08	2,3 ± 0,25	1,33 ± 0,03	1,28 ± 0,10
27.777	2,39 ± 0,14	2,35 ± 0,25	1,28 ± 0,07	1,29 ± 0,11
13.888	2,37 ± 0,36	2,66 ± 0,07	1,30 ± 0,12	1,40 ± 0,02
6.944	2,24 ± 0,36	2,29 ± 0,45	1,26 ± 0,12	1,28 ± 0,15
	DMP (mm)		DMG (mm)	
	0-10 cm			
	Intensidade de corte			
Frequência de corte	I1	I2	I1	I2
Anual	2,30 ± 0,26	2,45 ± 0,22	1,26 ± 0,11	1,33 ± 0,07
Bienal	2,29 ± 0,20	2,26 ± 0,31	1,25 ± 0,08	1,25 ± 0,10
	DMP (mm)		DMG (mm)	
	10-20 cm			
	Intensidade de corte			
Frequência de corte	I1	I2	I1	I2
Anual	2,17 ± 0,23	2,4 ± 0,32	1,22 ± 0,07	1,33 ± 0,11
Bienal	2,55 ± 0,13	2,41 ± 0,31	1,36 ± 0,04	1,3 ± 0,12

I1 = Preservação de cladódios mãe após colheita; I2 = Preservação de cladódios primários após colheita da palma Orelha de Elefante Mexicana.

Agregados do solo também podem ser formados em decorrência das forças físicas do ciclo de umedecimento e secagem, da compressão pelas raízes e da interação da macrofauna com a fase organomineral do solo (SILVA NETO et al., 2016). Em um nível funcional, os agregados do solo desempenham um papel vital na preservação e armazenamento de carbono orgânico no solo a longo prazo (ACAR et al., 2018).

Propriedades químicas de solos

Houve efeito significativo ($p < 0,05$) da frequência de corte quanto ao teor de P do solo (Figura 2), da intensidade de corte para o teor de Na⁺ e m do solo (Figura 3), da frequência x intensidade de corte quanto à CTC do solo (Tabela 4) na profundidade 0-10 cm e os fatores

estudados não contribuíram para efeito significativo ($p>0,05$) nas variáveis pH, Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} , Al^{+3} , H^{+} , V e SB do solo nessa mesma profundidade edáfica.

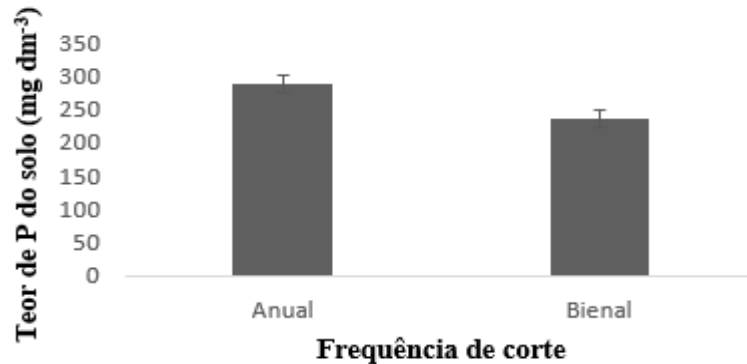


Figura 2. Efeito da frequência de corte ($p=0,03$; erro padrão (EP)=18,94) sobre teor de P do solo (mg dm^{-3}) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

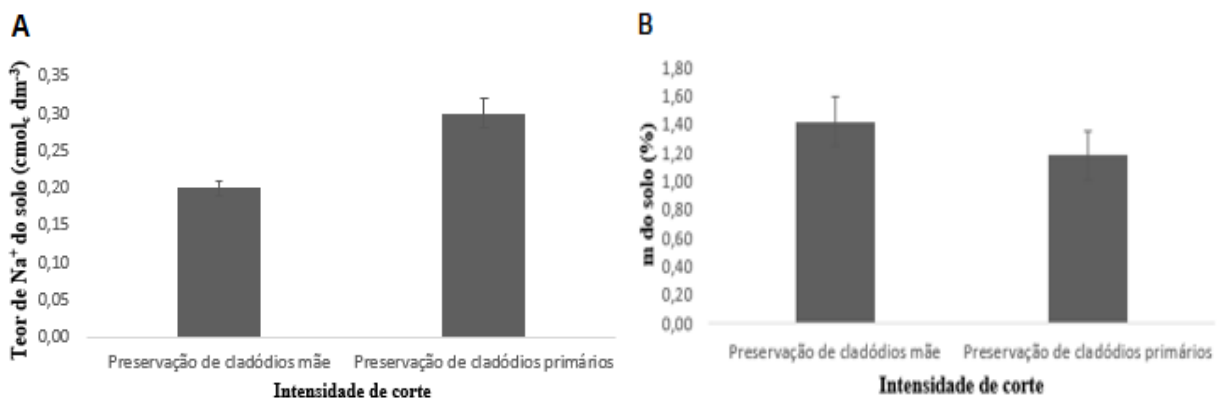


Figura 3. A. Efeito da intensidade de corte ($p=0,0004$; EP=0,02) sobre teor de Na^{+} do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); **B.** Efeito da intensidade de corte ($p=0,03$; EP=0,16) sobre m do solo (%) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

Tabela 4. Interação frequência de corte x intensidade de corte sobre CTC do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE.

Fator	CTC do solo $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$	
	Intensidade de corte	
	Preservação cladódios mãe	Preservação cladódios primários
Frequência de corte		
Anual	15,67 Ab	17,38 Aa
Bienal	16,24 Aa	16,51 Aa
Valor-P	0,02	
Erro padrão	0,71	

Letras maiúsculas distintas na coluna e letras minúsculas distintas na linha indicam diferença significativa ($p<0,05$).

Para as amostras coletadas na profundidade 10-20 cm, observou-se efeito significativo ($p < 0,05$) da frequência de corte para os teores de P, Ca^{+2} e SB do solo (Figura 4), da intensidade de corte para Na^+ do solo (Figura 5) e da densidade de plantio x frequência x intensidade de corte para V do solo (Tabela 5).

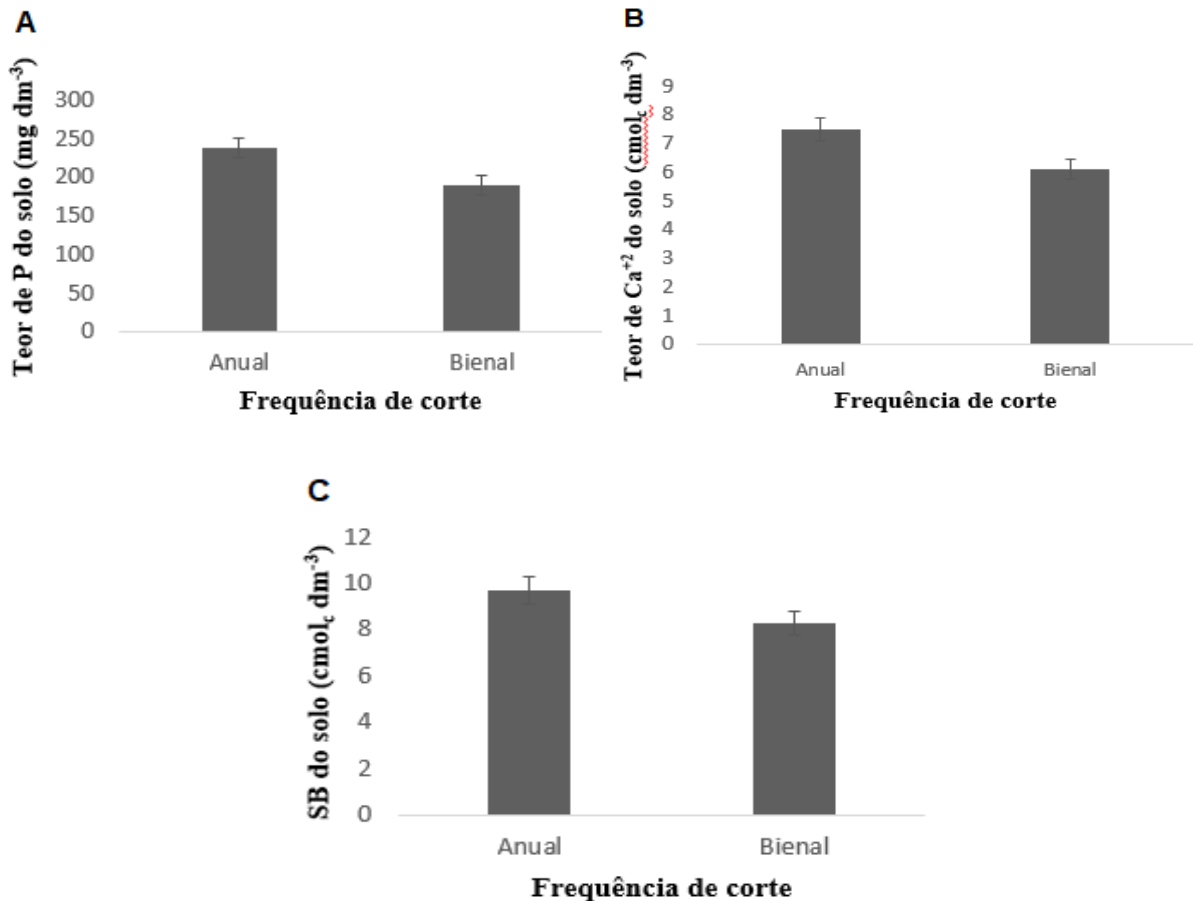


Figura 4. A. Efeito da frequência de corte ($p=0,01$; EP=16,09) sobre teor de P do solo (mg dm^{-3}); B. Efeito da frequência de corte ($p=0,001$; EP=0,37) sobre teor de Ca^{+2} ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) do solo; C. Efeito da frequência de corte ($p=0,001$; EP=0,45) sobre SB do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

A frequência de corte anual contribuiu para aumento do teor de P (Figuras 2 e 4A), Ca^{+2} e SB no solo ($p < 0,05$) (Figura 4B e C, respectivamente), pois cortando a cada dois anos a produtividade é, de modo geral, maior (SANTOS et al., 2011) e, conseqüentemente, a extração de nutrientes como P tende a ser maior. Colheitas mais tardias ou em intervalos maiores promovem plantas mais altas e mais largas, com maior número, comprimento, largura e espessura dos cladódios, características estas que refletem em maiores produções e mudanças na composição química de palma forrageira (GOMES et al., 2018).

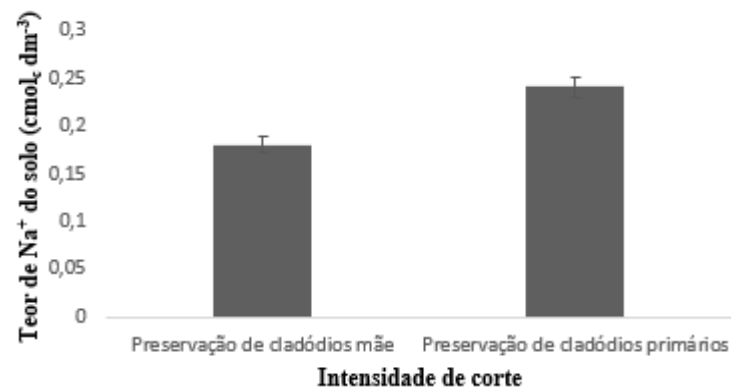


Figura 5. Efeito da intensidade de corte ($p=0,009$; $EP=0,01$) sobre teor de Na^+ do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

Tabela 5. Interação densidade de plantio x frequência de corte x intensidade de corte sobre V do solo (%) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE.

Fator	V do solo %			
	Frequência de corte			
	Anual		Bienal	
Densidade de plantio (plantas ha ⁻¹)	Intensidade de corte		Intensidade de corte	
	Pres. clad. mãe	Pres. clad. 1 ^{os}	Pres. clad. mãe	Pres. clad. 1 ^{os}
6944	64,75 Aa	68,5 Aa	63,0 Aa	56,25 Aa
13888	72,75 Aa	68,0 Aa	63,50 Aa	64,84 Aa
27777	71,0 Aab	73,25 Aa	63,50 Aab	59,0 Ab
55555	63,25 Aa	61,50 Aa	57,25 Aa	62,25 Aa
Valor-P	0,04			
Erro padrão	6,35			

Letras maiúsculas distintas na coluna e letras minúsculas distintas na linha indicam diferença significativa ($p<0,05$).

Os valores médios de pH variaram de 5,02 a 5,67 e de 4,85 a 5,45 nas profundidades 0-10 e 10-20 cm respectivamente, classificando o solo como de acidez elevada (<5) à média (5-6,0) segundo Sobral et al. (2015). A maioria das plantas se desenvolve em faixa de pH entre 5,5 e 7,5. Em valores maiores do que 9 ou menores que 3 o protoplasma da planta cristaliza, impossibilitando seu desenvolvimento (BHUIYAN; RAMAN; HODGKINS, 2017).

Os valores médios de Ca^{+2} do solo foram de 7,76 a 10,2, na profundidade 0-10 cm, enquanto que na de 10-20 cm, a partir de frequência de corte anual foram verificados maiores

valores desse elemento, isto é, $7,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em relação aos obtidos a partir de manejo de frequência de corte bienal ($p < 0,05$) (Figura 4B). No entanto, todos os valores foram classificados como elevados ($> 3,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), de acordo com Sobral et al. (2015).

Teores médios de Mg^{+2} do solo variaram de 1,45 a 2,63 e de 1,2 a 2,17 nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, respectivamente, sendo considerados, portanto, valores elevados ($> 1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), conforme Sobral et al. (2015).

A partir de intensidade de corte com preservação de cladódios primários foram observados maiores resultados de Na^+ do solo, ou seja, $0,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ nas profundidades 0-10 cm e 10-20 cm (Figuras 3A e 5) ($p < 0,05$). Segundo Sobral et al. (2015), teores de sódio nos solos da região semiárida são mais elevados em função da presença de minerais primários devido ao baixo intemperismo.

Valores médios de K^+ do solo variaram de $0,43 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ($168,08 \text{ mg dm}^{-3}$) a $0,66 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ($257,99 \text{ mg dm}^{-3}$) e de $0,33 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ($128,99 \text{ mg dm}^{-3}$) a $0,51 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ($199,35 \text{ mg dm}^{-3}$) nas profundidades 0-10 e de 10-20 cm, respectivamente, enquadrados na classe elevada ($> 60 \text{ mg dm}^{-3}$), conforme Sobral et al. (2015).

Maiores valores de CTC do solo foram obtidos a partir de colheita anual e preservação de cladódios primários ($17,38 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em relação ao manejo de colheita anual e preservação de cladódios mãe ($15,67 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) ($p < 0,05$), na profundidade 0-10 cm (Tabela 4), em que todos os valores obtidos foram classificados como de CTC elevada ($> 15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), segundo Sobral et al. (2015), indicando bom potencial produtivo dos solos, enquanto que na de 10-20 cm, os resultados médios variaram de 9,3 a $20,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, sendo enquadrados como médios ($5,0\text{-}15,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e elevados.

Resultados médios de V variaram de 52 a 97 % na profundidade 0-10 cm, sendo classificados como valores médios (50,0-70,0 %) e elevados (> 70 %) e na profundidade 10-20 cm maiores valores, considerados elevados, foram obtidos a partir da densidade de plantio $1,80 \times 0,20 \text{ m}$, correspondendo a 27778 plantas ha^{-1} em frequência de corte anual do material vegetal preservando cladódios primários (73,25 %) em detrimento da frequência de corte bienal com preservação de cladódios primários (59,0 %) ($p < 0,05$) (Tabela 5).

A preservação de cladódios primários contribuiu para menores valores de m, isto é, 1,18 % ($p < 0,05$) na menor profundidade edáfica (Figura 3B) e na profundidade 10-20 cm, os valores médios variaram de 0 a 5 %. Todos os solos foram classificados como de baixa saturação por alumínio ($< 30,0$ %), de acordo com Sobral et al. (2015). Assim, os valores de alumínio no solo não afetaram o crescimento e desenvolvimento da Orelha de elefante mexicana.

