

ALEXANDRE MANIÇOBA DA ROSA FERRAZ JARDIM

CONSÓRCIOS DE PALMA (*Nopalea* sp. e *Opuntia* sp.) EM SISTEMA DE PLANTIO  
ADENSADO COM CULTIVARES DE SORGO SOB USO MÍNIMO E REGULAR DE  
IRRIGAÇÃO

Serra Talhada-PE

2019

**J  
A  
R  
D  
I  
M**

**A  
M  
R  
F**

**C  
O  
N  
S  
Ó  
R  
C  
I  
O  
S**

**D  
E**

**P  
A  
L  
M  
A**

**.  
.  
.**

**2  
0  
1  
9**

ALEXANDRE MANIÇOBA DA ROSA FERRAZ JARDIM

CONSÓRCIOS DE PALMA (*Nopalea* sp. e *Opuntia* sp.) EM SISTEMA DE PLANTIO  
ADENSADO COM CULTIVARES DE SORGO SOB USO MÍNIMO E REGULAR DE  
IRRIGAÇÃO

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. DSc. Thieres George Freire da Silva.

Coorientadores: DSc. Gherman Garcia Leal de Araújo; DSc. Luciana Sandra Bastos de Souza.

Serra Talhada-PE

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca da UAST, Serra Talhada-PE, Brasil

J37c Jardim, Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz  
Consórcios de palma (*Nopalea* sp. e *Opuntia* sp.) em sistema de  
plantio adensado com cultivares de sorgo sob uso mínimo e regular de  
irrigação / Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim. - Serra Talhada,  
2019.

127 f. : il.

Orientador: Thieres George Freire da Silva

Coorientadores: Gherman Garcia Leal de Araújo; Luciana Sandra  
Bastos de Souza

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal  
Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra  
Talhada, PE, 2019.

Inclui referências.

1. Palma forrageira. 2. Cactos. 3. Irrigação. I. Silva, Thieres George  
Freire da, orient. II. Araújo, Gherman Garcia Leal de, coorient. III.  
Souza, Luciana Sandra Bastos de, coorient. IV. Título.

CDD 631

ALEXANDRE MANIÇOBA DA ROSA FERRAZ JARDIM

CONSÓRCIOS DE PALMA (*Nopalea* sp. e *Opuntia* sp.) EM SISTEMA DE PLANTIO  
ADENSADO COM CULTIVARES DE SORGO SOB USO MÍNIMO E REGULAR DE  
IRRIGAÇÃO

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

APROVADA em 11/02/2019.

Banca Examinadora

---

Prof<sup>o</sup>. DSc. Thieres George Freire da Silva - UAST/UFRPE  
Orientador

---

Prof<sup>a</sup>. DSc. Luciana Sandra Bastos de Souza - UAST/UFRPE  
Examinadora Externa

---

Prof<sup>o</sup>. DSc. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro - UFRPE  
Examinador Externo

---

Pesq. DSc. Gherman Garcia Leal de Araújo - EMBRAPA Semiárido  
Examinador Externo

À minha mãe, Iamí Manicoba da Rosa Ferraz Jardim, ao meu pai, Valdomiro Ferraz Jardim Filho (*In memoriam*) e, a minha irmã, Camila Ferraz Jardim, com todo o meu amor, orgulho, respeito e admiração. Vocês são tudo de melhor na minha vida, eu amo muito vocês.

Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu amado e maravilhoso Deus, acima de tudo, Pai e Criador e, a Nossa Senhora Aparecida, por sempre estarem comigo em todos os momentos da minha vida, guiando e iluminado o meu rumo para bons caminhos, sempre com fé e perseverança, não deixando-me cair em tentações. “[...] *Os que semeiam em lágrimas, segarão com alegria. Aquele que leva a preciosa semente, andando e chorando, voltará, sem dúvida, com alegria, trazendo consigo os seus molhos*” (Salmo 126:5-6).

À minha amada e rainha, Mãe, por todo seu amor e carinho incondicional. A senhora sempre ensinou-me e incentivou-me a ser uma pessoa de princípios, sempre mantendo-me em suas orações, aconselhando-me e incentivando nos meus estudos e na minha vida. A senhora sem dúvidas é o meu maior exemplo de vida e um grande amor, “[...] *Quem ama não esquece quem ama, o amor é assim, eu tenho esquecido de mim, mas dela eu nunca me esqueço* [...]”. Ao meu amado e maravilhoso, Pai (*In memoriam*), que sempre apoiou meus estudos e sempre torceu por mim, em todas minhas conquistas. Essa conquista é mais uma nossa, e sei que em outro plano espiritual que habitas, está sempre olhando-me, obrigado por tudo. Agradeço a minha amada, Irmã, pelos incentivos e, amor fraterno durante toda minha vida, principalmente nos momentos mais difíceis que passamos juntos, a vida é árdua minha irmã, mas, Deus é misericordioso sempre.

Ao meu Orientador, DSc. Thieres George F. da Silva, pela educação, ensinamentos, conselhos e orientações fornecidas. Durante todos esses anos acadêmicos de convivência, nunca descreditou em mim, erguendo-me, preparando-me para novas batalhas acadêmicas, sempre enxergou um potencial (i.e., que até eu mesmo desconhecia) e acreditando que eu seria capaz de conseguir meus objetivos e sonhos. O senhor é sinônimo de respeito e gratidão, um grande exemplo que carrego dentro de meus ideais, sem dúvidas um profissional admirável, a sua perseverança por muitas vezes foi “combustível” para meus incentivos e atitudes.

Ao meu comitê de Coorientação, DSc. Gherman Garcia L. de Araújo, por todo apoio científico e laboratorial concedido, e a DSc. Luciana Sandra B. de Souza, a senhora sempre manteve-se presente, atenciosa, paciente e com excelentes ensinamentos, uma verdadeira “mãezona”, sempre incentivando-me a voar cada vez mais alto. Ressalvo também, meus agradecimentos ao meu “Coorientador apadrinhado”, José Edson F. de Moraes, que apesar da

distância sempre amparou-me com valiosos conselhos acadêmicos, científicos e pessoais. É um profissional admirável e de grande simplicidade, muito obrigado “Mestre”.

À todos os meus familiares, Avós e Avô, Tios e Tias, Padrinho, Primos e, amigos em geral, agradeço por cada voto de confiança, vibrações positivas e incentivos. Peço desculpas também pela minha ausência durante muitas vezes.

Aos amigos integrantes da turma 2017.1 da Pós-graduação em Produção Vegetal (PGPV), Andréa Oliveira, Elizangela Nunes, George Araújo Júnior, Juracy Barroso Neto, Maria Aparecida, Naiara Albuquerque, Raliuson Silva, Renilson Morato, vocês meus amigos foram verdadeiros companheiros e peças fundamentais no meu processo de força. Ressalvo meus agradecimentos em especial aos homens da turma, pelos dias e noites de estudo, pela força nos momentos de fraqueza, visto que, sem vocês meus irmãos essa caminhada tinha sido mais “ádua e sofrida”, transformando-a em brilhante e prazerosa.

Agradeço também aos demais amigos desse recinto, Marcondes Souza, Cinara Felix, Kelem Fonseca, Allan Silva, Thalyta Soares, Gabriela Queiroz, Thialla Laranjeira, Rodolfo Souza, Vicente Laamon, Lypson Izidro, e aos demais componente do mestrado, pelos bons momentos partilhados e apoio durante a jornada.

À família Souza Correia, especiais e amáveis, Laiz, Larissa, Luiz Henrique, Jully, Justin, Dona Lucinda e Sr. Luiz Valença, vocês sempre acolheram-me como um filho, desejando o melhor em toda minha vida, orando, alegrando, incentivando-me. Todos vocês sem dúvidas são extremamente especiais pra mim. Não tenha dúvida, por muitos anos e até hoje a sua frase me guia, Laiz: “*Seja forte e corajoso*”, obrigado por tudo, vocês são dignos de um grande sentimento meu, amo todos vocês - ♥. Deus cubra-os de bênçãos e graças.

Agradeço também ao núcleo interno da PGPV, em especial o nosso Coordenador, DSc. Sergio Luiz Ferreira da Silva, um excelente profissional e ser humano. Durante esses anos sempre atencioso e mantendo suas portas abertas a qualquer momento, independentemente do horário, sempre preocupado em nosso bem-estar e crescimento profissional. Ao secretário Iago Pereira, pela atenção e bom humor, sem dúvidas um dos melhores servidores públicos que fez parte da “nossa casa”, exemplo de organização, eficiência e competência.

De coração agradeço a todos os integrantes do Grupo de Agrometeorologia no Semiárido (GAS), mais que um grupo, uma família, pelos ótimos momentos juntos, pelas atividades de campo pesadas com o sol “castigante”, mas sempre com entusiasmo, um sorriso no rosto e empenho, presando pela qualidade e amor a pesquisa. Aprendi e venho aprendendo

bastante com cada um de vocês e, desejo muito sucesso na carreira profissional e acadêmica de todos. “Então persiste, a mente é fértil, para sonhar não tem limite [...]”.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST) pela sua qualidade de ensino, e a infraestrutura oferecida, juntamente com professores de excelente qualidade, que fizeram parte da minha formação profissional. Em especial agradeço ao Prof. DSc. Vicente Imbroisi Teixeira, por oferecer oportunidades ímpares durante a minha formação e abrindo portas para novos horizontes, muitíssimo obrigado professor. Agradeço também aos técnicos pela disponibilidade e presteza, como também aos guardas, sempre prezando por nossa segurança.

Ao Instituto Agrônomo de Pernambuco, em nome do DSc. José Nildo Tabosa, por ter cedido as sementes de sorgo utilizadas no campo experimento, e pelas dúvidas sanadas e orientações concedidas. À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido) pela disponibilização da sonda Diviner 2000®, e pelas análises de solo e vegetal.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, e financiamento dos projetos de pesquisa.

A todos que contribuíram direto ou indiretamente para a concretização deste sonho, peço desculpas também, aqueles que não tiveram seus nomes mencionados em papel, mas saibam que em memória e sentimentos possuem minha eterna gratidão.

Meus sinceros agradecimentos a todos!

*“If I have seen further than others, it is by standing upon the shoulders of giants”.*

- Isaac Newton.

## **BIOGRAFIA**

Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim, é filho de Valdomiro Ferraz Jardim Filho e Iamí Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim, nasceu em Floresta-PE, em 23 de novembro de 1991. Cursou o Ensino Médio na Escola Júlio de Mello, na cidade de Floresta-PE, concluindo em dezembro de 2008. Em março de 2009, ingressou no Curso Técnico em Agropecuária; diplomando-se em Técnico em Agropecuária no primeiro semestre de 2012.

Em dezembro de 2012 ingressou no Curso de Bacharelado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, na cidade Serra Talhada-PE, durante a graduação foi três anos bolsista participante do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/UFRPE); graduou-se Engenheiro Agrônomo em março de 2017.

Em março de 2017 iniciou a Pós-Graduação no Curso de Mestrado em Produção Vegetal pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, concluindo em fevereiro de 2019.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Mapa do Brasil e da região Nordeste com delimitação geográfica do Semiárido e índices pluviométricos. Adaptado de Alvares et al. (2013)..... | 25 |
| Figura 2. Estratégias do uso do Na <sup>+</sup> pelas espécies halófitas e glicófitas. Adaptado de Wu et al. (2018).....                               | 27 |
| Figura 3. Processos de salinização primária e secundária dos solos. Adaptado de Daliakopoulos et al. (2016).....                                       | 28 |
| Figura 4. Representação simplificação do Metabolismo Ácido das Crassuláceas em plantas de palma forrageira. Adaptado de Borland et al. (2014).....     | 31 |
| Figura 5. Observações de cultivos consorciados em diversas regiões do mundo, em função do índice de aridez. Adaptado de Martin-Guay et al. (2018)..... | 35 |
| Figura 6. Representação de área com sistema de cultivo consorciado de palma forrageira e sorgo.....                                                    | 36 |

### CAPÍTULO 2

|                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Condições ambientais e disponibilidade hídrica via irrigação durante o período experimental de fevereiro de 2017 a junho de 2018 para o município de Serra Talhada-PE, Brasil ..... | 64 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### CAPÍTULO 3

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1. Monitoramento das condições ambientais e disponibilidade hídrica via irrigação durante o período experimental (fevereiro de 2017 a junho de 2018) para o município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 92  |
| Figura 2. (A) Taxa de crescimento absoluto (Mg ha <sup>-1</sup> °Cdia <sup>-1</sup> ) e (B) taxa de crescimento relativo (Mg Mg <sup>-1</sup> °Cdia <sup>-1</sup> ) de três clones de palma forrageira (OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda) irrigados sob sistema consorciado e exclusivo (Exc.) com três cultivares de sorgo (467, SF11 e 2502). Os pontos representam os valores médios das quatro repetições entre os sistemas de cultivo; * - Diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade..... | 96  |
| Figura 3. (A) Taxa de assimilação líquida (Mg ha <sup>-1</sup> °Cdia <sup>-1</sup> ) e (B) taxa de área do cladódio específica (ha Mg <sup>-1</sup> ) de três clones de palma forrageira (OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda) irrigados sob sistema consorciado e exclusivo (Exc.) com três cultivares de sorgo (467, SF11 e 2502). Os pontos representam os valores médios das quatro repetições entre os sistemas de cultivo; * - Diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. ....              | 99  |
| Figura 4. Taxa de índice de área do cladódio (ha ha <sup>-1</sup> °Cdia <sup>-1</sup> ) de três clones de palma forrageira (OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda) irrigados sob sistema consorciado e exclusivo (Exc.) com três cultivares de sorgo (467, SF11 e 2502). Os pontos representam os valores médios das quatro repetições entre os sistemas de cultivo; * - Diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.....                                                                             | 101 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5. Determinação da fenofase vegetativa e momento de corte com base na taxa de massa seca de clones de palma forrageira (OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda) em sistemas de cultivo exclusivo (Exc.) e consorciado com cultivares de sorgo (467, SF11 e 2502)..... | 103 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## CAPÍTULO 4

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1. Representação das variáveis meteorológicas (chuva e evapotranspiração de referência), e irrigação durante o período experimental no município de Serra Talhada-PE, Brasil .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 115 |
| Figura 2. Análise de componentes principais (ACP) para variáveis biométricas e de produtividade dos clones de palma forrageira sob sistema exclusivo e diferentes consórcios com cultivares de sorgo (467, SF11 e 2502). OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda. Exc. - Exclusivo; AP - Altura da planta (cm); LP - Largura da planta (cm); NTC - Número total de cladódio; CC - Comprimento do cladódio (cm); LC - Largura do cladódio (cm); EC - Espessura do cladódio (mm); PC - Perímetro do cladódio (cm); AC - Área do cladódio (cm <sup>2</sup> ); IAC - Índice de área do cladódio (cm <sup>2</sup> cm <sup>-2</sup> ); MF - Massa fresca (Mg ha <sup>-1</sup> ); MS - Massa seca (Mg ha <sup>-1</sup> ) e, CMS - Conteúdo de matéria seca (Mg MS Mg <sup>-1</sup> MF).... | 119 |