Em relação aos teores de C e N do solo, houve efeito significativo ($p < 0,05$) da densidade de plantio x intensidade de corte nas profundidades 0-10 (Tabela 6) e 10-20 cm e também quanto aos estoques de C e N do solo e C/N a 10-20 cm (Tabela 7). A relação C/N foi afetada pela frequência de corte ($p = 0,0015$, $EP = 0,10$), em que foram obtidos valores médios de 10,51 na frequência anual e 10,82 via frequência bienal, na profundidade 0-10 cm.

Tabela 6. Interação densidade de plantio x intensidade de corte para teores de C e N do solo (g kg^{-1}) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE.

Fator	Teor C do solo g kg^{-1}	
	Intensidade de corte	
Densidade de plantio (plantas ha^{-1})	Preservação cladódios mãe	Preservação cladódios primários
6944	42,52 Aa	46,44 Aa
13888	38,28 Aa	57,47 Aa
27777	45,88 Aa	42,24 Aa
55555	30,10 Ab	54,70 Aa
Valor-P	0,01	
Erro padrão	4,52	
Fator	Estoque C do solo t ha^{-1}	
	Intensidade de corte	
Densidade de plantio (plantas ha^{-1})	Preservação cladódios mãe	Preservação cladódios primários
6944	51,42 Aa	50,59 Aa
13888	46,50 Aa	61,34 Aa
27777	53,83 Aa	46,63 Aa
55555	35,46 Aa	56,66 Aa
Valor-P	0,03	
Erro padrão	5,25	
Fator	Teor N do solo g kg^{-1}	
	Intensidade de corte	
Densidade de plantio (plantas ha^{-1})	Preservação cladódios mãe	Preservação cladódios primários
6944	3,95 Aa	4,28 Aa
13888	3,69 Aa	5,45 Aa
27777	4,35 Aa	3,98 Aa
55555	2,80 Ab	5,12 Aa
Valor-P	0,01	
Erro padrão	0,44	

Fator	Estoque N do solo t ha ⁻¹	
	Intensidade de corte	
Densidade de plantio (plantas ha ⁻¹)	Preservação cladódios mãe	Preservação cladódios primários
6944	4,78 Aa	4,67 Aa
13888	4,49 Aa	5,82 Aa
27777	5,10 Aa	4,40 Aa
55555	3,29 Aa	5,31 Aa
Valor-P	0,03	
Erro padrão	0,53	

Letras maiúsculas distintas na coluna e letras minúsculas distintas na linha indicam diferença significativa ($p < 0,05$).

Na densidade de plantio 1,80 x 0,10 m (55555 plantas ha⁻¹) combinada com a preservação de cladódios primários da palma forrageira, foram verificados maiores teores de C e N do solo em relação à mesma densidade de plantio com preservação de cladódios mãe, na profundidade 0-10 cm ($p < 0,05$) (Tabela 6); pois, manter maior quantidade de artículos da palma forrageira na colheita permite, segundo Alves et al., (2007), maior IAC remanescente após a colheita, o que possibilita maior eficiência fotossintética às plantas e auxilia para estoque de C no solo, visto que um dos processos-chave para a adição de carbono ao solo é a fotossíntese, na qual o CO₂ é combinado com água, utilizando a energia solar para formar carboidratos.

Pereira et al. (2020) mostraram a influência da intensidade de corte no desenvolvimento estrutural da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana, em que as menores intensidades de colheita, preservando os cladódios de segunda ordem, proporcionaram maiores altura e largura da planta, assim como maior número total de cladódios, devido à preservação da área foliar que, conseqüentemente, possui maior área fotossintética, o que possibilita maior assimilação de CO₂, aumentando a produção de novos cladódios. Em relação a produtividade, esses autores verificaram que o manejo com preservação dos cladódios primários contribuíram para maior rendimento de forragem e taxa de acumulação de forragem e a eficiência do uso da água também foi observada por Pereira et al. (2020), em que a intensidade de corte menos intensa elevou a eficiência do uso da água (kg MS ha⁻¹ mm⁻¹).

Já na profundidade 10-20 cm, solos sob densidade de plantio de 1,80 x 0,20 m (27777 plantas ha⁻¹) tiveram maiores teores e estoques de C em relação aos cultivados com densidade de plantio de 1,80 x 0,10 m (55555 plantas ha⁻¹) ambos com preservação de cladódios mãe da palma forrageira ($p < 0,05$) (Tabela 7). Enquanto que solos sob densidade de plantio de 1,80 x 0,20 m (27777 plantas ha⁻¹) tiveram maiores teores e estoques de N em relação aos cultivados

com densidade de plantio de 1,80 x 0,10 m (55555 plantas ha⁻¹) e maiores teores de N também aos com densidade de 1,80 x 0,40 m (13888 plantas ha⁻¹) ambos com preservação de cladódios mãe da palma forrageira (p<0,05) (Tabela 7) e aqueles solos (27777 plantas ha⁻¹ x preservação de cladódios mãe) apresentaram maiores teores e estoques de N em relação aos submetidos à mesma densidade de plantio e também à intensidade de corte com preservação de cladódios primários (p<0,05).

Tabela 7. Interação densidade de plantio x intensidade de corte para teores (g kg⁻¹) e estoques (t ha⁻¹) de C e N e relação C/N do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE.

Fator		Teor C do solo g kg ⁻¹	
		Intensidade de corte	
Densidade de plantio (plantas ha ⁻¹)		Preservação cladódios mãe	Preservação cladódios primários
6944		22,07 ABa	21,0 Aa
13888		19,25 ABa	29,38 Aa
27777		32,86 Aa	21,19 Aa
55555		18,54 Ba	24,15 Aa
Valor-P		0,001	
Erro padrão		2,96	
Fator		Estoque C do solo t ha ⁻¹	
		Intensidade de corte	
Densidade de plantio (plantas ha ⁻¹)		Preservação cladódios mãe	Preservação cladódios primários
6944		28,06 ABa	25,41 Aa
13888		26,09 ABa	36,86 Aa
27777		42,53 Aa	26,27 Ab
55555		23,33 Ba	28,62 Aa
Valor-P		0,003	
Erro padrão		3,81	
Fator		Teor N do solo g kg ⁻¹	
		Intensidade de corte	
Densidade de plantio (plantas ha ⁻¹)		Preservação cladódios mãe	Preservação cladódios primários
6944		1,96 ABa	1,85 Aa
13888		1,79 Ba	2,62 Aa
27777		3,04 Aa	1,92 Ab
55555		1,61 Ba	2,24 Aa

Valor-P	0,0008	
Erro padrão	0,26	
Fator	Estoque N do solo t ha ⁻¹	
Intensidade de corte		
Densidade de plantio (plantas ha⁻¹)	Preservação cladódios mãe	Preservação cladódios primários
6944	2,49 ABa	2,24 Aa
13888	2,43 ABa	3,29 Aa
27777	3,94 Aa	2,38 Ab
55555	2,03 Ba	2,67 Aa
Valor-P	0,002	
Erro padrão	0,34	
Fator	C/N do solo	
Intensidade de corte		
Densidade de plantio (plantas ha⁻¹)	Preservação cladódios mãe	Preservação cladódios primários
6944	11,21 ABa	11,51 Aa
13888	10,72 Ba	11,17 Aa
27777	10,79 ABa	11,05 Aa
55555	12,28 Aa	10,67 Ab
Valor-P	0,008	
Erro padrão	0,33	

Letras maiúsculas distintas na coluna e letras minúsculas distintas na linha indicam diferença significativa ($p < 0,05$).

Em densidade de plantio elevada, as plantas estão mais próximas entre si nas linhas de cultivo, possibilitando que menor quantidade de radiação solar atinja o ponto de crescimento da planta (GARDNER; PEARCE; MITCHELL, 1985).

A relação C/N foi maior em solos sob densidade de plantio de 1,80 x 0,10 m (55555 plantas ha⁻¹) com preservação de cladódios mãe em comparação com solos submetidos à mesma densidade de plantio porém com preservação de cladódios primários e em relação também a solos sob densidade de plantio de 1,80 x 0,40 m (13889 plantas ha⁻¹) com preservação de cladódios mãe ($p < 0,05$) (Tabela 7) na profundidade 10-20 cm. Em todos os solos sob os tratamentos experimentais, a relação C/N foi $< 20,0$, o que pode contribuir para melhoria na ciclagem da MO (WHITE et al., 1988).

Fracionamento físico da MOS

Não foram verificadas diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os tratamentos experimentais em relação à fração mineral de solos e fração pesada da MOS (FP-MOS) na profundidade 0-10 cm, apenas da densidade de plantio quanto à fração leve da MOS (FL-MOS) (Figura 6), visto que esta fração pode se apresentar mais sensível às diferentes formas de utilização do solo em curto período de tempo, sendo considerada indicador da qualidade ambiental (SANTOS et al., 2011).

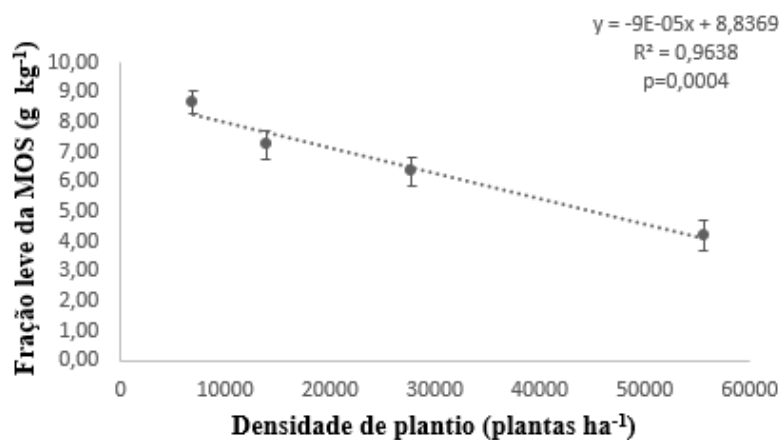


Figura 6. Efeito linear ($p=0,0004$) da densidade de plantio (plantas ha⁻¹) ($p=0,0028$; EP=0,5956) sobre a fração leve da matéria orgânica do solo (FL-MOS, g kg⁻¹) cultivado com palma Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

Maiores valores de FL-MOS foram encontrados nas menores densidades de plantio ($p < 0,05$) (Figura 6). E Amorim (2015), em estudo na mesma área experimental, verificou que maior densidade de plantio (55555 plantas ha⁻¹) influenciou para redução da largura da planta, número, comprimento e largura de cladódios planta⁻¹, altura da planta (de 111,25 cm com 6944 plantas ha⁻¹ para 83,47 cm na maior densidade de plantio). Mendonza et al. (2019) observaram aumento de comprimento e largura de cladódio e índice de área de cladódio de *Nopalea cochenillifera* Salm Dyck) cv. Miúda com o aumento das doses de esterco bovino (10, 20, 30 t de MO ha⁻¹ ano⁻¹) e ocorreu pouco ou nenhum efeito em relação à aplicação de fertilizante mineral nitrogenado (ureia) (120, 240, 360 kg N ha⁻¹ ano⁻¹).

4. CONCLUSÕES

Não há influência da densidade de plantio, frequência e intensidade de corte sobre o estoque de raízes de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana nas profundidades do solo de 0-10 e 10-20 cm.

Apenas a preservação de cladódios primários da palma forrageira contribuiu para menor densidade do solo na profundidade 0-10 cm no ano de 2019, já em 2021 não houve influência da densidade de plantio, nem de frequência e intensidade de corte para tal variável nesta profundidade e nem na de 10-20 cm em ambos anos de avaliação.

Frequência de corte anual contribuiu para maiores teores de P do solo nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, e de Ca^{+2} e soma de bases do solo na profundidade 10-20 cm, enquanto intensidade de corte com preservação de cladódios mãe promove menor teor de Na^+ nas profundidades 0-10 e 10-20 cm e maior m do solo a 0-10 cm.

Densidade de plantio x intensidade de corte influenciam nos teores de carbono e nitrogênio do solo, em ambas profundidades edáficas.

Não há influência da densidade de plantio, da frequência e intensidade de corte sobre a fração mineral do solo nem sobre a fração pesada da matéria orgânica do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana, mas quanto à fração leve da matéria orgânica do solo, a maior densidade de plantio (55555 plantas ha^{-1}) influencia para menores valores médios.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACAR, M. et al. Effects of long-term tillage systems on aggregate-associated organic carbon in the eastern Mediterranean region of Turkey. **Eurasian Journal of Soil Science**, v.7, n.1, p.51-58, 2018.
- ALVES, R. N. et al. Produção de forragem pela palma após 19 anos sob diferentes intensidades de corte e espaçamentos. **Revista Caatinga**, v.20, n.4, p.38-44, 2007.
- AMORIM, S. O. **Características morfológicas e produtivas da palma forrageira cv. Orelha de Elefante Mexicana submetida a diferentes densidades de plantio e intensidades de corte no semiárido pernambucano**. 2015. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Programa de Pós-graduação em Zootecnia. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- BERNOUX, M. et al. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, n.3, p.888-896, 2002.
- BHUIYAN, M. S. I.; RAMAN, A.; HODGKINS, D. S. Plants in Remediating Salinity-affected Agricultural Landscapes. **Proceedings of the Indian National Science Academy**, v.83, n.1, p.51-66, 2017.
- BÖHM, W. In situ estimation of root length at natural soil profiles. **Journal of Agricultural Science**, v.87, p.365-368, 1976.
- BORLAND, A. M. et al. Climate-resilient agroforestry: physiological responses to climate change and engineering of crassulacean acid metabolism (CAM) as a mitigation strategy. **Plant, Cell & Environment**, v.38, n.9, p.1833-1849, 2014.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 790 pgs.
- CAVALCANTE, L. A. D. et al. Respostas de genótipos de palma forrageira a diferentes densidades de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.44, n.4, p.424-433, 2014.
- CHEN, C. et al. Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: implications for land use. **Geoderma**, v.299, n.1, p.13-24, 2017.
- CORDOVA TORRES, A. V. et al. Performance of sheep fed forage cactus with total water restriction. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.18, n.2, p.369-377, 2017.
- DUBEUX Jr, J. C. B. et al. Adubação mineral no crescimento e composição mineral da palma forrageira – Clone IPA-20. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.5, n.1, p.129-135, 2010.

DUBEUX JUNIOR, J. C. B.; SANTOS, M. V. F. dos. Exigências nutricionais da palma forrageira. In: MENEZES, R. S. C.; SIMÕES, D. A.; SAMPAIO, E. V. S. B. (Ed.). **A palma no Nordeste do Brasil**: conhecimento atual e novas perspectivas de uso. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2005. p.105-128.

EDVAN, R. L. et al. Acúmulo de biomassa e crescimento radicular da palma forrageira em diferentes épocas de colheita. **Revista da Academia de Ciências Agrárias e Ambiental**, v.11, n.4, p.35-43, 2013.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo**. 3ª ed. revisada e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 pgs.

FARIAS, I.; SANTOS, D. C.; DUBEUX JR, J. C. B. Estabelecimento e manejo da palma forrageira. In: MENEZES, R. S. C.; SIMÕES, D. A.; SAMPAIO, E. V. S. B. (Ed.). **A palma no Nordeste do Brasil**: conhecimento atual e novas perspectivas de uso. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2005. p.81-104.

GARDNER, F. P.; PEARCE, R. B.; MITCHELL, R. L. **Physiology of crop plants**. Ames: Iowa State University, 1985. 327 pgs

GOEDERT, W. J. Qualidade do solo em sistemas de produção agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30, 2005, Recife. **Anais**. Recife: SBCS, 2005. Cd-Rom.

GOMES, G. M. F. et al. Chemical composition of cactus pear cladodes under different fertilization and harvesting managements. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v.53, n.2, p.221-228, 2018.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados climáticos da Estação de Arcoverde: série histórica de 1973 a 2016**. Banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (Brasília: INMET). 2017. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>. Acesso em: 05 mar. 2021.

IPA - Instituto Agrônomo de Pernambuco. **Sessão de Índices Pluviométricos**, 2022. Disponível em: http://www.ipa.br/indice_pluv.php#calendario_indices. Acesso em: 06 fev. 2022.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Interaction of agroecosystem intercropped with forage cactus-sorghum in the semi-arid environment: a review. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.5, n.1, p.69-87, 2020.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**: Relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979. 262 pgs.
MARQUES, O. F. C. et al. Palma forrageira: cultivo e utilização na alimentação de bovinos. **Cadernos de Ciência Agrária**, v.9, n.1, p.75-93, 2017.

MEIJBOOM, F. W.; HASSINK, J.; VAN NOORDWIJK, M. Density fractionation of soil macroorganic matter using silica suspensions. **Soil Biology & Biochemistry**, v.27, n.8, p.1109-1111, 1995.

MELLO, A. C. L. et al. Nutrient concentration in spineless cactus under different planting densities and harvesting management. **Acta Horticulturae**, v.1247, p.137-142, 2019.

MENDONZA, P. V. et al. Organic matter fertilization improves morphological variables in *Nopalea cochenillifera* Salm Dyck cv. Miúda grown as forage in Pernambuco, Brazil. **Revista Mexicana de Ciências Pecuárias**, v.10, n.3, p.756-766, 2019.

NOBEL, P. S. et al. Nutrient relations and productivity of prickly pear cacti. **Agronomy Journal**, v.79, n.3, p.550-555, 1987.

OLIVEIRA, J. P. F. et al. Carcass characteristics of lambs fed spineless cactus as a replacement for sugarcane. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v.31, n.4, p.529-536, 2018.

OTTONI, M. V. et al. **HYBRAS**: hydrophysical database for brazilian soils – banco de dados hidrofísicos em solos no Brasil para o desenvolvimento de funções de pedotransferência de propriedades hidráulicas: relatório parcial do projeto Estudos de Caracterização Hidrológica dos Solos, Rio de Janeiro, CPRM, 2018.

PEREIRA, J. S. et al. Morphological and yield responses of spineless cactus Orelha de Elefante Mexicana under different cutting intensities. **Revista Brasileira de Saúde e Produção animal**, v.21, p.1-10, 2020.

RAMOS, J. P. F. et al. Caracterização técnica dos sistemas de produção de palma forrageira em Soledade, PB. **Agropecuária Técnica**, v.35, n.1, p.23-30, 2014.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v.27, n.2, p.29-48, 2003.

ROCHA, R. S.; VOLTOLINI, T. V.; GAVA, C. A. T. Características produtivas e estruturais de genótipos de palma forrageira irrigada em diferentes intervalos de corte. **Archivos de Zootecnia**, v.66, n.255, p.365-373, 2017.

SANTOS, D. C. et al. Estratégias para Uso de Cactáceas em Zonas Semiáridas: Novas Cultivares e Uso Sustentável das Espécies Nativas. **Revista Científica de Produção Animal**, v.15, n.2, p.111-121, 2013.

SANTOS, D. C. et al. Genótipos de palma forrageira para áreas atacadas pela cochonilha do carmim no Sertão Pernambucano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 6, 2011, Búzios. **Anais**. Búzios: SBMP, 2011.

SANTOS, M. C. **Solos do Semiárido do Brasil**. Cadernos do semiárido, 2017. p.60 (Conselho Regional de Engenharia e Agronomia – PE / Academia Brasileira de Ciência Agrônômica).

SANTOS, M. V. F. et al. Manejo de pastagens no semiárido-perspectivas futuras. In: PEREIRA, O. G.; FONSECA, D. M.; RIBEIRO K. G.; CHIZZOTTI, F. H. M. (Eds). **Simpósio sobre manejo estratégico da pastagem**, Viçosa: UFV, 2016. V.8, p.1-36.

SANTOS, M. V. F. et al. **Palma forrageira**. In: FONSECA, D. M.; MARTUSCELLO, J. A. (Eds) Plantas Forrageiras. Editora UFV. p.518-550. 2020.

SANTOS, N. Z. et al. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v.111, n.2, p.208-218, 2011.

SILVA, C. C. F. da; SANTOS, L. C. Palma forrageira (*Opuntia ficus indica* Mill) como alternativa na alimentação de ruminantes. **Revista Eletrônica de Veterinária REDVET**, v.7, n.10, p.1-13, 2006. Disponível em: <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n101006/100609.pdf>. Acesso em: 04 out. 2021.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos**. 3ª ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002. 235 pgs.

SILVA, L. M. et al. Produtividade da palma forrageira cultivada em diferentes densidades de plantio. **Ciência Rural**, v.44, n.11, 2014.

SILVA NETO, E. C. et al. Aggregate formation and soil organic matter under different vegetation types in Atlantic Forest from Southeastern Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, v.37, n.6, 3927-3940, 2016.

SILVA, T. G. F. et al. Crescimento e produtividade de clones de palma forrageira no semiárido e relações com variáveis meteorológicas. **Revista Caatinga**, v.28, n.2, p.10-18, 2015.

SISTI, C. P. J. et al. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.76, n.1, p.39-58, 2004.

SNYMAN, H. A. Root distribution with changes in distance and depth of two-years-old cactus pears *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta* plants. **South African Journal of Botany**, v.72, n.3, p.434-441, 2006.

SOBRAL, L. F. et al. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solo**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. p.13 (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 206).

SOUZA, T. C. et al. Productivity and nutrient concentration in spineless cactus under different fertilizations and plant densities. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.12, p.555-560, 2017.

WHITE, C. S. et al. Nitrogen mineralization-immobilization response to field N or C perturbations: an evaluation of a theoretical model. **Soil Biology and Biochemistry**, v.20, n.1, p.101-105, 1988.

WRB - World Reference Base for Soil Resources, **International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**, World Soil Resources Reports, N.106, FAO, Rome, 2015.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of American Society of Agronomy**, v.28, p.337-351, 1936.

CAPÍTULO III

Atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) submetida a distintos níveis de adubação orgânica e nitrogenada e frequências de corte no Sertão de Pernambuco, Brasil

Atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) submetida a distintos níveis de adubação orgânica e nitrogenada e frequências de corte no Sertão de Pernambuco, Brasil

RESUMO

Uma maneira possível de minimizar problema de queda de fertilidade nos solos de propriedades rurais e reduzir a dependência do uso de fertilizantes químicos em cultivos de palma forrageira é por meio da melhoria do manejo de esterco. Deste modo, o objetivo do trabalho foi avaliar atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) submetida a distintos níveis de adubação orgânica e nitrogenada e frequências de corte no Sertão de Pernambuco. O experimento foi instalado em junho de 2011 na Estação Experimental de Arcoverde do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) e o cultivar avaliado foi a palma Orelha de Elefante Mexicana. O delineamento experimental foi em parcelas subdivididas em blocos ao acaso; as parcelas principais foram constituídas por distintos níveis de adubação orgânica (0, 10, 20 e 30 t ha⁻¹ ano⁻¹), as subparcelas por diferentes níveis de adubação nitrogenada (0, 120, 240 e 360 kg N ha⁻¹ ano⁻¹) e as subsubparcelas, frequências de corte (anual ou bienal) da palma forrageira, em quatro blocos experimentais. Foram coletadas amostras de solos para análises de massa seca de raízes vegetais; físicas do solo, incluindo densidade do solo (Ds), diâmetro médio ponderado (DMP) e geométrico (DMG) do solo; químicas do solo, a partir de potencial hidrogeniônico (pH), fósforo disponível (P), íons cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), sódio (Na⁺), potássio (K⁺), alumínio (Al³⁺) e hidrogênio (H⁺) e teor e estoque de carbono (C) e nitrogênio do solo (N) nas profundidades 0-10 e 10-20 cm e fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS) na profundidade 0-10 cm. As coletas de amostras para análises experimentais de Ds e de massa seca de raízes foram realizadas em agosto de 2019 e em setembro de 2021 e para as demais análises, ocorreram em agosto de 2019. O grau de flocculação médio foi de 92,5% nas profundidades edáficas 0-10 e de 10-20 cm. Houve efeito da frequência de corte (p<0,05) na massa seca de raízes da palma forrageira na profundidade 0-10 cm e a massa radicular variou entre 8,4 e 9,5 t ha⁻¹, com frequência de corte anual e bienal, respectivamente. Porém, não houve efeitos significativos sobre a massa seca de raízes (p>0,05) na profundidade 10-20 cm, cujo valor médio foi de 2,96 t ha⁻¹. A Ds experimental ficou abaixo do limite crítico. Adubação orgânica e nitrogenada de, pelo menos, 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente e frequência de corte bienal contribuem para maior produção de massa seca radicular de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm. No geral, doses de adubo orgânico de 20 e 30 t ha⁻¹ ano⁻¹ contribuem para maiores teores e estoque de carbono e nitrogênio do solo em ambas profundidades edáficas.

Palavras-chave: manejo, profundidade do solo, semiárido, sustentabilidade.

Soil and root system attributes of forage cactus (*Opuntia stricta* Haw. Cv. ‘Orelha de Elefante Mexicana’) managed at different doses of organic and nitrogen fertilization and harvest frequency in the Sertão region of Pernambuco, Brazil

ABSTRACT

A possible way to minimize the problem of fertility decline in the soils of rural properties and reduce dependence on the use of chemical fertilizers in forage cactus crops is through improved manure management. Thus, the objective of this work was to evaluate physical and chemical attributes of soils and root mass of forage cactus (*Opuntia stricta* Haw. Cv. ‘Orelha de Elefante Mexicana’) managed at different levels of organic and nitrogen fertilization and harvest frequency. The experiment was installed in June 2011 at the Arcoverde Experimental Station of Agronomic Institute of Pernambuco (IPA) and the cultivar evaluated was Orelha de Elefante Mexicana. The experimental design was in split-split-plot in a randomized complete blocks, in which the main plots were formed by different doses of organic fertilization (0, 10, 20 and 30 t ha⁻¹ year⁻¹), the subplots by different doses of N fertilization (0, 120, 240 and 360 kg N ha⁻¹ year⁻¹) and the sub-subplots, harvest frequencies (annual or biennial) of forage cactus, in four experimental blocks. Soil samples were collected to analysis of dry mass of plant roots; soil physics such as soil bulk density (BD), weighted mean diameter (WMD) and geometric (WMG) of soils; chemical analyzes included pH, available phosphorus (P), calcium (Ca²⁺), magnesium (Mg²⁺), sodium (Na⁺), potassium (K⁺), aluminum (Al³⁺) and hydrogen (H⁺) ions and content and stock of soil carbon (C) and nitrogen (N) at 0-10 and 10-20 cm depths; physical fractionation of soil organic matter (SOM) at 0-10 cm depth. Sample collections for experimental analyzes of soil BD and root dry mass were carried out in August 2019 and September 2021 and for the other analyses, they took place in August 2019. The average flocculation degree was 92.5% in both soil depths. There was an effect of harvest frequency ($p < 0.05$) on the dry mass of forage cactus roots at 0-10 cm depth, where the root mass ranged from 8.4 to 9.5 t ha⁻¹, with annual and biennial harvest frequencies, respectively. However, there were no significant effects on the dry mass of roots ($p > 0.05$) at 10-20 cm depth, whose average value was 2.96 t ha⁻¹. The experimental soil BD was below the critical limit. Organic and nitrogen fertilization of at least 10 t ha⁻¹ year⁻¹ and 120 kg ha⁻¹ year⁻¹, respectively, and biennial harvest frequency contribute to higher production of root dry mass of forage cactus Orelha de Elefante Mexicana at depth 0-10 cm. In general, organic fertilizer doses of 20 and 30 t ha⁻¹ yr⁻¹ contribute to higher soil carbon and nitrogen contents and stocks at both edaphic depths.

Keywords: management, soil depth, semiarid, sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Para atingir seu potencial produtivo, a palma precisa de cuidados relacionados ao seu cultivo. Controle de plantas daninhas e adubação são práticas essenciais para obtenção de níveis mais elevados de produtividade. Os solos do semiárido brasileiro são heterogêneos, variando quanto à classificação pedológica e, conseqüentemente, propriedades físicas e químicas, entretanto, de modo geral, apresentam deficiência de fósforo e níveis reduzidos de matéria orgânica (MO). Um modo de corrigir tal deficiência é com a aplicação de esterco animal. A palma, de maneira geral, responde positivamente à aplicação desses insumos (GALVÃO JÚNIOR et al., 2014; RAMOS et al., 2015; LÉDO et al., 2019; PADILHA JÚNIOR et al., 2020).

Esses resultados têm encorajado os produtores rurais a fertilizar seus campos de palma forrageira. Nas propriedades que se dedicam à produção animal, há disponibilidade de esterco e parte dos produtores rurais fertilizam com o insumo; mas, determinadas vezes, sem diagnóstico de fertilidade do solo e recomendação técnica (MARQUES et al., 2017).

Considerando teores médios na MS de N, P, K e Ca como sendo de 0,9 %, 0,16 %, 2,58 % e 2,35 %, respectivamente (SANTOS et al., 1990) e admitindo-se uma produtividade de 20 t ha⁻¹ de MS ano⁻¹, a palma extrairia cerca de 180 kg de N, 32 kg de P, 516 kg de K e 470 kg de Ca ha⁻¹ ano⁻¹, sem considerar os outros macro e micronutrientes (DUBEUX JUNIOR; SANTOS, 2005).

Assim, uma maneira possível de minimizar problema de queda de fertilidade nos solos das propriedades rurais e reduzir a dependência do uso de fertilizantes químicos em cultivos de palma forrageira é por meio da melhoria do manejo de esterco, visto que de modo geral, a palma forrageira responde bem à adubação orgânica, e como os solos do semiárido, em sua maioria, apresentam baixo teor de MO, a prática da fertilização é uma necessidade nos cultivos dessa cactácea (SALES et al., 2012). No caso de se optar pela adubação orgânica, pode ser usado esterco bovino ou caprino. Dubeux Junior e Santos (2005) recomendaram a utilização de 10 a 30 t ha⁻¹ de esterco bovino após cada colheita, dependendo do espaçamento de plantio utilizado.

Estudos têm sido realizados quanto à produção na parte aérea da palma forrageira, porém faz-se necessário alocar mais atenção às propriedades do solo e do sistema radicular vegetal em tal sistema produtivo, visto que os atributos físicos do solo, correlacionados com o manejo da cultura da palma podem fornecer subsídios para melhorias nas técnicas de manejo (GUIMARÃES et al., 2016; PEIXOTO et al., 2018), visando o melhor desempenho da cultura.

A hipótese do trabalho foi que adubação orgânica e nitrogenada e frequência de corte bienal da palma ‘Orelha de Elefante Mexicana’ contribuem para benefícios de atributos do solo e do sistema radicular vegetal. Nesse contexto, o objetivo foi avaliar atributos do solo e do sistema radicular de palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) submetida a distintos níveis de adubação orgânica e nitrogenada e frequências de corte no Sertão de Pernambuco.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição local e estabelecimento do experimento

O experimento ocorreu na Estação Experimental do IPA, localizada no município de Arcoverde – PE (08° 25' S, 37° 04' O, 664 m de altitude), no semiárido pernambucano, Brasil, com temperatura máxima média de $29,5 \pm 2,6$ °C e mínima média de $18,5 \pm 1,3$ °C e precipitação média anual de 650 mm (INMET, 2017). A distribuição da precipitação pluviométrica total mensal nos anos de 2019 e 2021 está disposta na figura 1 do Capítulo anterior.

O solo predominante é o Neossolo Regolítico (SANTOS, 2017). Foi utilizada a palma forrageira ‘Orelha de Elefante Mexicana’ (*Opuntia stricta* Haw.) e o experimento foi implantado em junho (estação chuvosa) de 2011. E também foram coletadas amostras de solos na mata nativa remanescente, situada nesta Estação experimental.