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2

- Tabela 1. Produtividade de massa fresca (MF, Mg ha<sup>-1</sup>) e massa seca (MS, Mg ha<sup>-1</sup>) dos quatro ciclos produtivos do sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e da palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*), no período de 2017 a 2018.....69
- Tabela 2. Parâmetros químico-bromatológicas de clones de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) em sistema de cultivo exclusivo e consorciado com sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). ..... 73
- Tabela 3. Índices de eficiência biológica de clones de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) em consórcio com cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). .....75
- Tabela 4. Índices de habilidade competitiva de clones de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) em consórcio com cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)..79

### CAPÍTULO 3

- Tabela 1. Características físico-químicas do Cambissolo Háplico da área experimental na profundidade de 0,00 a 0,20 m..... 90

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

|                       |                                                           |                                                              |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $a$                   | Valor máximo da taxa (distância entre as duas assíntotas) | cm ou mm                                                     |
| A                     | Agressividade                                             | -                                                            |
| AC                    | Área do cladódio                                          | cm <sup>2</sup>                                              |
| ACP                   | Análise de Componentes Principais                         | -                                                            |
| Al                    | Alumínio                                                  | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>                           |
| AP                    | Altura da planta                                          | cm                                                           |
| APAR                  | Radiação fotossinteticamente ativa absorvida              | W m <sup>-2</sup> ou<br>MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> |
| $b$                   | Número de graus dias necessários para o início da taxa.   | °Cdia                                                        |
| Ca <sup>2+</sup>      | Cálcio                                                    | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>                           |
| CAM                   | <i>Crassulasean Acid Metabolism</i>                       | -                                                            |
| CC                    | Comprimento do cladódio                                   | cm                                                           |
| CE <sub>e</sub>       | Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo    | dS m <sup>-1</sup>                                           |
| CET                   | Coefficiente equivalente de terra                         | -                                                            |
| CMS                   | Conteúdo de matéria seca                                  | Mg MS Mg <sup>-1</sup> MF                                    |
| C <sub>orgânico</sub> | Carbono orgânico                                          | g kg <sup>-1</sup>                                           |
| CP1                   | Componente principal 1                                    | %                                                            |
| CP2                   | Componente principal 2                                    | %                                                            |
| CT                    | Carboidratos totais                                       | %                                                            |
| CTC                   | Capacidade de troca de cátions                            | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>                           |
| CZ                    | Cinzas                                                    | %                                                            |
| DAC                   | Dias após o corte                                         | dias                                                         |
| DIVMS                 | Digestibilidade <i>in vitro</i> da matéria seca           | %                                                            |
| dS m <sup>-1</sup>    | deciSiemens por metro                                     | dS m <sup>-1</sup>                                           |
| EC                    | Espessura do cladódio                                     | mm                                                           |
| EE                    | Extrato etéreo                                            | %                                                            |
| ETo                   | Evapotranspiração de referência                           | mm                                                           |
| FDA                   | Fibra em detergente ácido                                 | %                                                            |
| FDN                   | Fibra em detergente neutro                                | %                                                            |
| fPAR                  | Fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida    | -                                                            |
| GD                    | Graus-dia                                                 | °C                                                           |
| H                     | Hidrogênio                                                | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>                           |
| ha                    | Hectare                                                   | ha                                                           |
| IAC                   | Índice de área do cladódio                                | cm <sup>2</sup> cm <sup>-2</sup>                             |
| IPA                   | IPA Sertânia                                              | -                                                            |
| IVM                   | Índice de vantagem monetária                              | R\$ ha <sup>-1</sup>                                         |
| K                     | Coefficiente de adensamento relativo                      | -                                                            |
| K <sup>+</sup>        | Potássio                                                  | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>                           |
| Kc                    | Coefficiente de cultura                                   | -                                                            |
| kg                    | Quilograma                                                | kg                                                           |
| km <sup>2</sup>       | Quilômetro quadrado                                       | km <sup>2</sup>                                              |

|           |                                                                                                                |                                 |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| $K_{ps}$  | Coefficiente de adensamento relativo da palma sobre o sorgo                                                    | -                               |
| $K_{sp}$  | Coefficiente de adensamento relativo do sorgo sobre a palma                                                    | -                               |
| L         | Litro                                                                                                          | L                               |
| LC        | Largura do cladódio                                                                                            | cm                              |
| LP        | Largura da planta                                                                                              | cm                              |
| m         | Metro                                                                                                          | m                               |
| M.O       | Matéria orgânica                                                                                               | $g\ kg^{-1}$                    |
| MF        | Massa Fresca                                                                                                   | $Mg\ ha^{-1}$                   |
| mg        | Miligrama                                                                                                      | mg                              |
| $Mg^{2+}$ | Magnésio                                                                                                       | $cmol_c\ dm^{-3}$               |
| Miu       | Miúda                                                                                                          | -                               |
| mm        | Milímetro                                                                                                      | mm                              |
| mM        | Milimolar                                                                                                      | mM                              |
| MM        | Matéria mineral                                                                                                | %                               |
| MS        | Massa Seca                                                                                                     | $Mg\ ha^{-1}$                   |
| $Na^+$    | Sódio                                                                                                          | $cmol_c\ dm^{-3}$               |
| NT        | Nitrogênio total                                                                                               | %                               |
| NTC       | Número total de cladódio                                                                                       | unidade                         |
| °C        | Graus Celsius                                                                                                  | °C                              |
| OEM       | Orelha de Elefante Mexicana                                                                                    | -                               |
| P         | Fósforo                                                                                                        | $mg\ dm^{-3}$                   |
| PB        | Proteína bruta                                                                                                 | %                               |
| PC        | Perímetro do cladódio                                                                                          | cm                              |
| PGAR      | Perda e/ou ganho real de rendimento                                                                            | -                               |
| pH        | Potencial hidrogeniônico                                                                                       | -                               |
| RAET      | Razão de área equivalente no tempo                                                                             | -                               |
| SB        | Soma de bases                                                                                                  | $cmol_c\ dm^{-3}$               |
| SF11      | Cultivar de sorgo SF11                                                                                         | -                               |
| TACE      | Taxa de área do cladódio específica                                                                            | $ha\ Mg^{-1}$                   |
| TAL       | Taxa de assimilação líquida                                                                                    | $Mg\ ha^{-1}\ ^\circ Cdia^{-1}$ |
| Tb        | Temperatura base inferior                                                                                      | °C                              |
| TCA       | Taxa de crescimento absoluto                                                                                   | $Mg\ ha^{-1}\ ^\circ Cdia^{-1}$ |
| TCR       | Taxa de crescimento relativo                                                                                   | $Mg\ Mg^{-1}\ ^\circ Cdia^{-1}$ |
| TIAC      | Taxa de índice de área do cladódio                                                                             | $ha\ ha^{-1}\ ^\circ Cdia^{-1}$ |
| Tm        | Temperatura do ar máxima diária                                                                                | °C                              |
| Tmín      | Temperatura do ar mínima diária                                                                                | °C                              |
| UET       | Uso eficiente da terra                                                                                         | -                               |
| V%        | Saturação por bases                                                                                            | %                               |
| x0        | Número de graus dias necessários pela planta para expressar 50% do máximo da taxa (ponto de inflexão da curva) | $^\circ Cdia$                   |

|                 |                                                                            |                        |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| y               | Variável resposta                                                          | -                      |
| Y <sub>aa</sub> | Produtividade da palma forrageira em sistema exclusivo                     | Mg ha <sup>-1</sup>    |
| Y <sub>ab</sub> | Produtividade da palma forrageira em sistemas consorciados                 | Mg ha <sup>-1</sup>    |
| Y <sub>ba</sub> | Produtividade do sorgo em sistemas consorciados                            | Mg ha <sup>-1</sup>    |
| Y <sub>bb</sub> | Produtividade do sorgo em sistema exclusivo                                | Mg ha <sup>-1</sup>    |
| Z <sub>ab</sub> | Proporção de plantio da palma forrageira consorciada com o sorgo           | -                      |
| Z <sub>ba</sub> | Proporção de plantio de sorgo forrageira consorciada com a palma           | -                      |
| 467             | Cultivar de sorgo 467                                                      | -                      |
| 2502            | Cultivar de sorgo 2502                                                     | -                      |
| IPS             | Índice de produtividade do sistema                                         | Mg MS ha <sup>-1</sup> |
| MSt             | Matéria seca total                                                         | %                      |
| %               | Porcentagem                                                                | %                      |
| †               | Dados transformados pelo método de Raiz quadrada (x+0,5)                   | -                      |
| **              | Dados químico-bromatológicos referente ao último ciclo da cultura do sorgo | -                      |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO 1 - Interação de agroecossistema consorciado com palma-sorgo em ambiente semiárido: uma revisão .....                                                                   | 20 |
| Resumo .....                                                                                                                                                                     | 20 |
| 1. Introdução .....                                                                                                                                                              | 22 |
| 2. Revisão de Literatura .....                                                                                                                                                   | 24 |
| 2.1 Mudanças climáticas e produção de plantas forrageiras .....                                                                                                                  | 24 |
| 2.2 Uso de irrigação em ambientes áridos e semiáridos como estratégia de produção de forragem.....                                                                               | 26 |
| 2.3 Palma forrageira .....                                                                                                                                                       | 29 |
| 2.4 Sorgo forrageiro.....                                                                                                                                                        | 33 |
| 3. Consorciação entre culturas e plantio adensado .....                                                                                                                          | 34 |
| 3.1 Uso de recursos biofísicos em consórcio palma-sorgo.....                                                                                                                     | 36 |
| 4. Conclusão .....                                                                                                                                                               | 38 |
| 5. Referências .....                                                                                                                                                             | 39 |
| CAPÍTULO 2 - A complementaridade interespecífica do consórcio palma-sorgo contribui na eficiência biológica e habilidade competitiva sob sistemas de agricultura bioessalina ... | 58 |
| Resumo .....                                                                                                                                                                     | 58 |
| 1. Introdução .....                                                                                                                                                              | 60 |
| 2. Material e métodos .....                                                                                                                                                      | 62 |
| 2.1. <i>Descrição do local</i> .....                                                                                                                                             | 62 |
| 2.2. <i>Espécies estudadas e design experimental da área</i> .....                                                                                                               | 62 |
| 2.3. <i>Rendimento de biomassa da palma forrageira e do sorgo</i> .....                                                                                                          | 65 |
| 2.4. <i>Aplicações de índices de eficiência biológica e habilidade competitiva</i> .....                                                                                         | 65 |
| 2.5. <i>Índice econômico</i> .....                                                                                                                                               | 68 |
| 2.6. <i>Análise estatística</i> .....                                                                                                                                            | 68 |
| 3. Resultados e discussão .....                                                                                                                                                  | 69 |
| 3.1. <i>Rendimento das culturas</i> .....                                                                                                                                        | 69 |
| 3.2. <i>Composição química de forragem</i> .....                                                                                                                                 | 73 |
| 3.3. <i>Eficiência biológica e habilidade competitiva dos sistemas</i> .....                                                                                                     | 75 |
| 4. Conclusões.....                                                                                                                                                               | 81 |
| 5. Referências .....                                                                                                                                                             | 82 |
| CAPÍTULO 3 - Como a utilização dos sistemas de consórcio palma-sorgo causam impactos no crescimento da palma forrageira.....                                                     | 87 |
| Resumo .....                                                                                                                                                                     | 87 |
| 1. Introdução .....                                                                                                                                                              | 89 |
| 2. Material e métodos .....                                                                                                                                                      | 90 |
| 2.1. <i>Descrição do local experimental</i> .....                                                                                                                                | 90 |

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2. <i>Espécies estudadas e design experimental da área</i> .....                                                                                   | 90  |
| 2.3. <i>Avaliação do crescimento e fenologia da palma forrageira</i> .....                                                                           | 93  |
| 2.4. <i>Análise estatística</i> .....                                                                                                                | 95  |
| 3. Resultados e discussão .....                                                                                                                      | 95  |
| 3.1. <i>Análise de crescimento das culturas</i> .....                                                                                                | 95  |
| 3.2. <i>Fenofase e momento de corte da palma forrageira</i> .....                                                                                    | 102 |
| 4. Conclusões.....                                                                                                                                   | 105 |
| 5. Referências .....                                                                                                                                 | 106 |
| CAPÍTULO 4 - O papel da utilização de análise multivariada para distinções morfogênicas de clones de palma forrageira em sistemas de consórcio ..... |     |
| Resumo .....                                                                                                                                         | 110 |
| 1. Introdução .....                                                                                                                                  | 112 |
| 2. Material e métodos .....                                                                                                                          | 113 |
| 2.1. <i>Material vegetal e design experimental da área</i> .....                                                                                     | 113 |
| 2.2. <i>Local de estudo</i> .....                                                                                                                    | 116 |
| 2.3. <i>Avaliação do crescimento da palma forrageira</i> .....                                                                                       | 116 |
| 2.4. <i>Análise de dados</i> .....                                                                                                                   | 118 |
| 3. Resultados e discussão .....                                                                                                                      | 118 |
| 3.1. <i>Análises biométricas e de biomassas ao longo do tempo da palma forrageira</i> .....                                                          | 118 |
| 4. Conclusões.....                                                                                                                                   | 123 |
| 5. Referências .....                                                                                                                                 | 124 |

## **CAPÍTULO 1 - Interação de agroecossistema consorciado com palma-sorgo em ambiente semiárido: uma revisão**

**Resumo:** As mudanças climáticas e salinização do solo e da água proporcionam declínios na produção de forragem e comprometem o rendimento dos rebanhos. Logo, o uso de espécies forrageiras adaptadas e de alto valor nutricional, torna-se uma alternativa para manter a disponibilidade de alimentos em períodos sazonais. Dentre estas espécies, a palma forrageira é um alimento recomendado para os ruminantes, devido ao alto teor de água em suas estruturas, boa aceitabilidade e baixo custo de produção. A cultura do sorgo, também apresenta elevado potencial forrageiro, alta produção de matéria seca, baixa exigência hídrica, e adaptabilidade à consorciação, auxiliando em melhores produções em ambientes áridos e semiáridos. A utilização de sistemas consorciados acrescidos com a irrigação é de grande relevância para o manejo sustentável da pecuária local, uma vez que esse tipo de sistema maximiza o rendimento de forragem das áreas produtivas. Assim, objetiva-se com a presente revisão ressaltar a importância da condução de estudos relacionados ao consórcio palma-sorgo em condições irrigadas para subsidiar políticas de produção contínua de forragem. Os achados dessa revisão encorajam pesquisas no planejamento agrícola de área em ambientes negligenciados sob condições semiáridas com o consórcio de palma-sorgo para produção de forragem.