O delineamento experimental foi em parcelas subdivididas em blocos ao acaso, em que a parcela principal (16,0 x 10,8 m) foi constituída por distintos níveis de adubação orgânica (0, 10, 20 e 30 t ha⁻¹ ano⁻¹), a subparcela (8,0 x 5,4 m) por diferentes níveis de adubação nitrogenada (0, 120, 240 e 360 kg N ha⁻¹ ano⁻¹) e a subsubparcela (5,4 x 4,0 m) por frequências de corte (anual ou bienal) da palma forrageira, em quatro blocos experimentais, perfazendo um total de 128 unidades experimentais.

Em cada subsubparcela foram estabelecidas três fileiras de palma, seguindo o espaçamento de 1,80 m entre filas e 0,20 m entre plantas. A área útil da parcela correspondeu a fileira central, excluindo-se 0,4 m de cada uma das duas extremidades desta fileira (bordadura). Assim, foram avaliados 3,2 m da fileira central de cada subsubparcela.

As doses de adubo orgânico com base na matéria orgânica (MO) de esterco bovino não curtido, proveniente da própria Estação Experimental do IPA, foram aplicadas uma vez ao ano e após as colheitas, no período chuvoso, no mês de abril. A adubação mineral foi parcelada em duas aplicações anuais, no período chuvoso, uma em fevereiro e outra em maio. A fonte de nitrogênio mineral utilizada foi a ureia CO(NH₂)₂, (45% de N). Tais adubações (orgânica e mineral) vêm sendo realizadas desde 2011 e os adubos aplicados entrelinha (EL) do cultivo da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana e na superfície edáfica.

Além dos tratamentos aplicados, foi realizada adubação de P e K, além de calagem, de acordo com recomendação do Laboratório de Fertilidade de Solos da UFRPE. Foram preservados, por ocasião da colheita, os cladódios primários. E após o plantio da palma, foi efetuado o controle de plantas daninhas por meio de capina, quando necessário.

2. 2. Coleta e processamento de amostras

Em cada unidade experimental foram coletadas amostras, sendo duas entre fileiras do palmal e duas entre palmas da mesma fileira.

Quanto às análises físicas de densidade aparente e real do solo, composição granulométrica, argila natural e grau de flocculação para caracterização da área experimental e da mata nativa, as amostras foram coletadas nas profundidades de solos de 0-10 e 10-20 cm e elaboradas amostras compostas de cada profundidade e bloco da área experimental e de cada profundidade e cada um de três locais representativos da mata nativa. Enquanto que para análises experimentais de estoque de raízes, densidade do solo (Ds), caracterização dos agregados do solo e química do solo, as amostras também foram coletadas nas profundidades 0-10 e 10-20 e confeccionadas amostras compostas de cada profundidade, tratamento e bloco experimental para análises químicas e de cada profundidade e tratamento experimental para caracterização dos agregados do solo. E quanto às análises de fracionamento físico da MOS, as amostras foram coletadas na profundidade 0-10 cm e elaboradas amostras compostas de cada tratamento e bloco experimental. Na área de mata nativa houve como referência espécies arbóreas/arbustivas.

As coletas de amostras para análises experimentais de estoque de raízes e de Ds ocorreram em agosto de 2019 e em setembro de 2021, enquanto que para as demais análises, ocorreram em agosto de 2019. E os equipamentos utilizados e os laboratórios em que as amostras foram encaminhadas foram os mesmos expressos no capítulo I e as amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) para determinação de teor de C e N de solos foram encaminhadas para o Laboratório de solos e plantas do Centro de Educacional e de Pesquisa do Norte da Flórida, da Universidade da Flórida, em Marianna, Estados Unidos da América.

2. 3. Análises laboratoriais

2. 3. 1. Análise nos sistemas radiculares vegetais

A partir da massa de solo com raízes e da densidade do solo nas distintas profundidades, calculou-se o volume de solo coletado, permitindo, deste modo o cálculo das quantidades proporcionais de massa de raízes secas extraídas por volume de solo amostrado. As raízes foram separadas do solo pela lavagem com jato de água, em peneiras, de acordo com Böhm (1976), e levadas para secagem em estufa com circulação forçada de ar, a 70 °C até massa constante das

amostras. Em seguida, as raízes foram separadas do solo, com auxílio de pinça e procedeu-se a pesagem em balança analítica, determinando-se a massa radicular seca. E os valores foram convertidos em hectares ($t MS ha^{-1}$) utilizando a densidade aparente e a massa de solo coletada.

2. 3. 2. Análises físicas de solos

A composição granulométrica, argila natural e grau de flocculação, tal como D_s , obtida pelo método da proveta (caracterização da área experimental) e também através do método do cilindro volumétrico, foram determinados conforme metodologia da EMBRAPA (2017).

A caracterização dos agregados do solo foi realizada através do peneiramento via úmida (YODER, 1936). Os agregados utilizados foram retidos na peneira de 4,70 mm e submetidos ao processo de peneiramento, sendo utilizados 25 g em cada um de três conjuntos de peneiras de malhas 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm e 0,105 mm, em oscilador vertical. A distribuição dos agregados por classe de diâmetro foi expressa pelo diâmetro médio ponderado (DMP) e pelo diâmetro médio geométrico (DMG).

2. 3. 3. Análises químicas de solos

O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado em água (H_2O) na relação 1:2,5; acidez potencial (H+Al) extraídos com acetato de cálcio $1,0 mol L^{-1}$ a pH 7,0 e determinado por titulação; cátions trocáveis de cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}) e alumínio (Al^{+3}) extraídos com KCl $1,0 mol L^{-1}$ e determinados por titulação; potássio (K^+), sódio (Na^+) e fósforo (P) foram extraídos com Mehlich⁻¹ ($HCl 0,05 mol L^{-1}$ e $H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}$), sendo os íons K^+ e Na^+ determinados por fotometria de chama e o P por colorimetria na presença de ácido ascórbico, via metodologias propostas pela EMBRAPA (2017). E a partir dos valores de acidez potencial, bases trocáveis e Al^{+3} trocável foram calculados a capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB), saturação por bases (V) e saturação por Al^{+3} (m).

Teores de C e N total do solo foram obtidos através de combustão seca (CHNS) em analisador elementar. E estoques de C e N foram determinados conforme Bernoux et al. (2002) e seus valores corrigidos pelo método da massa fixa, segundo Sisti et al. (2004).

2. 3. 4. Fracionamento físico da MOS

Determinado conforme metodologia proposta por Meijboom, Hassink e Van Noordwijk (1995) e adaptada por Dubeux Jr. et al. (2006).

2. 4. Análises estatísticas

Dados de caracterização física da área experimental, da mata nativa e também dos agregados do solo foram apresentados através de médias e desvios padrões amostrais.

Dados de estoque de raízes, Ds, química do solo e fracionamento físico da matéria orgânica do solo foram analisados com utilização do PROC GLIMMIX do SAS, na versão 9.4. Para dados de estoque de raízes e Ds, a adubação orgânica e nitrogenada e frequência de corte e ano foram considerados efeitos fixos. O bloco e suas interações com os efeitos fixos foram considerados aleatórios. Anos foram considerados medidas repetidas. Quanto às variáveis químicas do solo e de fracionamento físico da MOS, a adubação orgânica e nitrogenada e frequência de corte foram considerados efeitos fixos. O bloco e suas interações com os efeitos fixos foram aleatórios. Os LSMEANS foram considerados estatisticamente diferentes ao nível de $p < 0,05$ de acordo com o procedimento PDIFF ajustado pelo teste Tukey. Contrastes polinomiais foram testados ao nível de significância de 5% para determinar efeitos, utilizando o comando *contrast*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estoque de raízes

A adubação orgânica (Figura 1) e nitrogenada (Figura 2) contribuíram para aumento do estoque de raízes em relação aos solos não adubados ($p < 0,05$) na profundidade do solo de 0-10 cm.

Com adubação orgânica, o sistema radicular teve um melhor desenvolvimento devido ao maior suprimento de nutrientes. O sistema radicular vegetal está constantemente se renovando, as raízes mortas são decompostas pelos microrganismos do solo, liberando nutrientes e alterando os compostos orgânicos que, além do efeito favorável na estruturação edáfica, também contribui para melhoria das condições químicas, como, por exemplo, aumentando a eficiência da adubação fosfatada e na nutrição das plantas em geral (SALTON; TOMAZI, 2014).

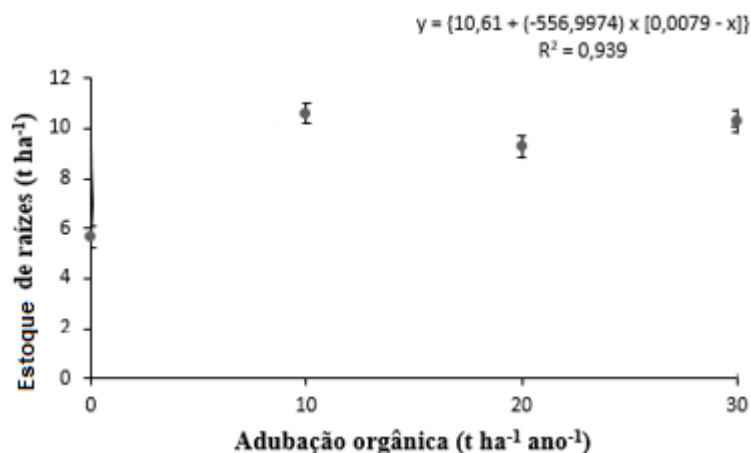


Figura 1. Efeito linear plano da adubação orgânica ($p < 0,0001$; erro padrão (EP)=0,42) sobre o estoque de raízes de palma Orelha de Elefante Mexicana ($t\ ha^{-1}$) na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

Resultados obtidos em estudo realizado com palma forrageira utilizando esterco animal demonstraram incremento de produtividade de palma forrageira, sendo esses achados superiores aos obtidos com o uso isolado de fertilizantes químicos (DUBEUX JUNIOR; SANTOS, 2005).

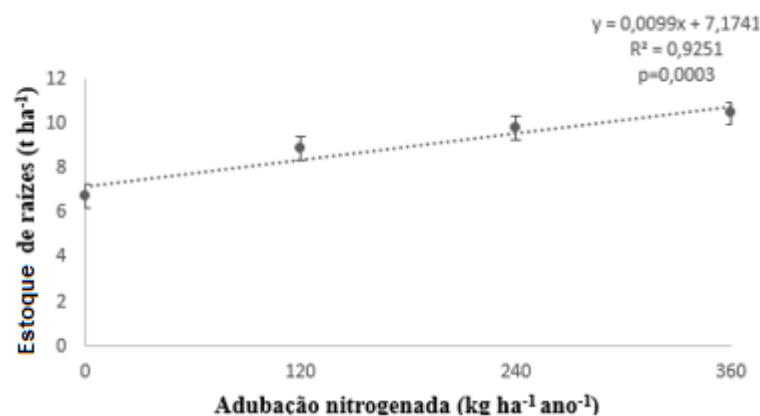


Figura 2. Efeito linear ($p=0,0003$) da adubação nitrogenada ($p\text{-valor}=0,002$; $EP=0,53$) sobre o estoque de raízes de palma Orelha de Elefante Mexicana ($t\ ha^{-1}$) na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

O N fornecido adequadamente, em condições favoráveis para o crescimento das plantas, proporciona aumento da produção da massa seca e do teor de proteína a partir da produção de carboidratos (HAVLIN et al., 2005). Assim, a adição de N reflete na rentabilidade do sistema produtivo, pois o sistema radicular promove inúmeros benefícios como aumento da porosidade edáfica, capacidade de infiltração, aeração e retenção de água no solo (PEREIRA et al., 2016).

Houve efeito significativo da frequência de corte ($p=0,002$; $EP=0,32$) quanto ao estoque de raízes na profundidade 0-10 cm. O estoque radicular foi de 8,4 e 9,54 $t\ ha^{-1}$, com frequência de corte anual e bienal, respectivamente. Contudo, a frequência de corte de dois anos na palma forrageira não se apresenta como uma regra geral, pois ela pode variar de acordo com a necessidade do produtor (SANTOS et al., 2013). Conforme Galvão Júnior et al. (2014), a colheita se inicia com cerca de um ano e meio ou dois anos após o plantio, de modo que esse período pode se estender, a depender do desenvolvimento da cultura sob as condições de solo e clima nela impostas.

Não foram verificados efeitos significativos para o estoque radicular na profundidade 10-20 cm. Em média, o estoque nessa profundidade foi de 2,96 $t\ ha^{-1}$. Zúñiga-Tarango et al. (2009) estudaram desenvolvimento radicular de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. submetida a diferentes dosagens de esterco bovino (100 e 300 $t\ ha^{-1}$) mais uma dose de fertilizante inorgânico, equivalente a 100 $t\ ha^{-1}$ de esterco e profundidades de aplicação de fertilizantes (0-18, 18-36 e 36-54 cm de profundidade). Os autores observaram que o maior desenvolvimento radicular da planta ocorreu na camada edáfica de 0 a 18 cm, o que coincide com os resultados verificados por Zúñiga e Cueto (2001). Aqueles autores verificaram também que naquela profundidade, as plantas desenvolveram até 96% de sua abundância radicular, enquanto que

3% desenvolveram na profundidade de 18 a 36 cm e na camada de 36 a 54 cm, foram encontradas frações muito pequenas de raízes, estimadas em 1%.

Propriedades físicas de solos

A classe textural da área experimental e da mata nativa foi classificada como franco arenosa (Tabela 1). A média do grau de floculação em ambas as profundidades de solo avaliadas foi de 92,5% na área experimental e de 74,75 e 70% nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, respectivamente, na mata nativa, sendo valores acima do ótimo de 50% recomendado por Goedert (2005), que propõe restrita susceptibilidade à erosão edáfica.

Tabela 1. Média \pm desvio padrão amostral de características físicas de amostras de solos, conforme profundidades edáficas (cm) da área experimental e de mata nativa (MN), Arcoverde-PE.

Local	Ds (g cm ⁻³)		Composição granulométrica (%)						
	Aparente	Real	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	AN (%)	GF (%)	CT
Exp. (0-10)	1,32 \pm 0,03	2,52 \pm 0,03	40,25 \pm 2,50	26,5 \pm 1,73	21,25 \pm 0,5	12 \pm 1,15	1 \pm 1,15	92,5 \pm 8,66	FA
Exp. (10-20)	1,34 \pm 0,04	2,51 \pm 0,03	40,25 \pm 3,30	25,75 \pm 1,71	22,0 \pm 1,15	12 \pm 1,15	1 \pm 1,15	92,5 \pm 8,66	FA
MN (0-10)	1,33 \pm 0,04	2,5 \pm 0	47,25 \pm 2,87	20,5 \pm 1,29	14,25 \pm 2,99	18,0 \pm 2	4,50 \pm 1	74,75 \pm 2,5	FA
MN (10-20)	1,33 \pm 0,03	2,5 \pm 0,005	49,75 \pm 4,64	18,0 \pm 0,82	13,75 \pm 3,40	18,5 \pm 1	5,50 \pm 1	70,0 \pm 4,0	FA

Exp. = Experimento; MN = Mata nativa; Ds = Densidade do solo; AN = Argila natural; GF = Grau de floculação; CT = Classe textural; FA = Franco arenoso.

Houve efeito linear positivo da adubação orgânica sobre a Ds tanto na profundidade 0-10 cm (Figura 3A) quanto na de 10-20 cm (Figura 3B). Está historicamente comprovado que a valorização de resíduos agrícolas, como esterco ou resíduos vegetais, melhoram a fertilidade e estrutura do solo, conteúdo de nutrientes, propriedades hidrodinâmicas e atividades biológicas (ZOGHLAMI et al., 2016), auxiliando, portanto, em redução nos valores de Ds.