**Palavras-chave:** consórcio, produção de forragem, gramíneas, cactáceas.

**Interaction of agroecosystem consortium with forage cactus-sorghum in the semi-arid environment: a review**

**Abstract:** Climate change and salinization of soil and water lead to declines in forage production and compromise herd yield. Therefore, the use of adapted forage species of high nutritional value becomes an alternative to maintain the availability of food in seasonal periods. Among these species, forage cactus is a recommended food for ruminants, due to the high water content in their structures, good acceptability, and low production cost. Sorghum cultivation also has high forage potential, high dry matter yield, low water requirement, and adaptability to the intercropping, helping in better production in arid and semi-arid environments. The use of intercropped systems with irrigation is of great relevance for the sustainable management of local livestock since this type of system maximizes the forage yield of productive areas. Thus, the objective of this review is to emphasize the importance of conducting studies related to the forage cactus-sorghum consortium under irrigated conditions to subsidize policies for continuous forage production. The findings of this review encourage research in area agricultural planning in neglected environments under semi-arid conditions with the forage cactus-sorghum consortium for forage production.

**Keywords:** consortium, forage production, grasses, cacti.

## 1. Introdução

Na produção agropecuária, as condições meteorológicas são fatores decisivos para a tomada de decisão, sobretudo em zonas áridas e semiáridas (Bakali et al., 2016; Pino & Heinrichs, 2017). Nestas regiões, o desequilíbrio entre a precipitação pluvial e a evapotranspiração potencial gera fenômenos de seca, os quais em conjunto com as mudanças do clima intensificam a vulnerabilidade socioeconômica local (Eakin et al., 2014; Marengo et al., 2016).

Essas características edafoclimáticas reduzem a disponibilidade hídrica em quantidade e qualidade, devido a salinização do solo e da água. A produção de forragem é comprometida, ocasionando declínio no rendimento dos rebanhos (Bakali et al., 2016; Mora et al., 2017). Logo, o uso de espécies forrageiras adaptadas e de alto valor nutricional, torna-se uma eficiente alternativa para manter a disponibilidade de alimentos em períodos sazonais (Santos et al., 2017).

Dentre as culturas potencialmente adaptadas as condições áridas e semiáridas, a palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) da família Cactaceae, originária do México, constitui-se em uma alternativa de alimento para os ruminantes em todas as épocas do ano e, principalmente em períodos de estiagem, pois possui elevado rendimento de biomassa fresca, alto teor de água em suas estruturas, boa aceitabilidade e baixo custo de produção (Falcão et al., 2013; Gusha et al., 2015; Marques et al., 2017). É uma cultura imprescindível para ambientes áridos e semiáridos, uma vez que a vegetação nativa não atende à demanda contínua de alimentos para os rebanhos (Queiroz et al., 2015).

Por se tratar de uma planta que apresenta desenvolvimento vegetativo lento, como também baixos teores de fibra, a utilização de sistemas consorciados de palma e sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) auxilia no aumento da produção de alimentos (Bezerra et al., 2007; Cavalcante et al., 2014). O sorgo apresenta elevado potencial forrageiro, alta produção de fibras e matéria seca, tolerância a solos salino-alcálinos, baixa exigência hídrica, alta tolerância ao déficit hídrico e adaptabilidade a consorciação (Pino & Heinrichs, 2017; Nxele et al., 2017).

Práticas como sistemas consorciados são de grande relevância para o manejo sustentável da pecuária local. Em culturas alimentícias do Semiárido brasileiro, é uma prática comumente aplicada, e, empregada pelos produtores para melhorar a eficiência de atributos agrônômicos, por meio da intensificação do uso da terra com mais de uma

espécie plantada na mesma área, e ao mesmo tempo. Entretanto, o uso da consorciação deve ser seguido de uma avaliação agrônômica, ecológica e socioeconômica, para a compreensão dos seus efeitos sobre o sistema agrícola. Nesse tipo de avaliação, considera-se a coparticipação das culturas na redução dos riscos de perdas, por causa das condições adversas (*i.e.*, secas, altas temperaturas do ar, pragas e doenças) e no aumento da produção e retorno econômico para o sucesso da atividade (Souza et al., 2011; Atis et al., 2012; Yilmaz et al., 2015; Diniz et al., 2017).

Além disso, para que haja bons rendimentos das culturas, e, que as mesmas não sofram com as condições climáticas ou eventos extremos, a utilização da irrigação em períodos críticos é uma prática de extrema importância, que auxilia na manutenção da produção das culturas e favorece na diminuição de gastos excessivos com água devido a eficiência do sistema (El-Wahed et al., 2017).

Na literatura, alguns estudos apontam o uso de irrigação em cultivos de palma (*Opuntia* e *Nopalea*), sendo uma estratégia interessante capaz de promover incrementos significativos na sua produtividade (Flores-Hernández et al., 2004; Pereira et al., 2015; Queiroz et al., 2015; Morais et al., 2017; Amorim et al., 2017). Com base nestes estudos, observa-se que anos com pelo menos 493 mm distribuídos regularmente durante sete meses em ambiente Semiárido, a aplicação de água via irrigação nessa cultura não é necessária (Silva et al., 2017).

O uso da irrigação na cultura do sorgo também apresenta elevados rendimentos de biomassa, devido o mesmo apresentar alta eficiência no uso da água e competição, sendo uma cultura com alto potencial para o Semiárido brasileiro (Yimam et al., 2015; Campi et al., 2016). Em consórcio com a palma, os benefícios produtivos do sistema de produção são ainda maiores (Farias et al., 2000; Amorim et al., 2017; Diniz et al., 2017), já que há um incremento no rendimento, na qualidade e na ingestão de forragem pelos animais, reduzindo os gastos com alimentos concentrados (Lopes et al., 2017).

O consórcio palma-sorgo irrigado e adensado em agricultura bioessalina é uma configuração vantajosa para o sistema de produção agropecuário, por causa do potencial forrageiro destas duas espécies, em quantidade e qualidade, e do efeito compensatório do uso da água em função dos seus distintos metabolismos fotossintéticos. A palma, uma planta CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*), transpira predominantemente no período noturno, e o sorgo, uma planta C4, que transpira durante o período diurno (Taiz et al., 2017). Além dos benefícios citados, nesse tipo de consórcio a transferência de água para atmosfera por evaporação no sistema é minimizada, aumentando a eficiência

de conversão de água em matéria seca. Logo, é importante a condução de mais estudos relacionados ao consórcio palma-sorgo em condições irrigadas para subsidiar políticas de produção contínua de forragem.

## **2. Revisão de Literatura**

### **2.1 Mudanças climáticas e produção de plantas forrageiras**

As mudanças climáticas são fatores que causam risco a todo o setor agropecuário e impactos negativos severos desequilibrando várias regiões do mundo. Sob condições atuais, as mudanças climáticas representam uma ameaça mundial para todas as culturas, impedindo o desenvolvimento sustentável dos cereais, diminuição da biodiversidade local e elevados prejuízos agrícolas, decorrente da vulnerabilidade dessas regiões as mudanças climáticas. Em faixas territoriais do mundo, as regiões áridas e semiáridas são representadas por 55% das terras, compreendendo países da América Latina e Caribe, como Argentina, Brasil, Chile e México, abrangendo cerca de 313 milhões de hectares, o que corresponde a 80% das áreas tropicais e subtropicais (Cândido et al., 2005; Hussain et al., 2018).

No Brasil, existem diferentes zonas climáticas, que vão de clima quente superúmido no Noroeste até o temperado úmido no Sul. Conforme a classificação climática de Köppen (1936) há desde o clima Tropical (Af, Am, Aw, As), Semiárido (BSh) até o Subtropical Úmido (Cfa, Cfb, Cwa, Cwb, Cwc, Csa, Csb) na área territorial do país (Alvares et al., 2013; Zhang et al., 2016).

As regiões semiáridas ocupam boa parte das áreas agrícolas do mundo. No Brasil, o Semiárido possui aproximadamente uma extensão territorial de 1,03 milhões de km<sup>2</sup>, sendo o Estado de Pernambuco com cerca de 87,60% da sua área inserida nesse tipo de ecossistema, situado entre as coordenadas 2,5° S e 16,1° S e 34,8° W e 46° W. Considerada como uma região de terras secas e de extrema vulnerabilidade climática é um dos semiáridos mais populosos do mundo (Pereira Júnior, 2007; Marengo et al., 2016; Ministério da Integração Nacional, 2017).

O clima semiárido é bem característico e predominante na região Nordeste, apresentando elevadas temperaturas do ar e baixos índices de precipitação pluvial ( $\leq 800 \text{ mm ano}^{-1}$ ), longos períodos de seca na maioria dos meses do ano, Índice de Aridez de Thornthwaite inferior a 0,50 e frequência de ocorrência em seis a cada 10 anos

(60%), o que resulta em baixa umidade relativa do ar e elevada demanda atmosférica, causando muitas vezes, catástrofes naturais, mudanças na vegetação e bastante prejuízo no setor agropecuário (Thornthwaite, 1948; Cunha et al., 2015; Paredes-Trejo et al., 2017).

Essas regiões de grandes defasagens de chuva são conhecidas como “Polígonos da Seca” que contemplam 1.189 municípios de nove Estados do país (e.g., Alagoas, Bahia, Ceará, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe), com características críticas no abastecimento hídrico (Santos & Farias, 2017; Ministério da Integração Nacional, 2017).

Devido à variabilidade climática da região, estudos do comportamento espaço-temporal dos eventos de precipitação pluvial e evapotranspiração potencial, tornam-se de extrema importância, já que a água é um fator limitante na produção de culturas agrícolas, e sua escassez pode comprometer o rendimento produtivo das mesmas (Silva & Reis, 2017; Marra & Morin, 2017) (Figura 1). Fatores abióticos e edáficos como seca, temperatura do ar, profundidade e salinidade dos solos são constantes em regiões com clima semiárido, causando efeitos negativos às culturas e aos microrganismos do solo, como intoxicação iônica, seca fisiológica e diminuição na assimilação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Meena et al., 2016; Egamberdieva et al., 2017).

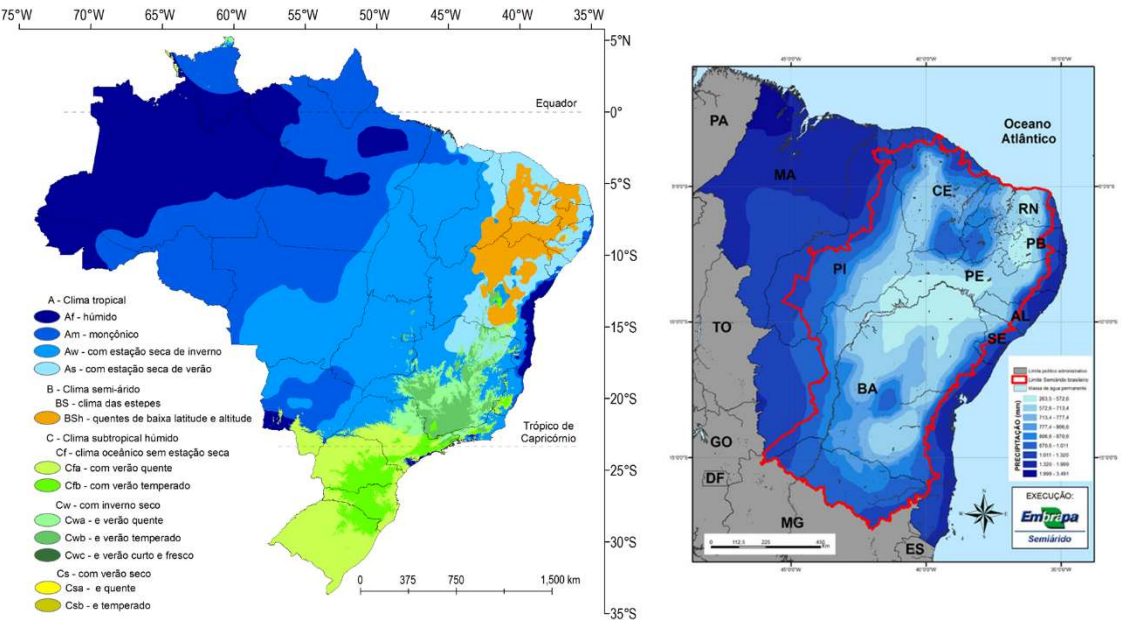


Figura 1. Mapa do Brasil e da região Nordeste com delimitação geográfica do Semiárido e índices pluviométricos. Adaptado de Alvares et al. (2013).

A escassez de cobertura vegetal sobre o solo é bastante comum durante longos períodos, o que maximiza os processos de erosão dos solos (*i.e.*, hídrica e eólica), como também reduz a capacidade de retenção de água e, possui predominância de vegetação seca e decíduas ou caducas típicas do Bioma Caatinga (Rocha & Soares, 2015; Silva et al., 2017; Vaezi et al., 2017).

## **2.2 Uso de irrigação em ambientes áridos e semiáridos como estratégia de produção de forragem**

Uma das formas de mitigação dos problemas acarretados pelo deficit hídrico é a utilização de sistemas de irrigação para contornar o efeito do deficit hídrico e, disponibilização de água para as culturas, já que a seca ocorre em grande frequência causando problemas nos ecossistemas de pastagem. Porém, nas regiões de clima árido e semiárido, a disponibilidade de cursos de água e mananciais de boa qualidade é baixa devido à elevada demanda evaporativa e, as águas subterrâneas possuem altos teores de sais, necessitando de uso racional e técnicas eficientes (Makarana et al., 2017; Ergon et al., 2018), forçando assim o uso dessas águas nas áreas de produção.

O uso de águas de qualidade inferior para irrigação, como as subterrâneas provenientes de poços é bastante comum na agricultura, pois em muitos casos são as únicas fontes de água disponível (Mbarki et al., 2017).

Na maioria dos casos, águas com elevadas cargas de sais representam alto custo para dessalinização e liberam elementos poluentes (*e.g.*, CO<sub>2</sub> liberado dos equipamentos e a salmoura do processo de dessalinização). Como o destino desse tipo de água na agricultura cresce cada vez mais, torna-se válida a prática de agricultura bioessalina para a produção agropecuária (Masters et al., 2007; Díaz et al., 2018), sendo esse tipo de agricultura bastante comum e, vem ganhando destaque em ambientes áridos e semiáridos de todo o mundo (Díaz et al., 2018).

Estima-se que, futuramente, as águas de boa qualidade ficarão menos acessíveis nos ecossistemas, necessitando assim de sistemas eficientes e da utilização de águas de qualidade inferior para irrigação (Glenn et al., 2013; Dar et al., 2017).

Em algumas regiões do mundo de clima árido e semiárido, a irrigação com água salina representa o futuro da agricultura, já que a escassez de água de boa qualidade é elevada, tornando-se o seu uso de forma frequente e/ou exclusiva. As águas de baixa qualidade podem promover alterações fisiológicas nas culturas (Wang et al., 2016),

entretanto, estudos realizados por Katerji et al. (2003) mostraram que culturas tolerantes as águas salinas não diminuem a eficiência do uso da água, diferentemente das culturas sensíveis, que apresentam quedas severas de rendimento devido ao acúmulo de sais no solo (Wang et al., 2016).

As plantas quando são submetidas as condições de ambientes salinos, apresentam diferentes respostas fisiológicas, bioquímicas e morfológicas; essa característica está relacionada ao seu grau de tolerância à salinidade. As espécies classificadas como “halófitas” são caracterizadas por serem tolerantes a salinidade, suportando níveis superiores a 500 mM de  $\text{Na}^+$ . Já as “glicófitas” são sensíveis à salinidade e toleram pouco mais de 200 mM de  $\text{Na}^+$ . Sejam os níveis de salinidade altos ou baixos, as halófitas e glicófitas possuem diferentes mecanismos de tolerância aos sais pela troca iônica do influxo e efluxo de  $\text{Na}^+$  (Figura 2) (Himabindu et al., 2016; Wu, 2018).

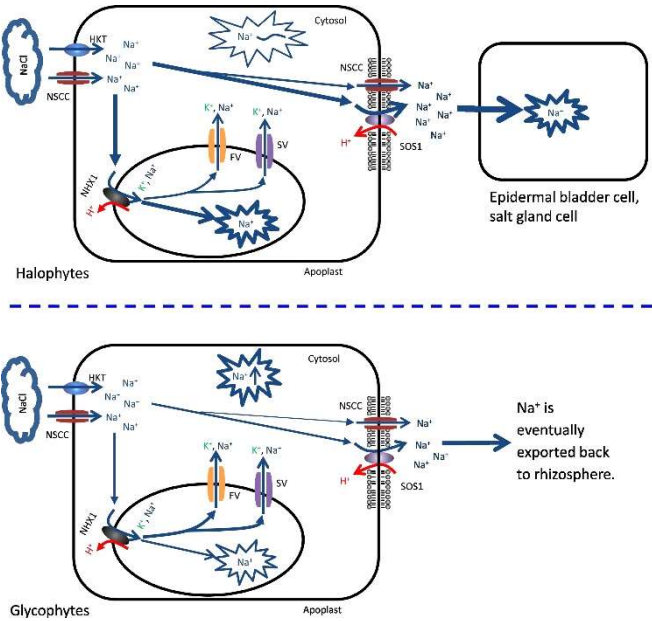


Figura 2. Estratégias do uso do  $\text{Na}^+$  pelas espécies halófitas e glicófitas. Adaptado de Wu et al. (2018).

Os solos de regiões áridas e semiáridas são mais suscetíveis a salinização, e de forma expressiva esse é um dos principais fatores abióticos na perda de produção agrícola. A salinização pode ser considerada primária (*i.e.*, processos naturais de formação do solo proveniente do tipo de rocha) ou secundária (*i.e.*, intervenção antrópica, mal uso de sistemas de irrigação e fertilizantes químicos) (Figura 3).

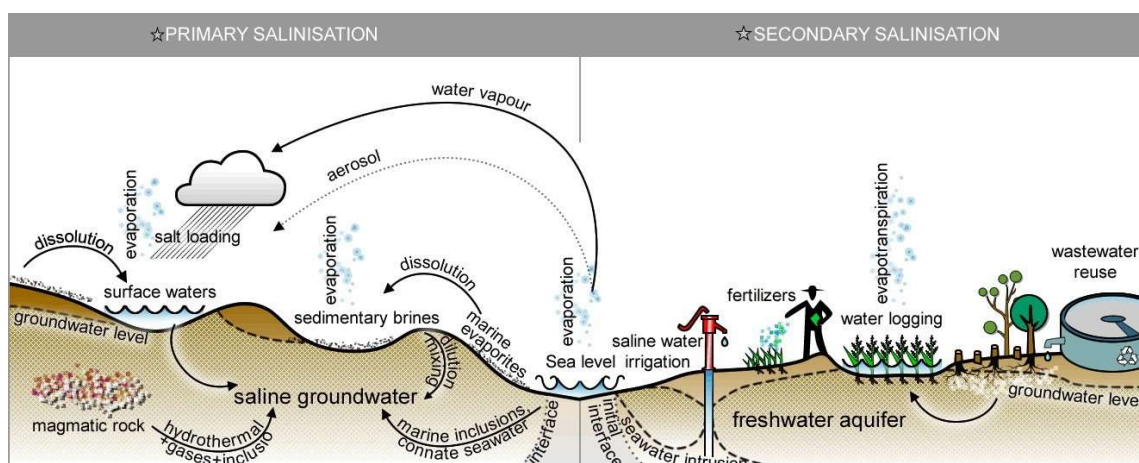


Figura 3. Processos de salinização primária e secundária dos solos. Adaptado de Daliakopoulos et al. (2016).

O solo por definição possui a classificação de salino, desde que o mesmo apresente uma condutividade elétrica do extrato de saturação  $\geq 4,0 \text{ dS m}^{-1}$ . Cerca de 20% das terras irrigadas de todo o globo terrestre ( $450.000 \text{ km}^2$ ) é afetada com a salinização. Este processo é maximizado quando são utilizados métodos de irrigação inapropriados, associado ao uso de águas com elevado aporte de sais e utilização errônea de fertilizantes químicos (Qadir et al., 2014; Daliakopoulos et al., 2016; Negrão et al., 2017; Nikalje et al., 2017; Bertazzini et al., 2018).

Os métodos tradicionais de irrigação são caracterizados pela baixa eficiência de aplicação, disponibilizando apenas em torno de 30% da água que é recalcada para as culturas. Métodos de irrigação superficial de alta vazão favorecem a perdas de água para fora do sistema e são gastos excessivos volumes de água, causando danos a natureza, diferentemente dos métodos localizados (Mostafa et al., 2017).

A irrigação localizada pelo método de gotejamento é um tipo de prática de alta eficiência na disponibilidade de água para as culturas a uma baixa pressão, vazão e gastos com energia elétrica, podendo economizar 65% da água aplicada em comparação aos métodos convencionais de irrigação. Esse tipo de sistema ocasiona mínima perturbação a estrutura do solo, diminui as perdas por escoamento superficial e evaporação, fazendo com que as plantas tenham um maior aproveitamento da água que é disponibilizada, já que o rendimento das culturas está relacionado com a oferta ótima de água (Gu et al., 2017; Jaafar et al., 2017; Mostafa et al., 2017).

O conhecimento de técnicas de manejo de irrigação como o balanço hídrico, balanço de energia, potencial de água na folha e a exigência das culturas são indispensáveis para torná-lo mais eficiente. As culturas possuem exigências hídricas diferentes, desse modo, a quantificação precisa dessa demanda de água e reposição no solo, evita eventos críticos nas suas fases fenológicas e, assim, perdas no rendimento produtivo (Dar et al., 2017; Jaafar et al., 2017; Consoli et al., 2018).

### 2.3 Palma forrageira

Com intuito de manter o rendimento das culturas sob condições estáveis perante as mudanças climáticas ocorridas ao passar dos anos, práticas agronômicas devem ser adotadas. Dentre elas, a escolha de espécies forrageiras adaptadas para compor o sistema de cultivo de uma área agrícola, torna-se de grande importância, já que a sazonalidade dos eventos climáticos, por muitas vezes causam prejuízos à lavoura (Elias et al., 2016; Teixeira et al., 2018).

Uma das culturas que apresenta uma elevada adaptação às condições edafoclimáticas do Semiárido brasileiro e das regiões áridas e semiáridas é a palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*). Estima-se que no Brasil essa cultura possui área plantada de 600.000 ha (Dubeux Júnior et al., 2013; Garcete-Gómez et al., 2017), sendo que mundialmente essa área plantada de palma para os devidos fins (e.g., consumo humano ou forragem) pode chegar a 1.000.000 ha (Cardador-Martínez et al., 2011), o que a caracteriza a cactácea de maior importância do planeta (Jesus, 2013).

A palma (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) foi inserida no Brasil primeiramente na região Nordeste em meados do século XIX, com intuito da produção de corante (carmim, proveniente do ácido carmínico) advindo da criação de insetos fêmeas adultos produtores dessa matéria prima, a Cochonilha (*Dactylopius coccus* Costa, 1829; Hemiptera: Dactylopiidae). Porém, a ação não foi bem sucedida, pois o inseto introduzido, a Cochonilha-do-carmim (*Dactylopius opuntiae* Cockerell, 1929; Hemiptera: Dactylopiidae), não apresentava alta produção de corante. Essa prática tornou esta praga a principal da cultura, sobretudo nos Estados de Pernambuco e Paraíba, onde dizimou diversos palmais (Pessoa, 1967; Ben-Dov, 2006; Santos et al., 2006; Lopes et al., 2009; Vasconcelos et al., 2009).

Apesar dos grandes transtornos causados pela Cochonilha-do-carmim (*Dactylopius opuntiae*), clones de palma forrageira com resistência ao seu ataque já são

299 difundidos na região para a produção de forragem, como a Miúda (*Nopalea*  
300 *cochenillifera* (L.) Salm-Dyck) e a Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta*  
301 (Haw.) Haw.) (Vasconcelos et al., 2009; Falcão et al., 2013).

302 Tratando-se de uma planta originária do México, e endêmica das Américas com  
303 bom desenvolvimento em regiões áridas e semiáridas da América do Sul e Central,  
304 África e, regiões do Mediterrâneo, a palma forrageira pertence ao Reino: Plantae;  
305 Divisão: *Embryophyta*; Subdivisão: *Angiospermea*; Classe: *Dicotyledoneae*; Subclasse:  
306 *Archiclamideae*; Ordem: *Opuntiales*; Família: Cactaceae. Dentre os diversos gêneros, os  
307 de maior destaque na região Nordeste são os gêneros *Opuntia* e *Nopalea*, possuidores  
308 de mais de 2.000 espécies e 178 gêneros de palma forrageira catalogadas (Silva &  
309 Santos, 2006; Aragona et al., 2017; Garcete-Gómez et al., 2017; Marques et al., 2017).

310 No Estado de Pernambuco ocorre a predominância do cultivo de dois gêneros de  
311 palma forrageira, o gênero *Opuntia* (e.g., os clones Gigante e Redonda [*Opuntia ficus-*  
312 *indica*]) e o gênero *Nopalea* (e.g., o clone Miúda [*Nopalea cochenillifera*]), sendo que o  
313 segundo clone é bastante difundido nos Estados de Alagoas e Paraíba (Farias et al.,  
314 2005; Castro et al., 2011).

315 Por se tratar de uma planta xerófila, com características morfofisiológicas  
316 peculiares, a palma forrageira se adapta muito bem a condições áridas e semiáridas do  
317 mundo. Essa adaptação está relacionada principalmente ao seu metabolismo  
318 fotossintético do tipo CAM (*Crassulasean Acid Metabolism*), fazendo com que a planta  
319 assimile o CO<sub>2</sub> no período noturno com auxílio da Fosfoenolpiruvato carboxilase.  
320 Durante o período diurno, há fechamento dos estômatos impedindo a perda de água para  
321 a atmosfera pela transpiração, favorecendo a manutenção do turgor celular e, seu pleno  
322 desenvolvimento em condições de baixo regime hídrico (Figura 4). Além disso, possui  
323 uma cutícula espessa e cerosa que reveste os cladódios por inteiro, reduzindo a perda de  
324 água por transpiração (auxiliando também contra o ataque de insetos vetores de  
325 doenças); baixa razão superfície/volume; estômatos reduzidos; vacúolos grandes; quatro  
326 tipos de raízes (estruturais, absorventes, em esporão e as desenvolvidas de aréolas), que  
327 absorvem a água de forma rápida e impede a perda da mesma quando o solo seca  
328 (Nobel, 2001; Silva & Santos, 2006; Nunes, 2011; Souza Filho et al., 2016; Melgar et  
329 al., 2017; Kim et al., 2018).

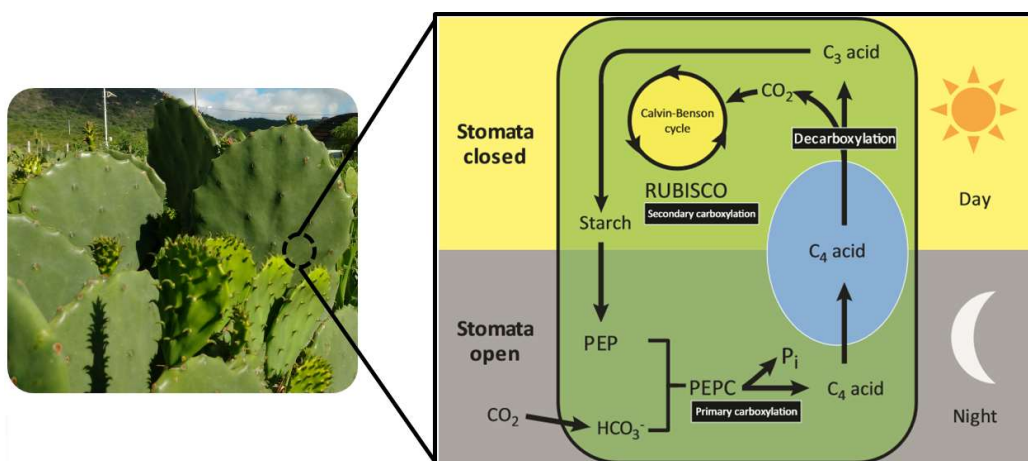


Figura 4. Representação simplificação do Metabolismo Ácido das Crassuláceas em plantas de palma forrageira. Adaptado de Borland et al. (2014).

Os gêneros *Opuntia* e *Nopalea* apresentam hastes modificadas (cladódios) com coloração de verde a verde-opaco, flores na sua grande maioria hermafroditas de escala de cores que vão do amarelo, rósea, roxo, laranja, vermelho e branco, estruturas suculentas, presença de aréolas (que auxilia na absorção de água atmosférica) com diversos espinhos (*i.e.*, espinhos persistentes e gloquídeos) e presença de betalaínas em suas estruturas que auxiliam no controle de estresse oxidativo (Anderson, 2001; López et al., 2009; Ju et al., 2012; Chahdoura et al., 2015; Arruda & Melo-de-Pinna, 2016; Melgar et al., 2017).