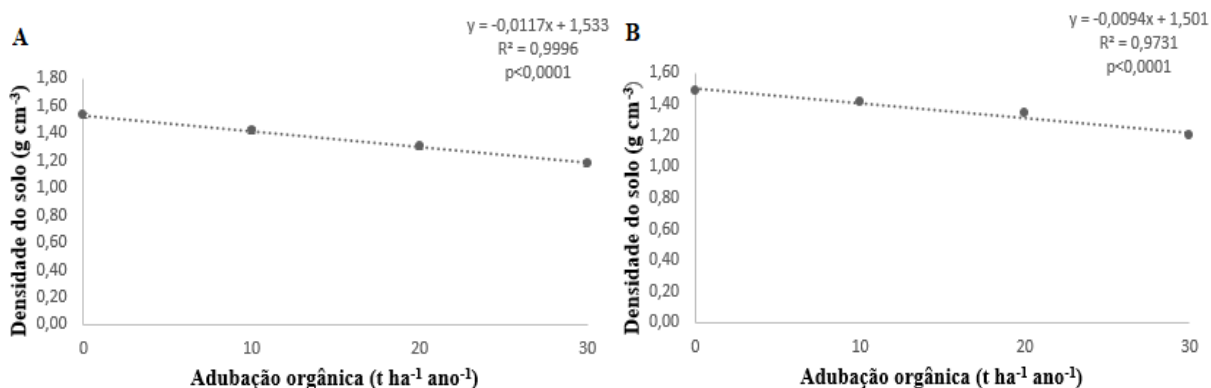


Figura 3. A. Efeito linear ($p < 0,0001$) da adubação orgânica ($p < 0,0001$; $EP = 0,01$) sobre a densidade do solo (D_s , $g\ cm^{-3}$) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE; **B.** Efeito linear ($p < 0,0001$) da adubação orgânica ($p < 0,0001$; $EP = 0,01$) sobre a D_s ($g\ cm^{-3}$) cultivado com palma forrageira Orelha de elefante mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

Souza et al. (2013) destacam que dos cultivadores de palma de um município no semiárido paraibano, 54% utilizam esterco bovino como fonte orgânica de adubação, por ser encontrado com maior facilidade, seguindo de 6% que adubam com esterco caprino e 40% que usam esterco bovino e caprino, juntos.

No ano de 2019, houve menor D_s em solo cultivado com palma Orelha de Elefante Mexicana submetida à frequência de corte bineal ($p < 0,05$), já em 2021 não houve diferença significativa na D_s entre ambas as frequências de corte testadas e nem em cada frequência de corte entre os anos de avaliação ($p > 0,05$), na profundidade 0-10 cm (Tabela 2). A colheita bienal também auxilia na redução dos custos operacionais, visto que a palma forrageira é, de maneira geral, colhida manualmente. Além disso, a palma pode ser colhida em grandes quantidades a fim de reduzir tais custos, pode ser armazenada a sobra, visto que Carvalho et al. (2020) verificaram que o armazenamento pós-colheita por até 60 dias em cultivares de palma não comprometeu a qualidade da forragem.

Tabela 2. Interação frequência de corte x ano de amostragem para densidade do solo (D_s , $g\ cm^{-3}$) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE.

Fator	D _s g cm ⁻³	
	Ano de amostragem	
	2019	2021
Frequência de corte		
Anual	1,38 Aa	1,37 Aa
Bienal	1,32 Ba	1,36 Aa
Valor-P	0,04	
Erro padrão	0,02	

Letras maiúsculas distintas na coluna e letras minúsculas distintas na linha indicam diferença significativa ($p < 0,05$).

A D_s obtida tanto através do método da proveta (caracterização da área experimental, Tabela 1), como via método do cilindro volumétrico (Tabela 2), como ficou abaixo do limite crítico em todos os tratamentos e profundidades avaliados. De acordo com Reichert, Reinert e Braida (2003), este limite crítico para solos franco arenosos (Tabela 1) é de 1,70 a 1,80 $g\ cm^{-3}$.

Valores médios de DMP variaram de 2,75 a 3,13 mm, sendo superiores ao limite mínimo crítico de 0,5 mm proposto por Kiehl (1979), enquanto que de DMG variaram de 1,44 a 1,59 mm (Tabela 3), indicando que os solos apresentaram reduzida erodibilidade.

Em geral, o enriquecimento de solos agrícolas com matéria orgânica (MO) afeta a mineralogia do solo e a distribuição de tamanho de partícula, resultando na cimentação do solo por partículas floculantes para formar agregados estáveis (SHAHBAZ et al., 2017). A MO fornece as condições básicas que suportam as comunidades microbianas no solo (substrato energético para a biota do solo) (BRADY; WEIL, 2013) e à medida que vai ocorrendo a decomposição dos resíduos orgânicos vão se formando no solo compostos e substâncias gomosas, húmus, que quando em conjunto com microrganismos (fungos e bactérias) promovem e auxiliam a estabilização e agregação (FONTANA et al., 2010).

Tabela 3. Média \pm desvio padrão amostral de diâmetro médio ponderado do solo (DMP, mm) e diâmetro médio geométrico do solo (DMG, mm) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana, Arcoverde-PE.

	DMP (mm)		DMG (mm)		
	0-10 cm				
Adubação orgânica (t ha⁻¹)	Frequência de corte				
	Anual	Bienal	Anual	Bienal	
	0	3,0 \pm 0,08	2,88 \pm 0,17	1,54 \pm 0,03	1,48 \pm 0,07
	10	2,92 \pm 0,14	2,79 \pm 0,11	1,50 \pm 0,06	1,45 \pm 0,04
	20	2,94 \pm 0,25	2,91 \pm 0,10	1,51 \pm 0,10	1,50 \pm 0,04
30	2,88 \pm 0,09	3,04 \pm 0,14	1,48 \pm 0,04	1,56 \pm 0,05	
Adubação orgânica (t ha⁻¹)	Frequência de corte				
	Anual	Bienal	Anual	Bienal	
	0	2,83 \pm 0,23	2,94 \pm 0,09	1,46 \pm 0,09	1,51 \pm 0,02
	10	2,78 \pm 0,09	2,79 \pm 0,17	1,45 \pm 0,04	1,46 \pm 0,07
	20	2,89 \pm 0,14	2,80 \pm 0,14	1,49 \pm 0,06	1,46 \pm 0,06
30	3,13 \pm 0,05	2,89 \pm 0,13	1,59 \pm 0,02	1,50 \pm 0,05	
Adubação nitrogenada (kg ha⁻¹)	DMP (mm)		DMG (mm)		
	0-10 cm				
	Frequência de corte				
	Anual	Bienal	Anual	Bienal	
	0	2,99 \pm 0,08	2,95 \pm 0,16	1,54 \pm 0,03	1,52 \pm 0,07
120	2,91 \pm 0,15	2,75 \pm 0,13	1,50 \pm 0,06	1,44 \pm 0,06	
240	2,90 \pm 0,24	2,94 \pm 0,06	1,50 \pm 0,10	1,51 \pm 0,03	
360	2,95 \pm 0,12	2,98 \pm 0,15	1,51 \pm 0,05	1,53 \pm 0,06	
Adubação nitrogenada (kg ha⁻¹)	Frequência de corte				
	Anual	Bienal	Anual	Bienal	
	0	2,90 \pm 0,18	2,91 \pm 0,12	1,50 \pm 0,07	1,50 \pm 0,05
	120	2,99 \pm 0,15	2,78 \pm 0,12	1,54 \pm 0,06	1,45 \pm 0,05
	240	2,89 \pm 0,16	2,87 \pm 0,18	1,50 \pm 0,07	1,50 \pm 0,07
360	2,83 \pm 0,25	2,85 \pm 0,14	1,47 \pm 0,11	1,47 \pm 0,04	

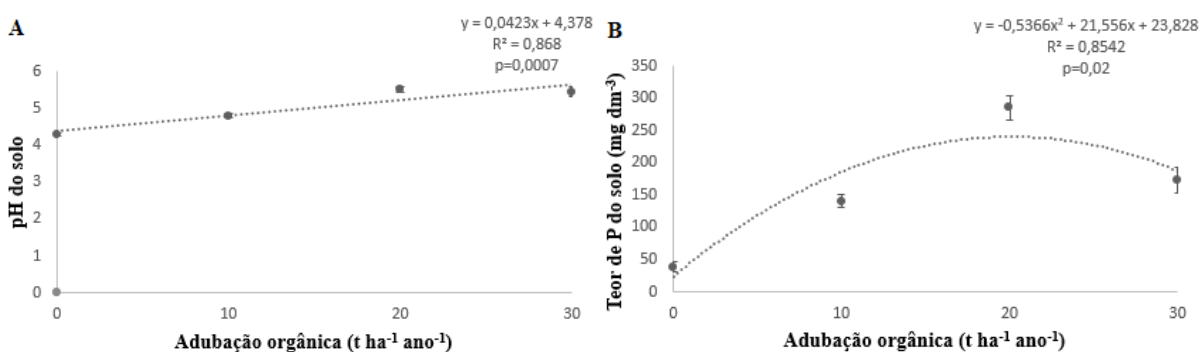
O esterco como biofertilizante tem se mostrado benéfico (MURILLO-AMADOR et al., 1999) quando usado de maneira adequada, melhorando a qualidade do solo por influir nas propriedades físicas, químicas e biológicas. No entanto, não devem ser esperadas grandes mudanças em poucos anos, em particular em relação às propriedades físicas, uma vez que para alcançar mudanças significativas são necessárias grandes quantidades de esterco, o que levaria à degradação das propriedades químicas e, conseqüentemente, à diminuição da qualidade do solo (ZÚÑIGA-TARANGO et al., 2009).

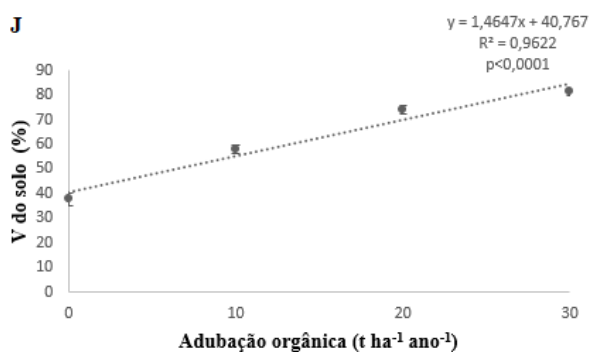
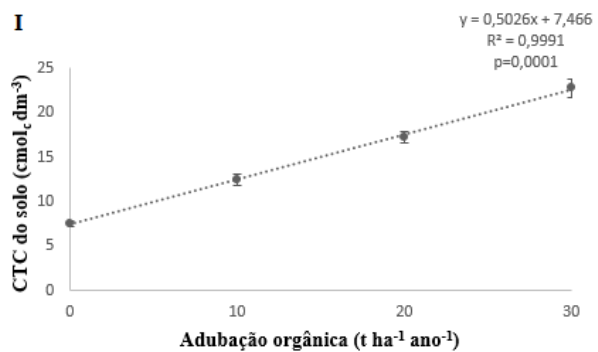
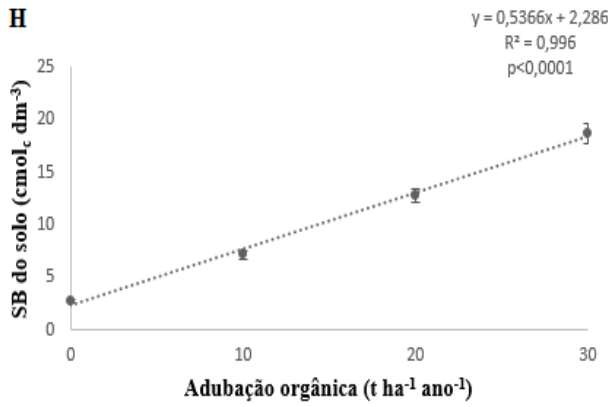
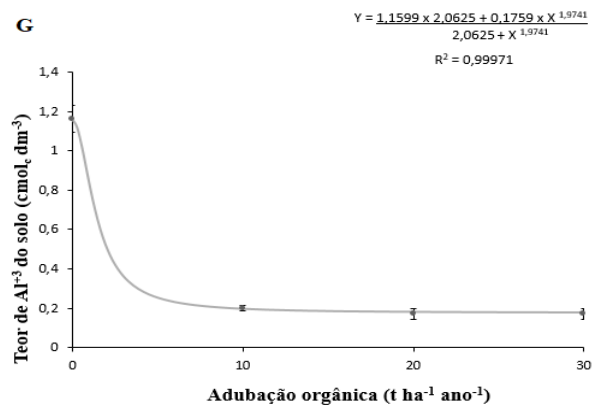
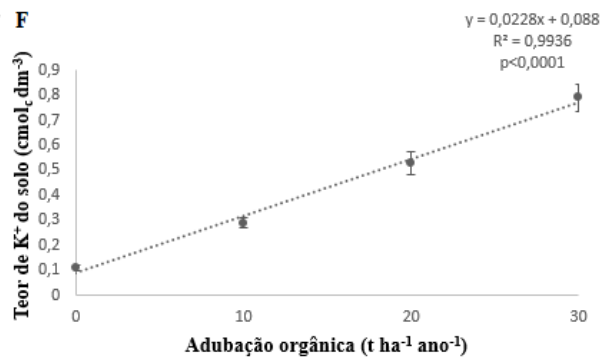
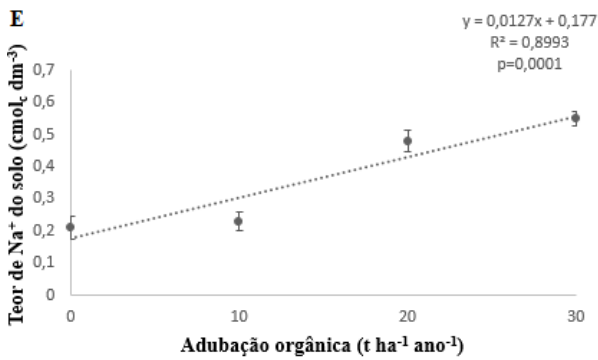
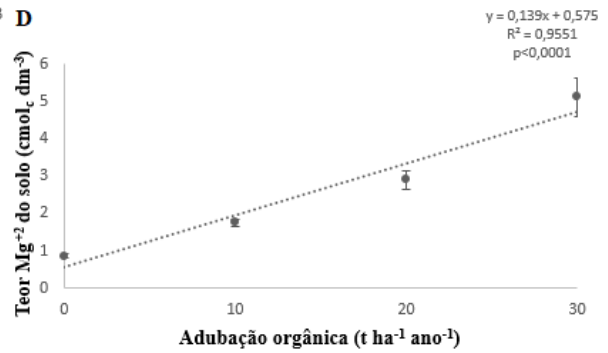
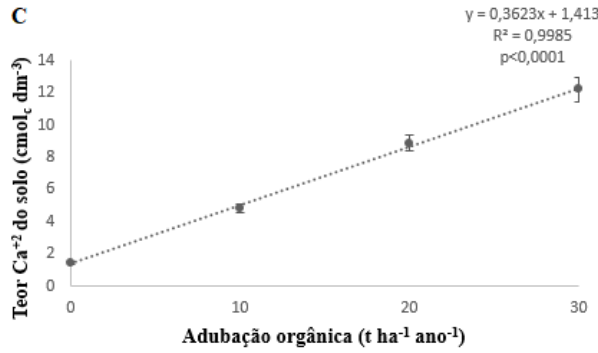
Além disso, a agregação do solo contribui para o aumento do diâmetro agregado e dos estoques de C e N no solo e minimiza as mudanças no ciclo do carbono que são influenciadas pela disponibilidade de nitrogênio do solo (ZHU et al., 2017), porque quanto maior a agregação, menor o fluxo de CO₂ do solo (ABDALLA et al., 2016).