Essas características morfofisiológicas auxiliam a cultura na alta eficiência no uso da água e nutrientes, maximizando com seu rendimento produtivo e adaptação. Por apresentar cladódios suculentos, essas plantas conseguem manter-se túrgidas em períodos de escassez hídrica e mantém sua fotossíntese em escala normal (Liguori et al., 2013). Além disso, favorecem a sobrevivência da cultura em regiões com precipitação pluvial de até 150 mm ano<sup>-1</sup>. As plantas CAM são de 3 a 10 vezes mais eficientes que as plantas de metabolismo fotossintético C3 e C4, atingindo eficiências na faixa de 100 a 150 kg de água por kg de matéria seca (Felker et al., 2005; Yang et al., 2015; Bakali et al., 2016).

Com relação aos valores nutricionais, a palma forrageira pode ser consumida tanto por humanos como animais, desde órgãos vegetativos (*i.e.*, cladódios ou artículos) como órgãos reprodutivos (frutos). Os frutos de *Opuntia* spp. são alimentos benéficos à saúde e ricos em propriedades antioxidantes, betalaínas, betacianinas e vitamina C,

como também auxiliam no combate de algumas bactérias (Barba et al., 2017; Melgar et al., 2017). É uma cultura de grande deposição de biomassa nas suas estruturas, incrementando no seu desempenho produtivo quando suplementada com irrigações em regiões que possuem baixa disponibilidade hídrica (Liguori & Inglese, 2015).

Para o consumo animal, a maior fração aproveitada são os cladódios, e principalmente na região Nordeste do país, áreas com precipitação pluvial de 240 a 900 mm, a palma forrageira possui grandes benefícios na nutrição de ruminantes, por apresentar alto rendimento de biomassa fresca, alta palatabilidade, alta digestibilidade, carboidratos não fibrosos, rica em água, podendo ser disponibilizada na forma de farelo desidratada e, ou, picada *in natura* (Falcão et al., 2013; Gussha et al., 2015; Marques et al., 2017; Cruz Filho et al., 2019).

Os cladódios também podem ser utilizados na indústria em geral, para a produção de biocombustíveis, cosméticos, suplementos alimentares e recuperação de áreas degradadas impedindo processos de desertificação e processos erosivos do solo (Cushman et al., 2015; Souza Filho et al., 2016; Rouhou et al., 2018).

Devido ao seu valor energético e a alta concentração de carboidratos não fibrosos e proteínas, a palma forrageira auxilia na síntese de proteínas microbianas no rúmen do animal e ácidos voláteis, favorecendo a digestão e disponibilizando nutrientes para os animais principalmente nos períodos secos, devido à alta concentração de água em suas estruturas, tornando-se um alimento fundamental na dieta dos ruminantes (Costa et al., 2016; Rouhou et al., 2018; Cruz Filho et al., 2019).

Apesar das relevantes características bromatológicas que a palma forrageira possui para a alimentação animal, devido ao seu elevado conteúdo de água constituinte, esse tipo de alimento não pode ser ministrado de forma exclusiva, podendo causar problemas ruminais, como também o desencadeamento de diarreia nos animais e, queda no teor de gordura do leite (Gussha et al., 2015).

Como estratégia de contorno dessa situação, o fornecimento de alimentos com maior teor de fibra e suplementos proteicos, torna-se de extrema importância. A adição de outras plantas forrageiras, como leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.), milho (*Zea mays* L.), cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) e o sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) melhoram a dieta dos animais (Cushman et al., 2015; Gussha et al., 2015; Pino & Heinrichs, 2017). Outros benefícios é o melhor funcionamento do rúmen dos animais, absorção de nutrientes, maior ingestão de matéria seca, e

consequentemente na conversão alimentar (Siqueira et al., 2017), conferindo assim, em melhores rendimentos de produção no setor agropecuário.

## 2.4 Sorgo forrageiro

Apesar da vegetação da região Nordeste possuir aproximadamente 70% de suas espécies com potencial na alimentação animal, essa disponibilidade de alimento é sazonal, tornando-se indisponível nos períodos de estiagem (Nunes et al., 2016), sendo necessário o uso de outras espécies. O sorgo é uma cultura com elevado potencial forrageiro e promissora na produção de fibra, possui alta adaptabilidade às condições climáticas do Semiárido, alta eficiência no uso da água, baixo consumo de água (*i.e.*, 30 a 50% inferior ao milho) e tolerante a baixa fertilidade do solo (Pino & Heinrichs, 2017).

O sorgo é o quinto cereal mais cultivado no mundo, gramínea pertencente à ordem *Poales*, da família *Poaceae*, com aproximadamente 793 gêneros e 10.000 espécies. No Brasil são representados por 210 gêneros, 1.415 espécies, onde 21 gêneros e 467 espécies são endêmicas. A maioria das espécies apresentam hábito de crescimento cespitoso, perenes, poliploides e inflorescências plumosas de coloração esbranquiçada, tendo como principal representante o gênero *Sorghum*. Esse gênero apresenta uma característica marcante das suas inflorescências, às panículas (Watson & Dallwitz, 1992; Filgueiras et al., 2012; Liu et al., 2015; Upadhyaya et al., 2017).

A domesticação do sorgo da raça *bicolor*, iniciou-se na Etiópia e na região Sudeste do Saara, após migrar para o Oeste e Sul da África. Nesses territórios foi onde surgiram novas raças de sorgo, como: *Caudatum*, *Durra*, *Guinea* e *Kafir*, surgindo através de mecanismos naturais e induzidos de seleção, a introgressão, estabilização e recombinação (Wet & Huckabay, 1967; Wet, 1978; Upadhyaya et al., 2017).

Como se trata de uma cultura que não é nativa do hemisfério ocidental, a chegada do sorgo em países americanos é bem recente. Relatos constam que essa primeira introdução aconteceu em terras do Caribe advindas de escravos africanos. Em meados do século XIX, a cultura do sorgo chega aos Estados Unidos, via sementes trazidas por navios negreiros, onde passou por experimentações e períodos de adaptação para atender novas modalidades e diferentes métodos de cultivo, chegando assim através do melhoramento genético das cultivares crioulas as variedades que hoje são cultivadas (Von Pinho et al., 2007; Roby et al., 2017).

Por se tratar de uma cultura de metabolismo fotossintético do tipo C4 e de alto acúmulo de biomassa, a cultura do sorgo é amplamente cultivada em regiões de clima tropical, e zonas áridas e semiáridas do mundo, com precipitação pluvial variando de 400-750 mm ano<sup>-1</sup>. Devido às suas qualidades e potencial agrônômico, como baixa exigência hídrica e capacidade de rebrota (sobressaindo-se a cultura do milho) é cultivado em 99 países, totalizando uma área de 44 milhões de hectares. A utilização do mesmo na agricultura pode ser para diversos fins, como produção de forragem verde, silagem, biomassa, álcool, xarope e açúcar (Kumari et al., 2014; Campi et al., 2016; Roby et al., 2017) e ainda apresenta ciclo de crescimento rápido e elevado sequestro de carbono (Mehmood et al., 2017).

De acordo com pesquisas realizadas por Garofalo & Rinaldi (2013) e Campi et al. (2016), o sorgo possui maior sustentabilidade, principalmente em regiões com baixo recurso financeiro, devido a planta possuir melhor uso de água, comparando com outras culturas de potencial energético (*e.g.*, soja, milho e girassol). Além disso é uma planta tolerante a elevadas temperaturas do ar, deficit hídrico e salinidade (Wakchaure et al., 2016). Como alimento na nutrição animal, o sorgo é uma rica fonte em energia e fibras, apresentando elevados valores de massa seca, fibra em detergente neutro, proteína bruta, entre outros (Gomes et al., 2006; Pino & Heinrichs, 2017).

O uso da cultura do sorgo com outras espécies forrageiras em sistema consorciado e adensado é uma alternativa que favorece na produção de alimentos e aumenta a renda do produtor e resiliência do cultivo, já que a mesma possui alta eficiência no uso de radiação, água e nutrientes (Borghi et al., 2013; Tang et al., 2018; Samarappuli & Berti, 2018).

### **3. Consorciação entre culturas e plantio adensado**

Devido à crescente demanda de alimentos e a população mundial crescendo exponencialmente, a utilização de sistemas consorciados e o adensamento de plantio vem sendo uma alternativa para melhorar o aproveitamento das áreas agrícolas e dos recursos disponíveis, podendo ser adotados em sistema de grande escala. Entre os benefícios causados, o mais relevante é o aumento produtivo por unidade de área, favorecendo no melhor uso e eficiência do solo e, mantendo-se a diversidade ecológica (Figura 5) (Bezerra et al., 2007; Cavalcante et al., 2014; Diniz et al., 2017; Samarappuli & Berti, 2018). A diversidade ecológica da interação de espécies de habitat diferente

quando bem manejado, podem favorecer ao aumento da resiliência das culturas e manter significativamente a produção de forragem sob condições adversas (Mäkinen et al., 2015).

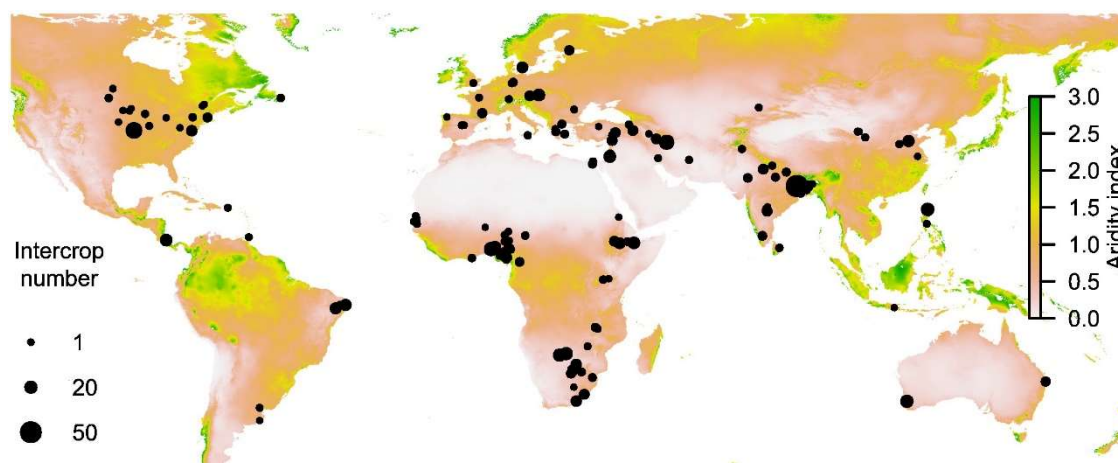


Figura 5. Observações de cultivos consorciados em diversas regiões do mundo, em função do índice de aridez. Adaptado de Martin-Guay et al. (2018).

A utilização de cultivos adensados é de fato uma ótima alternativa na maximização de rendimento produtivo, como também para contar os problemas causados pelas adversidades climáticas, desde que o mesmo seja manejado sob condições favoráveis para as plantas, favorecendo ainda na diminuição de ervas daninhas na área e resistência ao acamamento (Ren et al., 2016; Li et al., 2018; Hussain et al., 2018).

Ao longo do ciclo da cultura, com a entrada de luz no sistema, as plantas otimizam seu crescimento aumentando o número de perfilhos, índice de área foliar e o rendimento de biomassa acima do solo, tornando-se sustentável e produtivo (Tang et al., 2018). Em sistemas adensados e consorciados a produção de alimentos com o uso do sorgo, torna-se mais acentuada, devido a eficiência no uso de recursos biofísicos (Borghetti et al., 2013; Samarappuli & Berti, 2018).

O sistema consorciado é caracterizado pela implantação de cultivos com duas ou mais espécies em uma mesma área agrícola. Esse tipo de sistema pode prevalecer-se em uso de recursos comparado com o sistema exclusivo, sendo considerado como uma prática de cultivo sustentável (Figura 6). Para a escolha da espécie consorciada, algumas observações devem ser vistas, desde o hábito de crescimento às exigências das culturas, já que as mesmas irão competir por elementos essenciais, como água, nutrientes, luz e

espaço (Viegas Neto et al., 2012; Ren et al., 2016; Wang et al., 2017). Além disso, quando se trata de cultivos em ambientes áridos e semiáridos, o gerenciamento hídrico das culturas é uma observação de suma importância, para que as mesmas aproveitem ao máximo da água ofertada e diminua a perda por evaporação (Kim et al., 2017).

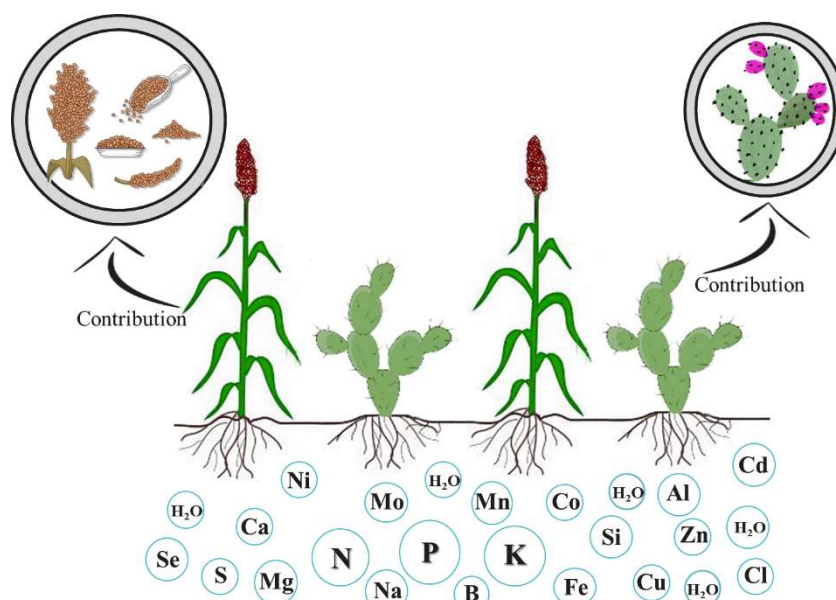


Figura 6. Representação de área com sistema de cultivo consorciado de palma forrageira e sorgo.

### 3.1 Uso de recursos biofísicos em consórcio palma-sorgo

Apesar do uso da irrigação em sistemas de cultivo de espécies forrageiras, deve-se priorizar culturas tolerantes ao déficit hídrico. Mesmo cultivos irrigados com água disponível no solo, as culturas estão sujeitas ao déficit de pressão de vapor ou seca atmosférica, que diminui substancialmente a umidade relativa do ar fazendo com que a cultura transpire demasiadamente (Hainaut et al., 2016). Ambientes de cultivo irrigado, com adubação do solo bem manejada e espaçamento bem distribuído entre plantas, favorecem elevados rendimentos de biomassa devido ao uso eficiente da radiação fotossinteticamente ativa (Chakwizira et al., 2018).

As culturas apresentam diferentes índices de área foliar, consequentemente a sua eficiência de utilização da radiação é variada. Essa eficiência expressa a capacidade que a cultura tem de fixar carbono atmosférico e, transformá-lo, em biomassa, podendo alternar conforme o sistema fotossintético e a variação das condições ambientais em escalas diurnas e sazonais (Gitelson et al., 2015). Estudos mostram que essa eficiência

pode ser alterada dependendo das variações ambientais, fases fenológicas das culturas, morfologia, arranjo arquitetônico das folhas e do dossel (Xu & Baldocchi, 2003; Pearcy et al., 2004; Houborg et al., 2011).

O estudo da eficiência de radiação também pode ser utilizado para determinar a densidade de plantio de culturas, já que a produção de biomassa está intimamente ligada com a fotossíntese (Purcell et al., 2002; Jia et al., 2018). A eficiência do uso da radiação agrega fatores de processos fisiológicos das culturas (*e.g.*, fotossíntese e respiração) podendo variar em função do período de crescimento das culturas e metabolismo fotossintético. Culturas do tipo C4 possuem normalmente maior eficiência de uso de radiação comparadas com culturas C3 (Gou et al., 2017).

Na palma forrageira, a radiação fotossinteticamente ativa diária é próxima da maioria das plantas CAM (Nobel, 1982). Devido a variação alométrica do dossel, espessura dos cladódios, altura da planta e ramificações, os modelos de interceptação de radiação são complexos de estimar (Cortazar et al., 1985; Drezner, 2017; Delgado-Fernández et al., 2017), e quando a radiação não é captada de forma eficiente acaba comprometendo a absorção de CO<sub>2</sub> pela planta (Ponce-Bautista et al., 2017).

O dossel das plantas possui uma estrutura tridimensional, sendo o mesmo a maior área de captação de radiação solar das culturas, podendo ser determinado por mensurações diretas e indiretas. Os métodos diretos consistem em mensurações biométricas da área foliar, já os métodos indiretos são mais complexos e partem de uma fundamentação teórica dos métodos diretos, os quais permitem utilizar sensores portáteis como ceptômetro ou quantum (*e.g.*, LAI-2200, LAI-2000 (PCA), TRAC e AccuPAR) para estimar o índice de área foliar através das frações de gaps no dossel das plantas. A medida acima e abaixo do dossel das plantas permite quantificar a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada ( $fPAR$ ) pelas plantas, com vistas ao uso na modelagem do crescimento das espécies (López-Lozano et al., 2009; Campos et al., 2017). Esses parâmetros biofísicos auxiliam no entendimento das características fenotípicas das culturas, tornando-se possível aplicações de tomadas de decisões mais precisas (Roosjen et al., 2018).

Logo, variáveis como índice de área foliar, taxa de crescimento da planta, eficiência biológica e habilidade competitiva das culturas dentro de um sistema consorciado é de extremamente importância. O entendimento desses parâmetros culturais pode ser realizado no acompanhamento da taxa de crescimento e produtividade, que subsidiam informações do seu desenvolvimento e rendimento

(Benjamin, 2016). Essas informações são de suma relevância, já que as adequadas produções e rendimentos das plantas forrageiras são os pilares do setor agropecuário (Hanna et al., 2018).

A qualidade e o desenvolvimento das plantas forrageiras podem ser alterados quimicamente e fenologicamente em decorrência das mudanças climáticas locais. Isso ocorre devido a influência da variação de temperaturas máximas e mínimas, incremento de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> atmosférico e deficit hídrico prolongado, tornando-se as mesmas com menores digestibilidade e palatabilidade para os animais, e variações no ciclo vegetativo e reprodutivo (Fangueiro et al., 2017; Ergon et al., 2018).

A análise biométrica de plantas é uma ferramenta simples e baixo custo, capaz de compreender e comparar o desvalimento (*e.g.*, morfológico, fisiológico e fenológico) das culturas em diferentes sistemas de cultivo. Fatores ambientais e biológicos podem exercer mudanças nas características das culturas, como expansão de parte dos seus órgãos e distribuição de fotoassimilados para as partes constituintes da planta (Di Benedetto & Tognetti, 2016; Impagliazzo et al., 2017).

Todavia, quando unificadas as variáveis biométricas das culturas e/ou juntamente com os rendimentos produtivos, as aplicações de índices biológicos (*e.g.*, índices de eficiência biológica e habilidade competitiva) em sistemas consorciados são utilizados para auxiliar no entendimento das complexas respostas das culturas, devido aos efeitos competitivos das mesmas, efeito esse de maior importância no desenvolvimento das espécies, benefícios econômicos e configurações de plantio ideais (Sadeghpour et al., 2013; Lin & Hülsbergen, 2017; Chimonyo et al., 2018). Por meio destes conhecimentos, torna-se possível determinar qual a melhor configuração do sistema de plantio palma-sorgo.

#### 4. Conclusão

Os achados discutidos nessa revisão reportam pesquisas que podem favorecer no planejamento agrícola de áreas em ambientes negligenciados sob condições semiáridas, como também a utilização de sistemas de cultivos de plantas forrageiras consorciadas com sorgo para incrementar na produção de alimentos.

No entanto, mais pesquisas baseadas em campo são necessárias para entender o papel dos sistemas consorciados de palma-sorgo para identificar as combinações ótimas de cultivo e seus benefícios no setor agropecuário.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo do primeiro autor.

## 5. Referências

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728.

AMORIM, D. M.; SILVA, T. G. F.; PEREIRA, P. C.; SOUZA, L. S. B.; MINUZZI, R. B. 2017. Phenophases and cutting time of forage cactus under irrigation and cropping systems. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 47, n. 1, p. 62-71.

ANDERSON, E. F. 2001. The cactus family. Timber Press, Portland. 776p.

ARAGONA, M.; LAURIANO, E. R.; PERGOLIZZI, S.; FAGGIO, C. 2017. *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller as a source of bioactivity compounds for health and nutrition. Natural Product Research, 31, n. 21, p. 1-13.

ARRUDA, E. C. P.; MELO-DE-PINNA, G. F. 2016. Areolar structure in some Opuntioideae: occurrence of mucilage cells in the leaf-glochid transition forms in *Opuntia microdasys* (Lhem.) Pfeiff. Adansonia, v. 38, n. 2, p. 267-274.

ATIS, I.; KOKTEN, K.; HATİPOĞLU, R.; YILMAZ, S.; ATAĞ, M.; CAN, E. 2012. Plant density and mixture ratio effects on the competition between common vetch and wheat. Australian Journal of Crop Science, v. 6, n. 3, p. 498-505.

BAKALI, A. H., ALEM, C.; ICHIR, L. L.; EL MZOURI, H. 2016. Cladode planting methods improves the initial growth and production of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). Advances in Agriculture & Botany, v. 8, n. 3, p. 111-128.

BARBA, F. J.; PUTNIK, P.; KOVAČEVIĆ, D. B.; POOJARY, M. M.; ROOHINEJAD, S.; LORENZO, J. M.; KOUBAA, M. 2017. Impact of conventional and non-

596 conventional processing on prickly pear (*Opuntia* spp.) and their derived products:  
 597 From preservation of beverages to valorization of by-products. Trends in Food Science  
 598 & Technology, v. 67, p. 260-270.

599 BEN-DOV, Y. 2006. A systematic catalogue of eight scale insect families (Hemiptera:  
 600 Coccoidea) of the world: Acleridae, Asterolecaniidae, Beesoniidae, Carayonemidae,  
 601 Conchaspidae, Dactylopiidae, Kerriidae and Lecanodiaspididae. Amsterdam, The  
 602 Netherlands, Elsevier Science and Technology. 368 p.

603 BENJAMIN, L. R. 2016. Growth Analysis, Crops. In: THOMAS, B.; MURPHY, D. J.;  
 604 MURRAY, B. G. Encyclopedia of Applied Plant Sciences. Org(s), Ed. 2. Elsevier,  
 605 Oxford, UK. p. 588-595.

606 BERTAZZINI, M.; SACCHI, G. A.; FORLANI, G. 2018. A differential tolerance to  
 607 mild salt stress conditions among six Italian rice genotypes does not rely on Na<sup>+</sup>  
 608 exclusion from shoots. Journal of Plant Physiology, v. 226, p. 145-153.

609 BEZERRA, A. P. A.; PITOMBEIRA, J. B.; TÁVORA, J. A. F.; VIDAL NETO, F. C.  
 610 2007. Rendimento, componentes da produção e uso eficiente da terra nos consórcios  
 611 sorgo x feijão-de-corda e sorgo x milho. Revista Ciência Agronômica, v. 38, n. 1, p.  
 612 104-108.

613 BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; SOUSA, V. V.; MARTINS, P.  
 614 O.; MATEUS, G. P.; COSTA, C. 2013. Sorghum grain yield, forage biomass production  
 615 and revenue as affected by intercropping time. European Journal of Agronomy, v. 51, p.  
 616 130-139.

617 BORLAND, A. M.; HARTWELL, J.; WESTON, D. J.; SCHLAUCH, K. A.;  
 618 TSCHAPLINSKI, T. J.; TUSKAN, G. A.; YANG, X.; CUSHMAN, J. C. 2014.  
 619 Engineering crassulacean acid metabolism to improve water-use efficiency. Trends in  
 620 Plant Science, v. 19, n. 5, p. 327-338.

621 CAMPI, P.; NAVARRO, A.; PALUMBO, A. D.; MODUGNO, F.; VITTI, C.;  
 622 MASTRORILLI, M. 2016. Energy of biomass sorghum irrigated with reclaimed  
 623 wastewaters. European Journal of Agronomy, v. 76, p. 176-185.

624 CAMPOS, I.; NEALE, C. M. U.; CALERA, A. 2017. Is row orientation a determinant  
625 factor for radiation interception in row vineyards?. Australian Journal of Grape and  
626 Wine Research, v. 23, n. 1, p. 77-86.

627 CÂNDIDO, M. J. D.; ARAUJO, G. G. L.; CAVALCANTE, M. A. B. 2005. Pastagens  
628 no ecossistema Semi-árido Brasileiro: atualização e perspectivas futuras. Anais... 42<sup>a</sup>  
629 Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia. Goiânia: SBZ, p. 85-94.

630 CARDADOR-MARTÍNEZ, A.; JIMÉNEZ-MARTÍNEZ, C.; SANDOVAL, G. 2011.  
631 Revalorization of cactus pear (*Opuntia* spp.) wastes as a source of antioxidants. Food  
632 Science and Technology, v. 31, n. 3, p. 782-788.

633 CASTRO, J. P. D.; ARAÚJO, E. R.; RÊGO, M. M.; RÊGO, E. R. 2011. *In vitro*  
634 germination and disinfestation of sweet cactus (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm Dyck).  
635 Acta Scientiarum. Agronomy, v. 33, n. 3, p. 509-512.

636 CAVALCANTE, L. A. D.; SANTOS, G. R.; SILVA, L. M.; FAGUNDES, J. L.; SILVA,  
637 M. A. 2014. Respostas de genótipos de palma forrageira a diferentes densidades de  
638 cultivo. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 44, n. 4, p. 424-433.

639 CHAHDOURA, H.; MORALES, P.; BARREIRA, J. C. M.; BARROS, L.;  
640 FERNÁNDEZ-RUIZ, V.; FERREIRA, I. C. F. R.; ACHOUR, L. 2015. Dietary fiber,  
641 mineral elements profile and macronutrients composition in different edible parts of  
642 *Opuntia microdasys* (Lehm.) Pfeiff and *Opuntia macrorhiza* (Engelm.). LWT-Food  
643 Science and Technology, v. 64, n. 1, p. 446-451.

644 CHAKWIZIRA, E.; TEIXEIRA, E.; MEENKEN, E.; MICHEL, A. J.; MALEY, S.  
645 2018. Radiation use efficiency and biomass partitioning to storage roots in fodder beet  
646 crops. European Journal of Agronomy, v. 92, p. 63-71.

647 CHIMONYO, V. G. P.; MODI, A. T.; MABHAUDHI, T. 2018. Sorghum radiation use  
648 efficiency and biomass partitioning in intercrop systems. South African Journal of  
649 Botany, v. 118, p. 76-84.

650 CONSOLI, S.; MILANI, M.; CIRELLI, G.; BARBAGALLO, S.; MARZO, A.;  
651 VANELLA, D.; TOSCANO, A. 2018. Energy and water balance of a treatment wetland  
652 under mediterranean climatic conditions. Ecological Engineering, v. 116, p. 52-60.

653 CORTAZAR, V. G.; ACEVEDO, E.; NOBEL, P. S. 1985. Modeling of PAR interception  
654 and productivity by *Opuntia ficus-indica*. Agricultural and Forest Meteorology, v. 34, n.  
655 2-3, p. 145-162.

656 COSTA, C. T. F.; FERREIRA, M. A.; CAMPOS, J. M. S.; GUIM, A.; SILVA, J. L.;  
657 SIQUEIRA, M. C. B.; BARROS, L. J. A.; SIQUEIRA, T. D. Q. 2016. Intake, total and  
658 partial digestibility of nutrients, and ruminal kinetics in crossbreed steers fed with  
659 multiple supplements containing spineless cactus enriched with urea. Livestock Science,  
660 v. 188, p. 55-60.

661 CRUZ FILHO, I. J.; BARROS, B. R. S.; AGUIAR, L. M. L.; NAVARRO, C. D. C.;  
662 RUAS, J. S.; LORENA, V. M. B.; ROCHA, G. J. M.; VERCESI, A. E.; MELO, C. M.  
663 L.; MAIOR, A. M. S. 2019. Lignins isolated from Prickly pear cladodes of the species  
664 *Opuntia ficus-indica* (Linnaeus) Miller and *Opuntia cochenillifera* (Linnaeus) Miller  
665 induces mice splenocytes activation, proliferation and cytokines production.  
666 International Journal of Biological Macromolecules, v. 123, p. 1331-1339.

667 CUNHA, A. P. M.; ALVALÁ, R. C.; NOBRE, C. A.; CARVALHO, M. A. 2015.  
668 Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. Agricultural  
669 and Forest Meteorology, v. 214, p. 494-505.