Solos com boa condição física, deve apresentar algumas propriedades estruturais, primeiramente deve ser estável em água, como também apresentar uma distribuição de tamanho de poros favorável, permitindo ao solo absorver, armazenar e liberar água para ser usada pelas plantas (CZYZ; DEXTER, 2015).

Propriedades químicas de solos

Houve efeito significativo ($p < 0,05$) da adubação orgânica quanto aos valores de pH, P, Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, K⁺, Al⁺³, SB, CTC, V e m, na profundidade 0-10 cm (Figura 4).





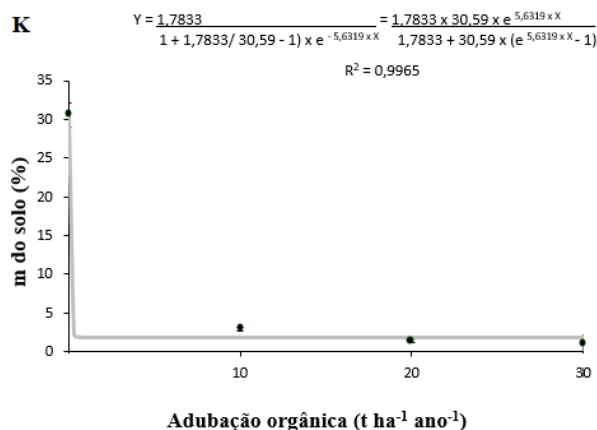
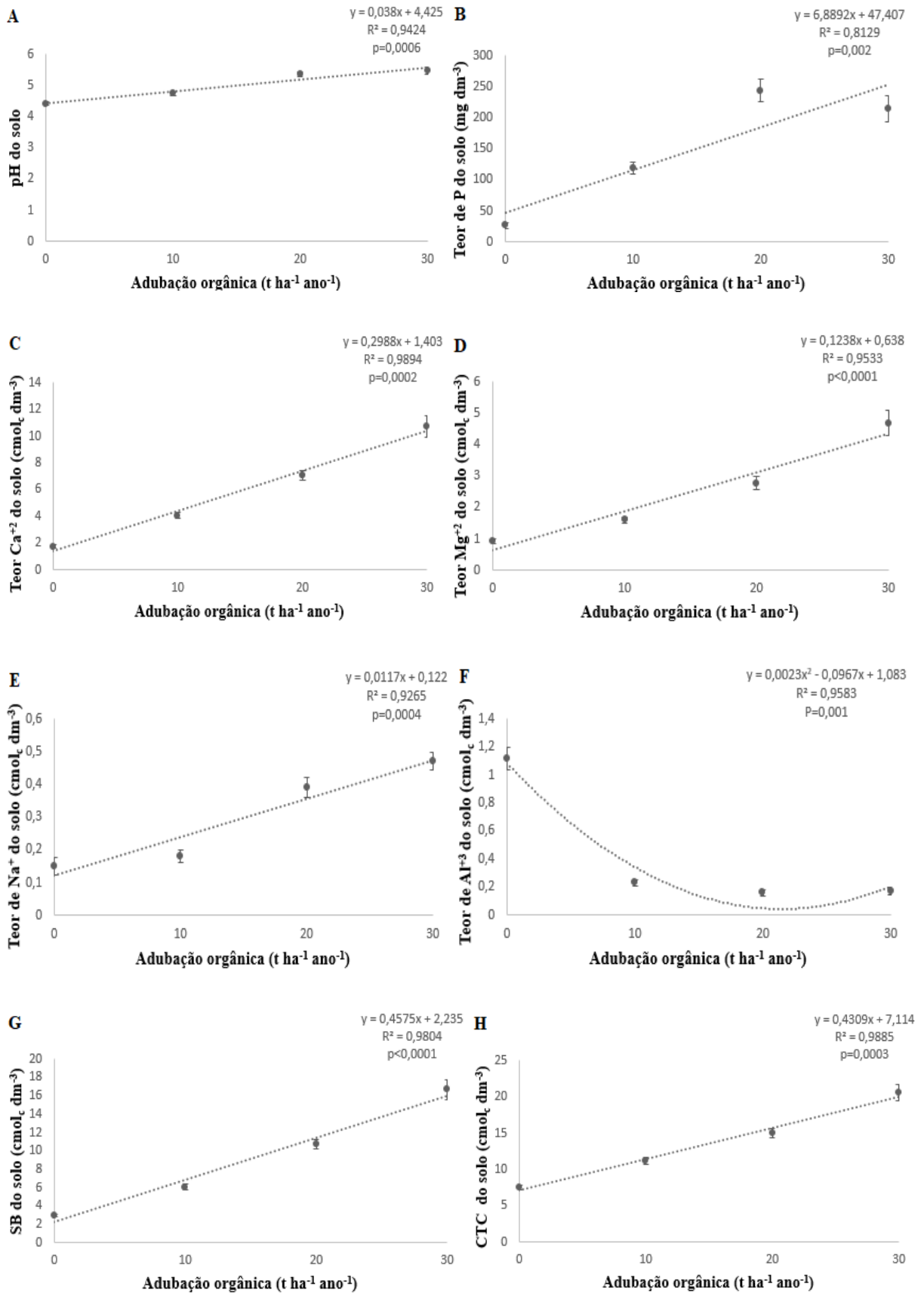


Figura 4. **A.** Efeito linear ($p=0,0007$) da adubação orgânica ($p=0,003$; $EP=0,20$) sobre pH do solo; **B.** Efeito quadrático ($p=0,03$) da adubação orgânica ($p=0,02$; $EP=43,94$) sobre teor de P do solo (mg dm^{-3}); **C.** Efeito linear ($p<0,0001$) da adubação orgânica ($p=0,0005$; $EP=1,14$) sobre teor de Ca^{+2} do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); **D.** Efeito linear ($p<0,0001$) da adubação orgânica ($p=0,0005$; $EP=0,51$) sobre teor de Mg^{+2} do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); **E.** Efeito linear ($p=0,0001$) da adubação orgânica ($p=0,0008$; $EP=0,06$) sobre teor de Na^{+} do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); **F.** Efeito linear ($p<0,0001$) da adubação orgânica ($p<0,0001$; $EP=0,05$) sobre teor de K^{+} do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); **G.** Efeito saturação cinética da adubação orgânica ($p<0,0001$; $EP=0,07$) sobre teor de Al^{+3} do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); **H.** Efeito linear ($p<0,0001$) da adubação orgânica ($p=0,0002$; $EP=1,58$) sobre SB do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); **I.** Efeito linear ($p=0,0001$) da adubação orgânica ($p=0,0009$; $EP=1,70$) sobre CTC do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); **J.** Efeito linear ($p<0,0001$) da adubação orgânica ($p<0,0001$; $EP=4,17$) sobre V do solo (%); **K.** Efeito logístico da adubação orgânica ($p<0,0001$; $EP=0,95$) sobre m do solo (%) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

Foram verificados também efeitos significativos da frequência de corte no pH do solo ($p=0,02$, $EP=0,12$) que correspondeu à 5,07 e 4,96, a partir da frequência de corte anual e bienal, respectivamente; no teor de Na^{+} do solo ($p=0,0238$, $EP=0,05$), sendo 0,34 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na frequência anual e 0,40 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na frequência bienal; quanto ao teor de K^{+} do solo ($p=0,0195$, $EP=0,03$), o qual foi de 0,47 e 0,39 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, a partir da frequência de corte anual e bienal, respectivamente; no teor de H^{+} do solo ($p=0,0005$, $EP=0,47$) que correspondeu à 3,99 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na frequência anual e 4,51 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na frequência bienal; e quanto à V do solo ($p=0,0028$, $EP=2,91$) que foi de 64,37 e 61,11 %, a partir da frequência anual e bienal, respectivamente, na profundidade 0-10 cm.

Na profundidade 10-20 cm, também se observou efeito significativo ($p<0,05$) da adubação orgânica nas variáveis pH, P, Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , Al^{+3} , SB, CTC, V e m (Figura 5). E houve efeito significativo ($p<0,05$) da adubação orgânica x frequência de corte para teor de K^{+} do solo (Tabela 4).



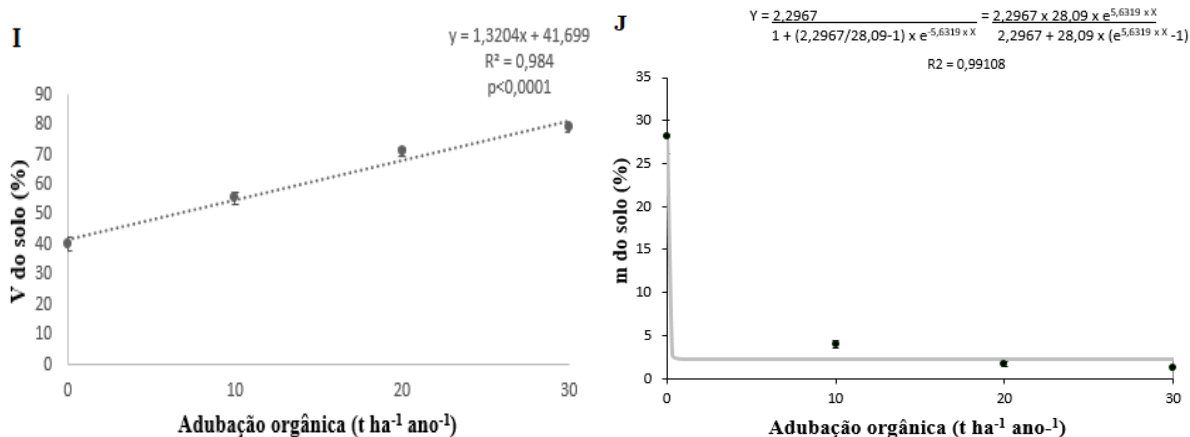


Figura 5. A. Efeito linear ($p=0,0006$) da adubação orgânica ($p=0,004$; EP=0,17) sobre pH do solo; B. Efeito linear ($p=0,002$) da adubação orgânica ($p=0,01$; EP=37,70) sobre teor de P do solo (mg dm^{-3}); C. Efeito linear ($p=0,0002$) da adubação orgânica ($p=0,001$; EP=1,09) sobre teor de Ca^{+2} do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); D. Efeito linear ($p<0,0001$) da adubação orgânica ($p=0,0004$; EP=0,44) sobre teor de Mg^{+2} do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); E. Efeito linear ($p=0,0004$) da adubação orgânica ($p=0,0025$; EP=0,05) sobre teor de Na^+ do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); F. Efeito quadrático ($p=0,001$) da adubação orgânica ($p=0,0001$; EP=0,09) sobre teor de Al^{+3} do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); G. Efeito linear ($p<0,0001$) da adubação orgânica ($p=0,0007$; EP=1,56) sobre SB do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); H. Efeito linear ($p=0,0003$) da adubação orgânica ($p=0,002$; EP=1,67) sobre CTC do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); I. Efeito linear ($p<0,0001$) da adubação orgânica ($p<0,0001$; EP=4,08) sobre V do solo (%); J. Efeito logístico da adubação orgânica ($p<0,0001$; EP=1,37) sobre m do solo (%) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

Tabela 4. Interação adubação orgânica x frequência de corte para teor de K^+ do solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE.

Fator	Teor de K^+ do solo $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$	
	Frequência de corte	
Adubação orgânica	Anual	Bienal
0	0,10 Ca	0,11 Ba
10	0,25 BCa	0,22 Ba
20	0,52 Ba	0,39 ABa
30	0,99 Aa	0,66 Ab
Valor-P	0,01	
Erro padrão	0,08	

Letras maiúsculas distintas na coluna e letras minúsculas distintas na linha indicam diferença significativa ($p<0,05$).

Também foram verificados efeitos significativos da frequência de corte quanto ao pH do solo ($p=0,0022$, EP=0,10) que correspondeu à 5,09 e 4,90, via frequência de corte anual e bienal, respectivamente; no teor de Ca^+ do solo ($p=0,02$, EP=0,56) que correspondeu à 6,18 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na frequência anual e 5,59 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na frequência bienal; quanto ao teor de K^+ do

solo ($p=0,003$, $EP=0,04$), o qual foi de $0,46$ e $0,34$ $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, a partir da frequência de corte anual e bienal, respectivamente; no teor de H^+ do solo ($p=0,004$, $EP=0,45$) que correspondeu à $3,82$ $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na frequência anual e $4,28$ $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na frequência bienal; quanto à SB do solo ($p=0,01$, $EP=0,86$) cujos valores foram $9,54$ $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $8,66$ $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, via frequência de corte anual e bienal, respectivamente; e em relação à V do solo ($p=0,004$, $EP=3,15$) que foi de $63,28$ e $59,73$ %, a partir da frequência anual e bienal, respectivamente, na profundidade 10-20 cm.

Os valores médios de pH variaram de $4,15$ a $5,85$ e de $4,25$ a $5,82$ nas profundidades 0-10 e de 10-20 cm respectivamente, sendo classificados como baixos e médios, segundo Sobral et al. (2015). Os dois maiores níveis da adubação orgânica (Figuras 4A e 5A) contribuíram para aumento do pH ($p<0,05$), tornando-se médio (5-6,0), conforme tais autores.

Malta et al. (2019) verificaram que solos que receberam adubação orgânica apresentaram elevação do pH. Padilha Júnior et al. (2020) observaram no solo em que foi cultivada palma forrageira cv. Gigante que o pH aumentou de forma linear com o aumento das doses de esterco bovino, onde o modelo estimou aumento de $0,0042$ unidades de pH para cada $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de esterco bovino adicionado.

Este aumento pode estar relacionado com o incremento dos teores de MO, devido a sua capacidade em liberar ou receber íons de H^+ (ALVES, 2012). Conforme Amaral et al. (2004), a elevação do pH no solo, pela aplicação de esterco está relacionada à liberação de amônia durante a sua decomposição ou possivelmente a presença de Ca^{+2} e Mg^{+2} proveniente desse resíduo (com aumento linear, Figuras 4C e D e 5C e D nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, respectivamente), que neutraliza e desloca elementos responsáveis pela acidez, como o H^+ .

Sistemas de manejo que promovem adição de MO ao solo também contribuem para o aumento de formas mais lábeis de P, com diminuição da adsorção e consequente aumento da disponibilidade de P para as plantas (ANDRADE et al., 2003).

Estudo realizado formando substrato com esterco caprino (ARAÚJO et al., 2010), encontrou valores de P acima de 150 mg dm^{-3} . E Ferraz Junior (2018) observaram que as doses de MO (esterco caprino) aplicadas à área experimental disponibilizaram o nutriente para o solo, aumentando estatisticamente ($p\leq 0,05$) a concentração que inicialmente era de $3,85$ mg dm^{-3} em todos os tratamentos com MO. Menezes, Lira e Santos (2007) ao analisarem a cultura de palma após 19 anos de cultivo, verificaram que as aplicações de esterco, em intervalos de dois anos e na dose de 20 t ha^{-1} , promoveram acréscimo nos teores de P do solo, em relação ao solo sob Caatinga em área adjacente ao palmal.

Os valores médios de Ca^{+2} do solo foram de 1,18 a 13,1 na profundidade 0-10 cm, enquanto que na maior profundidade foram de 1,72 a 12,22, respectivamente, sendo classificados como baixo ($>1,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) médios ($1,6-3,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e elevados ($>3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), segundo segundo Sobral et al. (2015).

Teores médios de Mg^{+2} do solo variaram de 0,68 a 8,06 e de 0,68 a 6,12 nas profundidades 0-10 e de 10-20 cm, respectivamente, sendo considerados valores médios ($0,4-1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e elevados ($>1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), consoante Sobral et al. (2015).

Valores médios de K^+ do solo variaram de $0,08 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ($31,27 \text{ mg dm}^{-3}$) a $0,86 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ($336,17 \text{ mg dm}^{-3}$) e de $0,09 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ($35,18 \text{ mg dm}^{-3}$) a $0,98 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ($383,08 \text{ mg dm}^{-3}$) nas profundidades 0-10 e de 10-20 cm, respectivamente, enquadrados nas classes médias ($30-60 \text{ mg dm}^{-3}$) e elevada ($>60 \text{ mg dm}^{-3}$), conforme Sobral et al. (2015).

E com dosagem de adubação orgânica de pelo menos $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, os teores de Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^+ no solo se tornaram elevados (Figuras 4C e D e 5C e D e Tabela 4). Alves (2012) observou que em substratos que apresentavam as maiores doses de esterco, resultaram em aumento do teor de K do solo com mudas de atemoieira.

Maiores valores de CTC foram obtidos com maior nível de adubação orgânica, a qual não diferiu do nível de $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, o qual não diferiu quanto à dosagem de $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Figuras 4I e 5H nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, respectivamente), visto que esta capacidade de troca é uma característica do solo e apresenta valor praticamente constante, mas somente pode ser alterada com a aplicação de elevadas doses de MO, por exemplo. Tais valores foram classificados como de CTC média ($5,0$ a $15,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) a elevada ($>15,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), de acordo com Sobral et al. (2015), a qual foi obtida com aplicação de $30 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, indicando bom potencial produtivo dos solos.

Além disso, a adição de MO no solo aumenta o suprimento dos nutrientes (du PREEZ; van HUYSTEEN; MNKENI, 2011; JARDIM et al., 2017; ALVES et al., 2018). Os fertilizantes orgânicos atuam no solo enriquecendo-o gradualmente com macro e micronutrientes essenciais às plantas (TRANI et al., 2013).

Menores valores de V foram observados quando não foi aplicada adubação orgânica (Figuras 4J e 5I nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, respectivamente) sendo os solos classificados como de baixa saturação por bases ($<50,0\%$), segundo Sobral et al. (2015) e também no manejo de corte bineal ($p<0,05$), entretanto, independente da frequência de corte e também com aporte de $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de adubação orgânica, os solos foram classificados como de média saturação ($50,0-70,0\%$) e com os maiores níveis de adubação orgânica os solos foram

classificados como de alta saturação por bases (>70,0%), sendo valores adequados à exigência da cultura, os quais, geralmente, variam de 50 a 80%.

A adição de MO contribuiu para redução da m em comparação aos solos não adubados com MO ($p < 0,05$) (Figuras 4K e 5J nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, respectivamente). A possível explicação para tal seria o aumento no pH do solo pela liberação de hidroxilas ou pela complexação do alumínio da solução do solo pela decomposição dos resíduos orgânicos (MOKOLOBATE; HAYNES, 2003). Todos os solos foram classificados como de baixa saturação por alumínio (<30,0 %), consoante Sobral et al. (2015) e desta maneira a quantidade de alumínio trocável presente no solo não representou um fator de risco à produtividade da palma forrageira neste estudo.

Em relação aos dados de teores e estoques de C e N do solo, houve efeito linear positivo apenas da adubação orgânica nas profundidades 0-10 (Figura 6) e de 10-20 cm (Figura 7) ($p > 0,05$). O uso de adubos orgânicos também é capaz de integrar ao solo compostos orgânicos que são decompostos e transformados em nutrientes essenciais disponíveis às plantas (PAOLINI et al., 2018; JARDIM et al., 2018), e regula a ciclagem do carbono e sua estabilização. Assim, adubações orgânicas normalmente resultam em elevação do nível de carbono no solo.

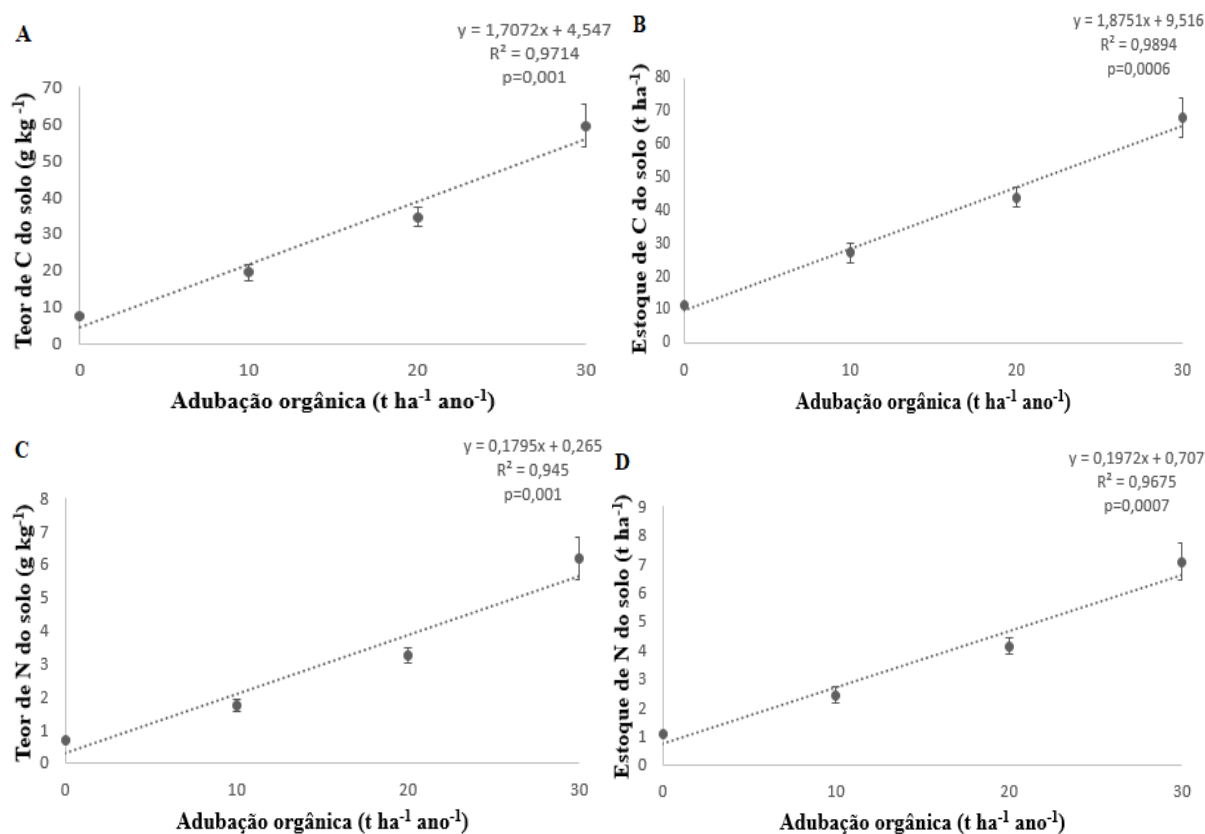


Figura 6. **A.** Efeito linear ($p=0,001$) da adubação orgânica ($p=0,009$; $EP=8,52$) sobre o teor de carbono do solo (g kg^{-1}); **B.** Efeito linear ($p=0,0006$) da adubação orgânica ($p=0,0049$; $EP=8,67$) sobre o estoque de carbono do solo (t ha^{-1}); **C.** Efeito linear ($p=0,001$) da adubação orgânica ($p=0,01$; $EP=0,93$) sobre o teor de nitrogênio do solo (g kg^{-1}); **D.** Efeito linear ($p=0,0007$) da adubação orgânica ($p=0,005$; $EP=0,92$) sobre o estoque de nitrogênio do solo (t ha^{-1}) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

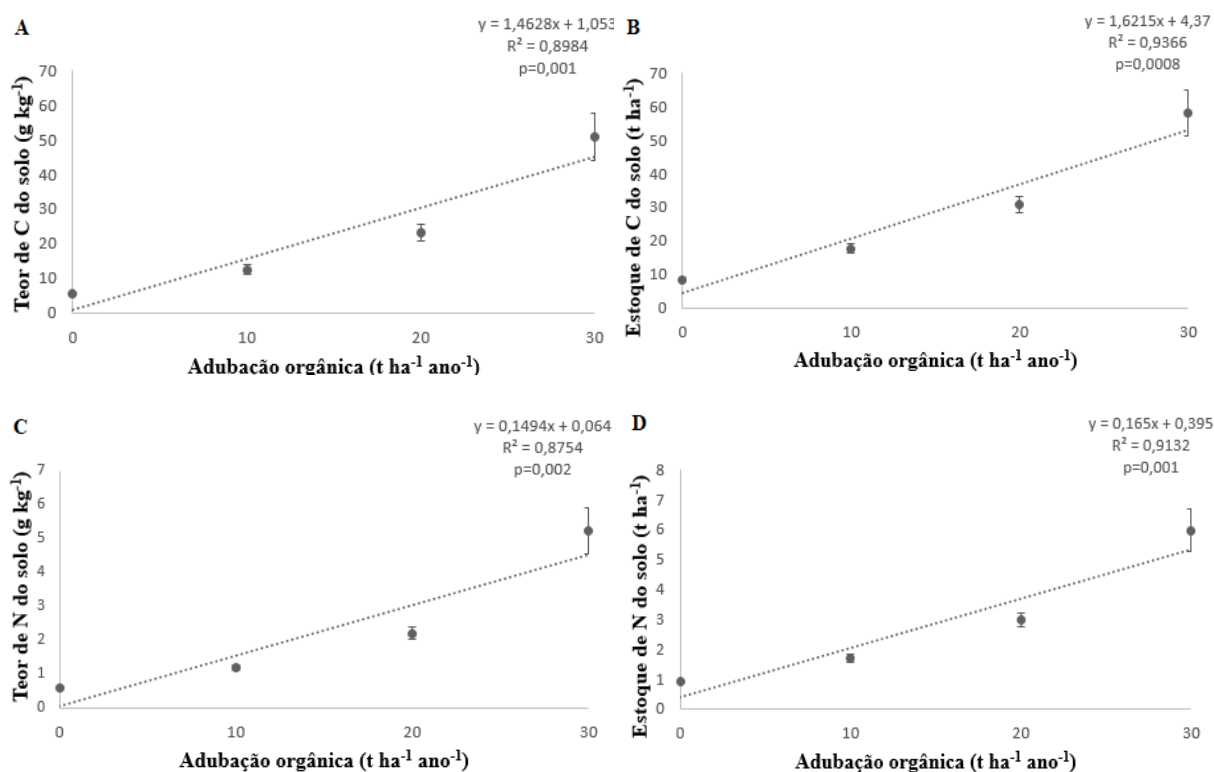


Figura 7. **A.** Efeito linear ($p=0,001$) da adubação orgânica ($p=0,008$; $EP=7,79$) sobre o teor de carbono do solo (g kg^{-1}); **B.** Efeito linear ($p=0,0008$) da adubação orgânica ($p=0,005$; $EP=8,18$) sobre o estoque de carbono do solo (t ha^{-1}); **C.** Efeito linear ($p=0,002$) da adubação orgânica ($p=0,01$; $EP=0,84$) sobre o teor de nitrogênio do solo (g kg^{-1}); **D.** Efeito linear ($p=0,001$) da adubação orgânica ($p=0,007$; $EP=0,87$) sobre o estoque de nitrogênio do solo (t ha^{-1}) cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 10-20 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

Ferraz Junior (2018) verificou que a aplicação das doses de esterco caprino nas doses 15, 30 e 45 t ha^{-1} tiveram diferença significativa a 95% em relação ao tratamento sem MO ou dose 0 t ha^{-1} . Os autores observaram que a média de carbono no solo sem tratamento foi de 5,80 g kg^{-1} e, nas parcelas tratadas, as concentrações médias obtidas foram de 9,62, 9,22 e 10,47 g kg^{-1} para os respectivos tratamentos de 15, 30 e 45 t ha^{-1} .

Quanto à relação C/N houve efeito significativo ($p < 0,05$) da adubação orgânica x nitrogenada na profundidade 0-10 cm (Tabela 5) e da frequência de corte ($p = 0,0005$, $EP = 0,13$)

na profundidade 10-20 cm, em que os valores médios foram 9,69 e 10,25, a partir da frequência de corte anual e bienal, respectivamente.

Tabela 5. Interação adubação orgânica x nitrogenada para relação C/N do solo cultivado com palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE.

Fator	C/N do solo			
	Adubação nitrogenada			
Adubação orgânica	0	120	240	360
0	9,82 Ab	11,84 Aa	10,06 Ab	10,76 Aab
10	11,03 Aa	10,68 Aa	11,18 Aa	11,63 Aa
20	10,32 Aa	10,68 Aa	11,05 Aa	10,80 Aa
30	9,63 Aa	9,95 Aa	9,97 Aa	9,70 Aa
Valor-P	0,02			
Erro padrão	0,38			

Letras maiúsculas distintas na coluna e letras minúsculas distintas na linha indicam diferença significativa ($p < 0,05$).

Em qualquer um dos solos sob os tratamentos experimentais, a relação C/N foi menor que 20. A aplicação de esterco ou MO é apontada como uma excelente alternativa, pois ajuda a manter o bom funcionamento microbiológico, além de aumentar as taxas de lixiviação dos nutrientes em excesso (KAMELI et al., 2017; FREIRE et al., 2014).

Fracionamento físico da MOS

Quanto à fração mineral do solo e também à fração pesada da matéria orgânica do solo (FP-MOS), houve efeito apenas da adubação orgânica ($p < 0,05$) na profundidade 0-10 cm (Figuras 8A e B, respectivamente). Solos com maior nível de adubação orgânica, ou seja, 30 t ha⁻¹ ano⁻¹ apresentaram menores quantidades de FM e maiores quantidades de FP-MOS, enquanto os outros níveis de adubação orgânica não diferiram entre si. A presença de adubo orgânico na camada superficial do solo certamente contribuiu para tais valores.

Magalhães (2017) verificou que os valores de carbono orgânico associado aos minerais (COAM) não foram influenciados pelas doses crescentes de esterco bovino, aplicadas ao solo ($p < 0,05$), na camada 0-10 cm. Isso pode ter ocorrido devido ao curto período de tempo de condução do experimento, já que o COAM possui uma ciclagem mais lenta, e demora para que

ocorram modificações no solo (BAYER et al., 2004). Entretanto, o experimento presente foi implementado em junho de 2011, havendo, portanto, tempo para o processo da ciclagem.

Já em relação à fração leve da matéria orgânica do solo (FL-MOS), houve efeitos das adubações orgânica e nitrogenada ($p < 0,05$) na profundidade 0-10 cm (Figuras 8C e 9, respectivamente). Solos submetidos, pelo menos, à 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ de MO e aos dois maiores níveis de adubação nitrogenada, além de terem tido maior quantidade de massa radicular vegetal (Figuras 1 e 2), apresentaram também maiores quantidades de FL-MOS, pois esta fração está diretamente relacionada ao aporte de raízes ao solo pelas plantas e na comunidade microbológica e pode representar o potencial de ciclagem de nutrientes do solo (LOSS et al., 2012).