670 CUSHMAN, J. C.; DAVIS, S. C.; YANG, X.; BORLAND, A. M. 2015. Development  
671 and use of bioenergy feedstocks for semi-arid and arid lands. Journal of Experimental  
672 Botany, v. 66, n. 14, p. 4177-4193.

673 DALIAKOPOULOS, I. N.; TSANIS, I. K.; KOUTROULIS, A.; KOURGIALAS, N. N.;  
674 VAROUCHAKIS, A. E.; KARATZAS, G. P.; RITSEMA, C. J. 2016. The threat of soil  
675 salinity: A European scale review. Science of the Total Environment, v. 573, p. 727-739.

676 DAR, E. A.; BRAR, A. S.; MISHRA, S. K.; SINGH, K. B. 2017. Simulating response  
677 of wheat to timing and depth of irrigation water in drip irrigation system using CERES-  
678 Wheat model. Field Crops Research, v. 214, n. 4, p. 149-163.

679 DELGADO-FERNÁNDEZ, M.; GARCILLÁN, P. P.; EZCURRA, E. 2017. The giant  
680 columnar cactus *Pachycereus pringlei* adaptively modifies its stem shape from the dry  
681 tropics into the arid mid-latitude deserts. Journal of Arid Environments, v. 146, p. 10-17.

682 DÍAZ, F. J.; GRATTAN, S. R.; REYES, J. A.; LA ROZA-DELGADO, B.; BENES, S.  
683 E.; JIMÉNEZ, C.; DORTA, M.; TEJEDOR, M. 2018. Using saline soil and marginal  
684 quality water to produce alfalfa in arid climates. *Agricultural Water Management*, v.  
685 199, p. 11-21.

686 DI BENEDETTO, A.; TOGNETTI, J. 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de  
687 plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, v.  
688 42, n. 3, p. 258-282.

689 DINIZ, W. J. S.; SILVA, T. G. F.; FERREIRA, J. M. S.; SANTOS, D. C.; MOURA, M.  
690 S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; ZOLNIER, S. 2017. Forage cactus-sorghum intercropping at  
691 different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. *Pesquisa*  
692 *Agropecuária Brasileira*, v. 52, n. 9, p. 724-733.

693 DREZNER, T. D. 2017. Shape and size adjustments of a cactus with rib and furrow  
694 morphology. *Journal of Arid Environments*, v. 138, p. 1-8.

695 DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; ARAÚJO FILHO, J. T.; SANTOS, M. V. F.; LIRA, M. A.;  
696 SANTOS, D. C.; PESSOA, R. A. S. 2013. Potential of cactus pear in South America.  
697 *Cactusnet Newsletter*, v. 13, ed. esp., p. 29-40.

698 EAKIN, H. C.; LEMOS, M. C.; NELSON, D. R. 2014. Differentiating capacities as a  
699 means to sustainable climate change adaptation. *Global Environmental Change*, v. 27, n.  
700 10, p. 1-8.

701 EGAMBERDIEVA, D.; DAVRANOV, K.; WIRTH, S.; HASHEM, A.; ABD\_ALLAH,  
702 E. F. 2017. Impact of soil salinity on the plant-growth-promoting and biological control  
703 abilities of root associated bacteria. *Saudi Journal of Biological Sciences*, v. 24, n. 5, p.  
704 1-8.

705 ELIAS, O. F. A. S.; LEITE, M. L. M. V.; AZEVEDO, J. M.; SILVA, J. P. S. S.;  
706 NASCIMENTO, G. F.; SIMPLÍCIO, J. B. 2016. Características agronômicas de  
707 cultivares de sorgo em sistema de plantio direto no Semiárido de Pernambuco. *Revista*  
708 *Ciência Agrícola*, v. 14, n. 1, p. 29-36.

709 EL-WAHED, M. A.; BAKER, G. A.; ALI, M. M.; EL-FATTAH, F. A. A. 2017. Effect of  
 710 drip deficit irrigation and soil mulching on growth of common bean plant, water use  
 711 efficiency and soil salinity. *Scientia Horticulturae*, v. 225, p. 235-242.

712 ERGON, Å.; SEDDAIU, G.; KORHONEN, P.; VIRKAJÄRVI, P.; BELLOCCHI, G.;  
 713 JØRGENSEN, M.; ØSTREMF, L.; REHEULG, D.; VOLAIRE, F. 2018. How can  
 714 forage production in Nordic and Mediterranean Europe adapt to the challenges and  
 715 opportunities arising from climate change?. *European Journal of Agronomy*, v. 92, p.  
 716 97-106.

717 FALCÃO, H. M.; OLIVEIRA, M. T.; MERGULHÃO, A. C.; SILVA, M. V.; SANTOS,  
 718 M. G. 2013. Ecophysiological performance of three *Opuntia ficus-indica* cultivars  
 719 exposed to carmine cochineal under field conditions. *Scientia Horticulturae*, v. 150, p.  
 720 419-424.

721 FANGUEIRO, D.; PEREIRA, J. L.; MACEDO, S.; TRINDADE, H.; VASCONCELOS,  
 722 E.; COUTINHO, J. 2017. Surface application of acidified cattle slurry compared to  
 723 slurry injection: Impact on NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions and crop uptake.  
 724 *Geoderma*, v. 306, p. 160-166.

725 FARIAS, I.; LIRA, M. A.; SANTOS, D. C.; TAVARES FILHO, J. J.; SANTOS, M. V.  
 726 F.; FERNANDES, A. P. M.; SANTOS, V. F. 2000. Manejo de colheita e espaçamento da  
 727 palma forrageira, em consórcio com sorgo granífero no Agreste de Pernambuco.  
 728 *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 35, n. 2, p. 341-347.

729 FARIAS, I.; SANTOS, D. C.; DUBEUX JUNIOR, J. C. B. 2005. Estabelecimento e  
 730 manejo da palma forrageira. *A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual de*  
 731 *novas perspectivas de uso*. UFPE: Recife, p. 81-103.

732 FELKER, P.; RODRIGUEZ, S. D. C.; CASOLIBA, R. M.; FILIPPINI, R.; MEDINA,  
 733 D.; ZAPATA, R. 2005. Comparison of *Opuntia ficus indica* varieties of Mexican and  
 734 Argentine origin for fruit yield and quality in Argentina. *Journal of Arid Environments*,  
 735 v. 60, n. 3, p. 405-422.

736 FILGUEIRAS, T. S.; LONGHI-WAGNER, H. M.; VIANA, P. L.; ZANIN, A.;  
 737 GUGLIERI, A.; OLIVEIRA, R. C.; CANTO-DOROW, T. S.; SHIRASUNA, R. T.;  
 738 VALLS, J. F. M.; OLIVEIRA, R. P.; RODRIGUES, R. S.; SANTOS-GONÇALVES, A.

739 P.; WELKER, C. A. D. 2012. Poaceae in Lista de Espécies da Flora do Brasil. Jardim  
740 Botânico do Rio de Janeiro.

741 FLORES-HERNÁNDEZ, A.; ORONA-CASTILLO, I.; MURILLO-AMADOR, B.;  
742 GARCIA-HERNANDEZ, J. L.; TROYO-DIEGUEZ, E. 2004. Yield and physiological  
743 traits of prickly pear cactus ‘nopal’ (*Opuntia* spp.) cultivars under drip irrigation.  
744 *Agricultural Water Management*, v. 70, n. 2, p. 97-107.

745 GARCETE-GÓMEZ, J. M.; CONFORTO, C.; DOMÍNGUEZ-MONGE, S.; FLORES-  
746 SÁNCHEZ, J. L.; MORA-AGUILERA, G.; MICHEREFF, S. J. 2017. Sample size for  
747 assessment of cladode brown spot in prickly pear cactus. *European Journal of Plant*  
748 *Pathology*, v. 149, n. 3, p. 1-5.

749 GAROFALO, P.; RINALDI, M. 2013. Water-use efficiency of irrigated biomass  
750 sorghum in a Mediterranean environment. *Spanish Journal of Agricultural Research*, v.  
751 11, n. 4, p. 1153-1169.

752 GITELSON, A. A.; PENG, Y.; ARKEBAUER, T. J.; SUYKER, A. E. 2015.  
753 Productivity, absorbed photosynthetically active radiation, and light use efficiency in  
754 crops: Implications for remote sensing of crop primary production. *Journal of Plant*  
755 *Physiology*, v. 177, p. 100-109.

756 GLENN, E. P.; ANDAY, T.; CHATURVEDI, R.; MARTINEZ-GARCIA, R.;  
757 PEARLSTEIN, S.; SOLIZ, D.; NELSON, S. G.; FELGER, R. S. 2013. Three  
758 halophytes for saline-water agriculture: An oilseed, a forage and a grain crop.  
759 *Environmental and Experimental Botany*, v. 92, p. 110-121.

760 GOMES, S. O.; PITOMBEIRA, J. B.; NEIVA, J. N. M.; CÂNDIDO, M. J. D. 2006.  
761 Comportamento agronômico e composição químico-bromatológico de cultivares de  
762 sorgo forrageiro no Estado do Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, v. 37, n. 2, p. 221-  
763 227.

764 GOU, F.; VAN ITTERSUM, M. K.; SIMON, E.; LEFFELAAR, P. A.; VAN DER  
765 PUTTEN, P. E. L.; ZHANG, L.; VAN DER WERF, W. 2017. Intercropping wheat and  
766 maize increases total radiation interception and wheat RUE but lowers maize RUE.  
767 *European Journal of Agronomy*, v. 84, p. 125-139.

768 GU, J.; YIN, G.; HUANG, P.; GUO, J.; CHEN, L. 2017. An improved back propagation  
 769 neural network prediction model for subsurface drip irrigation system. Computers &  
 770 Electrical Engineering, v. 60, n. 1, p. 58-65.

771 GUSHA, J.; HALIMANI, T. E.; NGONGONI, N. T.; NCUBE, S. 2015. Effect of  
 772 feeding cactus-legume silages on nitrogen retention, digestibility and microbial protein  
 773 synthesis in goats. Animal Feed Science and Technology, v. 206, p. 1-7.

774 HAINAUT, P.; REMACLE, T.; DECAMPS, C.; LAMBERT, R.; SADOK, W. 2016.  
 775 Higher forage yields under temperate drought explained by lower transpiration rates  
 776 under increasing evaporative demand. European Journal of Agronomy, v. 72, p. 91-98.

777 HANNA, M.; JANNE, K.; PERTTU, V.; HELENA, K. 2018. Gaps in the capacity of  
 778 modern forage crops to adapt to the changing climate in northern Europe. Mitigation  
 779 and Adaptation Strategies for Global Change, v. 23, n. 1, p. 81-100.

780 HIMABINDU, Y.; CHAKRADHAR, T.; REDDY, M. C.; KANYGIN, A.; REDDING,  
 781 K. E.; CHANDRASEKHAR, T. 2016. Salt-tolerant genes from halophytes are potential  
 782 key players of salt tolerance in glycophytes. Environmental and Experimental Botany, v.  
 783 124, p. 39-63.

784 HOUBORG, R.; ANDERSON, M. C.; DAUGHTRY, C. S. T.; KUSTAS, W. P.;  
 785 RODELL, M. 2011. Using leaf chlorophyll to parameterize light-use-efficiency within a  
 786 thermal-based carbon, water and energy exchange model. Remote Sensing of  
 787 Environment, v. 115, n. 7, p. 1694-1705.

788 HUSSAIN, J.; KHALIQ, T.; AHMAD, A.; AKHTER, J.; ASSENG, S. 2018. Wheat  
 789 Responses to Climate Change and Its Adaptations: A Focus on Arid and Semi-arid  
 790 Environment. International Journal of Environmental Research, v. 12, n. 1, p. 117-126.

791 IMPAGLIAZZO, A.; MORI, M.; FIORENTINO, N.; DI MOLA, I.; OTTAIANO, L.;  
 792 GIANNI, D.; NOCERINO, S.; FAGNANO, M. 2017. Crop growth analysis and yield of  
 793 a lignocellulosic biomass crop (*Arundo donax* L.) in three marginal areas of Campania  
 794 region. Italian Journal of Agronomy, v. 12, n. 1, p. 1-7.

795 JAAFAR, H.; KHRAIZAT, Z.; BASHOUR, I.; HAIDAR, M. 2017. Determining water  
 796 requirements of biblical hyssop using an ET-based drip irrigation system. *Agricultural*  
 797 *Water Management*, v. 180, n. 1, p. 107-117.

798 JESUS, M. S. 2013. Avaliação agronômica, bromatológica e cromossômica em clones  
 799 de duas espécies de palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill. e *Nopalea*  
 800 *cochenillifera* Salm – Dyck). Dissertação (Mestrado em Recursos Genéticos Vegetais)  
 801 Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 103p.

802 JIA, Q.; SUN, L.; MOU, H.; ALI, S.; LIU, D.; ZHANG, Y.; ZHANG, P.; REN, X.; JIA,  
 803 Z. 2017. Effects of planting patterns and sowing densities on grain-filling, radiation use  
 804 efficiency and yield of maize (*Zea mays* L.) in semi-arid regions. *Agricultural Water*  
 805 *Management*, v. 201, n. 7, p. 287-298.

806 JU, J.; BAI, H.; ZHENG, Y.; ZHAO, T.; FANG, R.; JIANG, L. 2012. A multi-structural  
 807 and multi-functional integrated fog collection system in cactus. *Nature*  
 808 *Communications*, v. 3, p. 1-6.

809 KATERJI, N.; VAN HOORN, J. W.; HAMDY, A.; MASTRORILLI, M. 2003. Salinity  
 810 effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several  
 811 classification methods. *Agricultural Water Management*, v. 62, n. 1, p. 37-66.

812 KIM, K.; KIM, H.; PARK, S. H.; LEE, S. J. 2017. Hydraulic strategy of cactus trichome  
 813 for absorption and storage of water under arid environment. *Frontiers in Plant Science*,  
 814 v. 8, p. 1-8.

815 KIM, H.; KIM, J.; LEE, S. J. 2018. Fast and Efficient Water Absorption Material  
 816 Inspired by Cactus Root. *ACS Macro Letters*, v. 7, n. 3, p. 387-394.

817 KUMARI, N. N.; REDDY, Y. R.; BLUMMEL, M.; NAGALAKSHMI, D.; MONIKA,  
 818 T.; REDDY, B. V. S.; KUMAR, A. A. 2014. Effect of feeding differently processed  
 819 sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) bagasse based complete diet on nutrient  
 820 utilization and microbial N supply in growing ram lambs. *Small Ruminant Research*, v.  
 821 117, n. 1, p. 52-57.