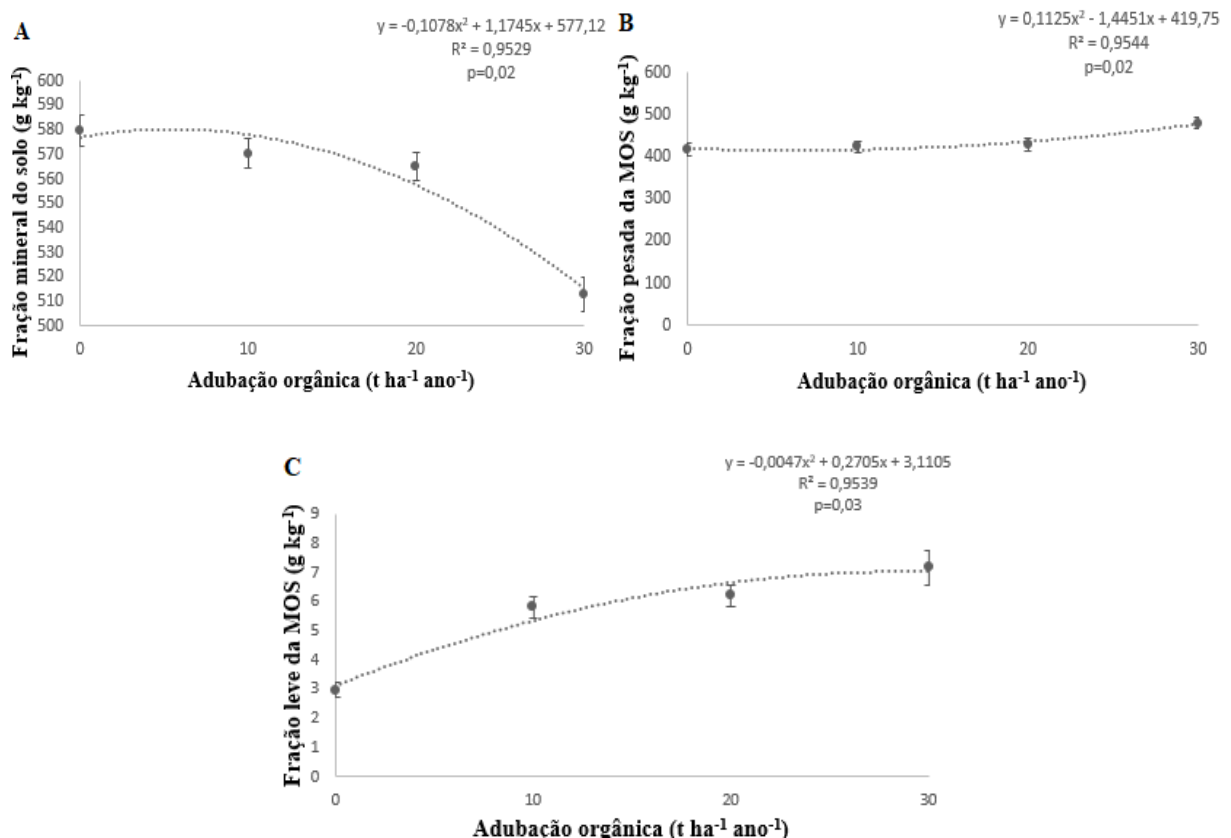


Figura 8. A. Efeito quadrático ($p=0,02$) da adubação orgânica ($p=0,001$; EP=8,49) sobre a fração mineral do solo (FMS, g kg⁻¹); B. Efeito quadrático ($p=0,02$) da adubação orgânica ($p=0,001$; EP=8,40) sobre a fração pesada da matéria orgânica do solo (FP-MOS, g kg⁻¹); C. Efeito quadrático ($p=0,03$) da adubação orgânica ($p=0,0002$; EP=0,40) sobre a fração leve da matéria orgânica do solo (FL-MOS, g kg⁻¹) cultivado com palma Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

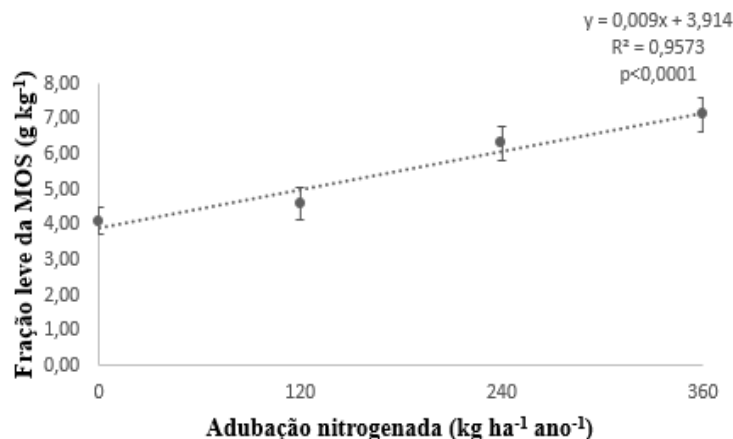


Figura 9. Efeito linear ($p < 0,0001$) da adubação nitrogenada ($p < 0,001$; $EP = 0,40$) sobre a fração leve da matéria orgânica do solo (FL-MOS, g kg^{-1}) cultivado com palma Orelha de Elefante Mexicana na profundidade 0-10 cm, Arcoverde-PE. Barras referem-se ao erro padrão amostral.

Magalhães (2017) observou que os valores de carbono orgânico particulado (COP) cresceram linearmente com o aumento das doses de esterco (0, 15, 30, 45, 60 t ha^{-1}) ($p < 0,05$), na camada 0-10 cm. Essa fração do CO do solo foi proveniente de resíduos, como desse esterco bovino.

Silva (2016) também verificou maiores valores da FL-MOS na camada edáfica com maior presença de raízes vegetais em área de Caatinga raleada e enriquecida com mororó (*Bauhinia cheilantha* Steud Bong), capim-corrente (*Urochloa mosambicensis* (Hack.) Dandy) e capim-buffel (*Cenchrus ciliaries* L.), no município de Serra Talhada/PE.

4. CONCLUSÕES

Adubação orgânica e nitrogenada de, pelo menos, 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente e frequência de corte bienal contribuem para maior estoque de raízes de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana na profundidade do solo de 0-10 cm. Já na profundidade 10-20 cm, não há efeitos de tratamentos experimentais.

À medida que se aumenta a dosagem de adubação orgânica, reduz-se a densidade do solo, em ambas profundidades analisadas, ou seja 0-10 e 10-20 cm. E frequência de corte bienal influencia para redução de tal variável no ano de 2019, já em 2021, não houve diferença significativa na Ds entre ambas as frequências de corte testadas a 0-10 cm de profundidade.

Em geral, doses de adubo orgânico a partir de 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ contribui para aumento dos teores de pH, Ca⁺², Mg⁺², capacidade de troca catiônica, soma de bases e saturação por bases e para redução de percentual de saturação por Al⁺³ em ambas profundidades edáficas. E dose de adubo orgânico de, ao menos, 20 t ha⁻¹ ano⁻¹ contribui para incremento nos teores de K⁺ a 0-10 cm e de Na⁺ em ambas profundidades.

No geral, doses de adubo orgânico de 20 e 30 t ha⁻¹ ano⁻¹ contribuem para maiores teores e estoque de carbono e nitrogênio do solo em ambas profundidades edáficas.

Adubação orgânica a partir de 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ e nitrogenada de, pelo menos, 240 kg ha⁻¹ ano⁻¹ auxiliam para maiores quantidades de fração leve da matéria orgânica do solo, enquanto que adubação orgânica de 30 t ha⁻¹ contribui para menores valores de fração mineral do solo e maiores de fração pesada da matéria orgânica do solo na profundidade 0-10 cm.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, K. et al. Long-term annual burning of grassland increases CO₂ emissions from soils. **Geoderma**, v.282, p.80-86, 2016.

ALVES, A.S. **Componentes e Fertilidade de Substratos na formação de Mudanças de Atempoieira**. 2012. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) – Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia.

ALVES, H. K. M. N. et al. The application of agrometeorological techniques contributes to the agricultural resilience of forage cactus: A review. **Amazonian Journal of Plant Research**, v.2, p.207-220, 2018.

AMARAL, A. S. et al. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.2, p.359-367, 2004.

ANDRADE, F. V. et al. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.6, p.1003-1011, 2003.

ARAÚJO, W. B. M. et al. Esterco caprino na composição de substratos para formação de mudas de mamoeiro. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, n.1, p.68-73, 2010.

BAYER, C. et al. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.7, p.677-683, 2004.

BERNOUX, M. et al. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, n.3, p.888-896, 2002.

BÖHM, W. In situ estimation of root length at natural soil profiles. **Journal of Agricultural Science**, v.87, p.365-368, 1976.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 790 pgs.

CARVALHO, C. B. M. et al. Methods of storing cactus pear genotypes for animal feeding. **African Journal of Range and Forage Science**, v.37, n.2, p.1-7, 2020.

CZYZ, E. A.; DEXTER, A. R. Mechanical dispersion of clay from soil into water: readily dispersed and spontaneously-dispersed clay. **International Agrophysics**, v.29, n.1, p.31-37, 2015.

DUBEUX Jr, J. C. B. et al. Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. **Animal Feed Science and Technology**, v.275, p.1-11, 2021.

DUBEUX JUNIOR, J. C. B.; SANTOS, M. V. F. dos. Exigências nutricionais da palma forrageira. In: MENEZES, R. S. C.; SIMÕES, D. A.; SAMPAIO, E. V. S. B. (Ed.). **A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2005. p.105-128.

du PREEZ, C. C.; van HUYSSTEEN, C. W.; MNKENI, P. N. S. Land use and soil organic matter in South Africa 2: A review on the influence of arable crop production. **South African Journal of Science**, v.107, n.5-6, p.35-44, 2011.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo**. 3ª ed. revisada e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 pgs.

FERRAZ JUNIOR, R.S. **Indicadores de qualidade de solo em área cultivada com gliricídia e palma-forrageira em sistema biossalino no semiárido nordestino**. 2018. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais do Semiárido) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais do Semiárido. Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina.

FREIRE, M. B. G. S. et al. Agrupamento de solos quanto à salinidade no Perímetro Irrigado de Custódia em função do tempo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, (Suplemento), p.586-591, 2014.

FONTANA, A. et al. Índices de agregação e a relação com as substâncias húmicas em Latossolos e Argissolos de tabuleiros costeiros, Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.5, n.3, p.291-297, 2010.

GALVÃO JÚNIOR, J. G. B. et al. Palma forrageira na alimentação de ruminantes: cultivo e utilização. **Acta Veterinaria Brasilica**, v.8, n.2, p.78-85, 2014.

GOEDERT, W. J. Qualidade do solo em sistemas de produção agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30, 2005, Recife. **Anais**. Recife: SBCS, 2005. Cd-Rom.

GUIMARÃES, W. D. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Revista Ciência Agronômica**, v.47, n.2, p.247-255, 2016.

HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7ª ed. New Jersey: Pearson, 2005. 515 pgs.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados climáticos da Estação de Arcoverde: série histórica de 1973 a 2016**. Banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (Brasília: INMET). 2017. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>. Acesso em: 05 mar. 2021.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Estimativas de perda de solo por erosão hídrica para o município de Serra Talhada, PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.2, n.3, p.186-193, 2017.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Symbiotic interaction in forage crop cultivations: A review. **Amazonian Journal of Plant Research**, v.2, p.149-160, 2018.

KAMELI, M. A. et al. Application of wastewater with high organic load for saline-sodic soil reclamation focusing on soil purification ability. **Global Journal of Environmental Science and Management**, v.3, n.2, p.197-206, 2017.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262 pgs.

LÉDO, A. A. et al. Yield and water use efficiency of cactus pear under arrangements, spacings and fertilizations. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.6, p.413-418, 2019.

LOSS, A. et al. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1269-1276, 2012.

MAGALHÃES, L. **Carbono orgânico e atributos físicos do solo após a aplicação de esterco bovino**. 2017. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-graduação em Ciência do solo. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.

MALTA, A. O. et al. Atributos físicos e químicos do solo cultivado com gravioleira, sob adubação orgânica e mineral. **Revista PesquisAgro**, v.2, n.1, 2019.

MARQUES, O. F. C. et al. Palma forrageira: cultivo e utilização na alimentação de bovinos. **Caderno de Ciências Agrárias**, v.9, n.1, p.75-93, 2017.

MEIJBOOM, F. W.; HASSINK, J.; VAN NOORDWIJK, M. Density fractionation of soil macroorganic matter using silica suspensions. **Soil Biology & Biochemistry**, v.27, n.8, p.1109-1111, 1995.

MENEZES, R. S. C.; LIRA, M. A.; SANTOS, D. C. Produção de forragem pela palma após 19 anos sob diferentes intensidades de corte e espaçamento. **Revista Caatinga**, v.20, n.4, p.38-44, 2007.

MOLOKOBATE, M. S.; HAYNES, R. J. A glasshouse evaluation of the comparative effects of organic amendments, lime and phosphate on alleviation of Al toxicity and P deficiency in an Oxisol. **Journal of Agricultural Science**, v.140, p.409-417, 2003.

MURILLO-AMADOR, B. et al. **Efectos del estiércol de bovino en cultivares de nopal verdulero (*Opuntia spp*) introducidos a Baja California Sur, México**. Memoria. VIII Congreso Nacional y VI Internacional sobre conocimiento y Aprovechamiento del nopal. Aguirre-Rivera, J.R. y Reyes-Agüero, J.A. (Eds.). Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P. México. pp. 87-88, 1999.

PADILHA JÚNIOR, M. C. et al. Attributes of the soil with cactos pear under organic fertilization, diferente spacings and sampling times. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, n.7, p.444-450, 2020.

PAOLINI, V. et al. Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge. **Journal of Environmental Science and Health**, v.53, n.10, p.899-906, 2018.

PEIXOTO, M. J. A. et al. Características agrônômicas e composição química da palma forrageira em função de diferentes sistemas de plantio. **Archivos de Zootecnia**, v.67, n.257, p.35-39, 2018.

PEREIRA, L. S. et al. Processos hidro-erosivos em solos degradados em relevo de baixa declividade. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.17, n.2, p.299-316, 2016.

RAMOS, J. P. F. et al. Crescimento da palma forrageira em função da adubação orgânica. **Revista REDEVET**, v.16, n.12, p.1-11, 2015.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v.27, n.2, p.29-48, 2003.

SALES, A. T. et al. Eficiência de utilização da adubação orgânica pela palma forrageira em função da densidade populacional. **Revista Científica de Produção Animal**, v.14, n.1, p.32-35, 2012.

SANTOS, D. C. et al. Estratégias para uso de cactáceas em zonas semiáridas: novas cultivares e uso sustentável das espécies nativas. **Revista Científica de Produção Animal**, v.15, n.2, p.111-121, 2013.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo**. Dourados: Embrapa Agropecuária, 2014. p.6 (Embrapa Agropecuária. Comunicado Técnico, 198).

SANTOS, M. C. **Solos do Semiárido do Brasil**. Cadernos do semiárido, 2017. p.60 (Conselho Regional de Engenharia e Agronomia – PE / Academia Brasileira de Ciência Agrônômica).

SANTOS, M. V. F. et al. Estudo comparativo das cultivares de palma forrageira “Gigante”, “Redonda” (*Opuntia ficus-indica*, Mill) e “Miúda” (*Nopalea cochenillifera*, Salm Dyck) na produção de leite. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, v.19, n.6, p.504-511, 1990.

SHAHBAZ, M. et al. Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: Mechanisms and controls. **Geoderma**, v.304, p.76-82, 2017.

SILVA, G.T. **Decomposição da serapilheira e fracionamento da matéria orgânica do solo em caatinga manejada com diferentes ofertas de forragem**. 2016. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Programa de Pós-graduação em Zootecnia. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SISTI, C. P. J. et al. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.76, n.1, p.39-58, 2004.

SOBRAL, L. F. et al. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solo**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. p.13 (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 206).

SOUZA, J. T. A. et al. Métodos de adubação orgânica e manejo do solo, na cultura da palma forrageira no Cariri paraibano. **Questões contemporâneas**, v.12, n.3, 2013.

TRANI, P. E. et al. **Adubação Orgânica de Hortaliças e Frutíferas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2013. 16 pgs.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of American Society of Agronomy**, v.28, p.337-351, 1936.

ZHU, G. et al. Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon and nitrogen in natural restoration grassland and Chinese red pine plantation on the Loess Plateau. **Catena**, v.149, p.253-260, 2017.

ZOGLAMI, R. I. et al. Changes in light-textured soil parameters following two successive annual amendments with urban sewage sludge. **Ecological engineering**, v.95, p.604-611, 2016.

ZÚÑIGA-TARANGO, R. et al. Desarrollo radical, rendimiento y concentración mineral en nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en diferentes tratamientos de fertilización. **Journal of the Professional Association for Cactus Development**, v.11, p.53-68, 2009.

ZÚÑIGA, T. R.; CUETO W., J. A. Análisis de crecimiento radical en cuatro variedades de nopal *Opuntia ficus-indica*. **AgroFAZ**, v,1, p.80-87, 2001.