- 822 LI, X.; ZUO, Q.; CHANG, H.; BAI, G.; KUAI, J.; ZHOU, G. 2018. Higher density  
823 planting benefits mechanical harvesting of rapeseed in the Yangtze River Basin of  
824 China. *Field Crops Research*, v. 218, n. 4, p. 97-105.
- 825 LIN, H. C.; HÜLSBERGEN, K. J. 2017. A new method for analyzing agricultural land-  
826 use efficiency, and its application in organic and conventional farming systems in  
827 southern Germany. *European Journal of Agronomy*, v. 83, p. 15-27.
- 828 LIGUORI, G.; INGLESE, G.; PERNICE, F.; SORTINO, G.; INGLESE, P. 2013. CO<sub>2</sub>  
829 uptake of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. whole trees and single cladodes, in relation to  
830 plant water status and cladode age. *Italian Journal of Agronomy*, v. 8, n. 1, p. 14-20.
- 831 LIGUORI, G.; INGLESE, P. 2015. Cactus pear (*O. ficus-indica* (L.) Mill.) fruit  
832 production: Ecophysiology, orchard and fresh-cut fruit management. *Acta Horticulturae*,  
833 v. 1067, p. 247-252.
- 834 LIU, H.; HU, X. Y.; LIU, Y. X.; LIU, Q. 2015. Caryopsis micromorphological survey of  
835 *Sorghum* (Poaceae) – Taxonomic implications. *South African Journal of Botany*, v. 99,  
836 p. 1-11.
- 837 LOPES, E. B.; BRITO, C. D.; ALBUQUERQUE, I. D.; BATISTA, J. D. L. 2009.  
838 Desempenho do óleo de laranja no controle da cochonilha-do-carmim em palma  
839 gigante. *Engenharia Ambiental*, v. 6, n. 1, p. 252-258.
- 840 LOPES, L. A.; CARVALHO, F. F. R.; CABRAL, A. M. D.; BATISTA, Â. M. V.;  
841 CAMARGO, K. S.; SILVA, J. R. C.; FERREIRA, J. C. S.; PEREIRA NETO, J. D.;  
842 SILVA, J. L. 2017. Replacement of tifton hay with alfalfa hay in diets containing  
843 spineless cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm-Dyck) for dairy goats. *Small Ruminant*  
844 *Research*, v. 155, p. 1-19.
- 845 LÓPEZ, R.; ITA, A.; VACA, M. 2009. Drying of prickly pear cactus cladodes (*Opuntia*  
846 *ficus indica*) in a forced convection tunnel. *Energy Conversion and Management*, v. 50,  
847 n. 9, p. 2119-2126.
- 848 LÓPEZ-LOZANO, R.; BARET, F.; CORTÁZAR-ATAURI, I. G.; BERTRAND, N.;  
849 CASTERAD, M. A. 2009. Optimal geometric configuration and algorithms for LAI

indirect estimates under row canopies: The case of vineyards. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 149, n. 8, p. 1307-1316.

MAKARANA, G.; YADAV, R. K.; KUMAR, R.; KUMAR, A.; SHEORAN, P.; YADAV, G.; SONI, P. G.; YADAV, T.; YADAV, M. R.; KUSHWAHA, M.; GAUTAM, P. B. 2017. Growth, Yield and Grain Quality of Pearl Millet (*Pennisetum glaucum* L.) Genotypes as Influenced by Salinity of Irrigation Water in North Western Regions of India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, v. 6, n. 6, p. 2858-2874.

MÄKINEN, H.; KASEVA, J.; VIRKAJÄRVI, P.; KAHILUOTO, H. 2015. Managing resilience of forage crops to climate change through response diversity. *Field Crops Research*, v. 183, p. 23-30.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. 2016. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. *Climanálise*, v. 3, n. 1, p. 1-6.

MARQUES, O. F. C.; GOMES, L. S. P.; MOURTHÉ, M. H. F.; BRAZ, T. G. S.; PIRES NETO, O. S. 2017. Palma forrageira: cultivo e utilização na alimentação de bovinos. *Caderno de Ciências Agrárias*, v. 9, n. 1, p. 75-93.

MARRA, F.; MORIN, E. 2017. Autocorrelation structure of convective rainfall in semiarid-arid climate derived from high-resolution X-Band radar estimates. *Atmospheric Research*, v. 194, p. 1-51.

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; ALVALÁ, R. C. S.; GIAROLLA, A.; GAROFOLO, L. L.; SIQUEIRA JÚNIOR, J. L.; PAOLICCHI, L. T. L. C.; PINTO, G. L. N. 2018. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. *Agricultural Systems*, v. 160, p. 21-30.

MASTERS, D. G.; BENES, S. E.; NORMAN, H. C. 2007. Biosaline agriculture for forage and livestock production. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 119, n. 3, p. 234-248.

MARTIN-GUAY, M. O.; PAQUETTE, A.; DUPRAS, J.; RIVEST, D. 2018. The new Green Revolution: Sustainable intensification of agriculture by intercropping. *Science of the Total Environment*, v. 615, p. 767-772.

879 MBARKI, S.; CERDÀ, A.; ZIVCAK, M.; BRESTIC, M.; RABHI, M.; MEZNI, M.;  
880 JEDIDI, N.; ABDELLY, C.; PASCUAL, J. A. 2017. Alfalfa crops amended with MSW  
881 compost can compensate the effect of salty water irrigation depending on the soil  
882 texture. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 111, n. 9, p. 1-30.

883 MEENA, M. D.; JOSHI, P. K.; JAT, H. S.; CHINCHMALATPURE, A. R.; NARJARY,  
884 B.; SHEORAN, P.; SHARMA, D. K. 2016. Changes in biological and chemical  
885 properties of saline soil amended with municipal solid waste compost and chemical  
886 fertilizers in a mustard–pearl millet cropping system. *Catena*, v. 140, p. 1-8.

887 MEHMOOD, M. A.; IBRAHIM, M.; RASHID, U.; NAWAZ, M.; ALI, S.; HUSSAIN,  
888 A.; GULL, M. 2017. Biomass production for bioenergy using marginal lands.  
889 *Sustainable Production and Consumption*, v. 9, p. 3-21.

890 MELGAR, B.; PEREIRA, E.; OLIVEIRA, M. B. P. P.; GARCIA-CASTELLO, E. M.;  
891 RODRIGUEZ-LOPEZ, A. D.; SOKOVIC, M.; BARROS, L.; FERREIRA, I. C. F. R.  
892 2017. Extensive profiling of three varieties of *Opuntia* spp. fruit for innovative food  
893 ingredients. *Food Research International*, v. 101, p. 259-265.

894 Ministério da Integração Nacional. Nova delimitação do Semiárido  
895 Brasileiro. Brasília, 2017. Disponível em: <[http://www.integracao.gov.br/semiarido-](http://www.integracao.gov.br/semiarido-brasileiro)  
896 [brasileiro](http://www.integracao.gov.br/semiarido-brasileiro)>. Acessado em: 14/10/2017.

897 MORAIS, J. E. F.; SILVA, T. G. F.; QUEIROZ, M. G.; ARAUJO, G. G. L.; MOURA,  
898 M. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N. 2017. Hydrodynamic changes of the soil-cactus  
899 interface, effective actual evapotranspiration and its water efficiency under irrigation.  
900 *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, n. 4, p. 273-278.

901 MORA, J. L.; HERRERO, J.; WEINDORF, D. C. 2017. Multivariate analysis of soil  
902 salination-desalination in a semi-arid irrigated district of Spain. *Geoderma*, v. 291, p. 1-  
903 10.

904 MOSTAFA, H.; EL-NADY, R.; AWAD, M.; EL-ANSARY, M. 2017. Drip irrigation  
905 management for wheat under clay soil in arid conditions. *Ecological Engineering*, v.  
906 106, n. 6, p. 1-9.

907 NEGRÃO, S.; SCHMÖCKEL, S. M.; TESTER, M. 2017. Evaluating physiological  
 908 responses of plants to salinity stress. *Annals of Botany*, v. 119, n. 1, p. 1-11.

909 NIKALJE, G. C.; SRIVASTAVA, A. K.; PANDEY, G. K.; SUPRASANNA, P. 2017.  
 910 Halophytes in biosaline agriculture: Mechanism, utilization, and value addition. *Land*  
 911 *Degradation & Development*, v. 29, n. 4, p. 1-15.

912 NOBEL, P. S. 2001. *Biologia ambiental*. In: BARBERA, G; INGLESE, P.; PIMIENTA  
 913 BARROS, E. *Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira*. João Pessoa: FAO,  
 914 SEBRAE/PB. p. 36-48.

915 NOBEL, P. 1982. Interaction between morphology, PAR interception, and nocturnal  
 916 acid accumulation in cacti. I.P. Ting, M. Gibbs (Eds.), *Crassulacean Acid Metabolism*,  
 917 American Society of Plant Physiologists, Rockville, MD, pp. 260-277.

918 NUNES, A. T.; CABRAL, D. L. V.; AMORIM, E. L. C.; SANTOS, M. V. F.;  
 919 ALBUQUERQUE, U. P. 2016. Plants used to feed ruminants in semi-arid Brazil: A  
 920 study of nutritional composition guided by local ecological knowledge. *Journal of Arid*  
 921 *Environments*, v. 135, p. 96-103.

922 NUNES, C. S. 2011. Usos e aplicações da palma forrageira como uma grande fonte de  
 923 economia para o semiárido nordestino. *Revista Verde de Agroecologia e*  
 924 *Desenvolvimento Sustentável*, v. 6, p. 58-66.

925 NXELE, X.; KLEIN, A.; NDIMBA, B. K. 2017. Drought and salinity stress alters ROS  
 926 accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants. *South African*  
 927 *Journal of Botany*, v. 108, p. 261-266.

928 PAREDES-TREJO, F. J.; BARBOSA, H. A.; KUMAR, T. V. L. 2017. Validating  
 929 CHIRPS based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. *Journal of Arid*  
 930 *Environments*, v. 139, n. 4, p. 26-40.

931 PEARCY, R. W.; VALLADARES, F.; WRIGHT, S. J.; PAULIS, E. L. 2004. A  
 932 functional analysis of the crown architecture of tropical forest *Psychotria* species: do  
 933 species vary in light capture efficiency and consequently in carbon gain and growth?.  
 934 *Oecologia*, v. 139, n. 2, p. 163-177.

935 PEREIRA JÚNIOR, J. S. 2007. Nova delimitação do semi-árido brasileiro. Biblioteca  
 936 Digital da Câmara dos Deputados. Centro de Documentação e Informação. Brasília, DF.  
 937 24 p.

938 PEREIRA, P. C.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; MORAIS, J. E. F.; SANTOS, D. C.  
 939 2015. Morfogênese da palma forrageira irrigada por gotejamento. Revista Caatinga, v.  
 940 28, n. 3, p. 184-195.

941 PESSOA, A. S. 1967. Cultura da palma forrageira. Recife: SUDENE. Divisão de  
 942 Documentação. 98 p. (SUDENE. Agricultura, 5).

943 PINO, F.; HEINRICHS, A. J. 2017. Sorghum forage in precision-fed dairy heifer diets.  
 944 Journal of Dairy Science, v. 100, n. 1, p. 224-235.

945 PONCE-BAUTISTA, A.; VALVERDE, P. L.; FLORES, J.; ZAVALA-HURTADO, A.;  
 946 VITE, F.; LÓPEZ-ORTEGA, G.; PÉREZ-HERNÁNDEZ, M. A. 2017.  
 947 Photosynthetically active radiation and carbon gain drives the southern orientation of  
 948 *Myrtillocactus geometrizans* fruits. Plant Biology, v. 19, n. 2, p. 279-285.

949 PURCELL, L. C.; BALL, R. A.; REAPER, J. D.; VORIES, E. D. 2002. Radiation use  
 950 efficiency and biomass production in soybean at different plant population densities.  
 951 Crop Science, v. 42, n. 1, p. 172-177.

952 QADIR, M.; QUILLÉROU, E.; NANGIA, V.; MURTAZA, G.; SINGH, M.; THOMAS,  
 953 R. J.; DRECHSEL, P.; NOBLE, A. D. 2014. Economics of salt-induced land  
 954 degradation and restoration. Natural Resources Forum, v. 38, p. 282-295.

955 QUEIROZ, M. G.; SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; SILVA, S. M. S.; LIMA, L. R.;  
 956 ALVES, J. O. 2015. Características morfofisiológicas e produtividade da palma  
 957 forrageira em diferentes lâminas de irrigação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola  
 958 e Ambiental, v. 19, n. 10, p. 931-938.

959 REN, Y.; LIU, J.; WANG, Z.; ZHANG, S. 2016. Planting density and sowing  
 960 proportions of maize-soybean intercrops affected competitive interactions and water-  
 961 use efficiencies on the Loess Plateau, China. European Journal of Agronomy, v. 72, p.  
 962 70-79.

963 ROBY, M. C.; FERNANDEZ, M. G. S.; HEATON, E. A.; MIGUEZ, F. E.;  
 964 VANLOOCKE, A. 2017. Biomass sorghum and maize have similar water-use-efficiency  
 965 under non-drought conditions in the rain-fed Midwest US. *Agricultural and Forest*  
 966 *Meteorology*, v. 247, p. 434-444.

967 ROCHA, R.; SOARES, R. R. 2015. Water scarcity and birth outcomes in the Brazilian  
 968 semiarid. *Journal of Development Economics*, v. 112, p. 72-91.

969 ROOSJEN, P. P. J.; BREDE, B.; SUOMALAINEN, J. M.; BARTHOLOMEUS, H. M.;  
 970 KOOISTRA, L.; CLEVERS, J. G. P. W. 2018. Improved estimation of leaf area index  
 971 and leaf chlorophyll content of a potato crop using multi-angle spectral data–potential of  
 972 unmanned aerial vehicle imagery. *International Journal of Applied Earth Observation*  
 973 *and Geoinformation*, v. 66, p. 14-26.

974 ROUHOU, M. C.; ABDELMOUMEN, S.; THOMAS, S.; ATTIA, H.; GHORBEL, D.  
 975 2018. Use of green chemistry methods in the extraction of dietary fibers from cactus  
 976 rackets (*Opuntia ficus indica*): Structural and microstructural studies. *International*  
 977 *Journal of Biological Macromolecules*, v. 116, p. 901-910.

978 SADEGHPOUR, A.; JAHANZAD, E.; ESMAEILI, A.; HOSSEINI, M. B.; HASHEMI,  
 979 M. 2013. Forage yield, quality and economic benefit of intercropped barley and annual  
 980 medic in semi-arid conditions: Additive series. *Field Crops Research*, v. 148, p. 43-48.

981 SAMARAPPULI, D.; BERTI, M. T. 2018. Intercropping forage sorghum with maize is  
 982 a promising alternative to maize silage for biogas production. *Journal of Cleaner*  
 983 *Production*, v. 194, p. 515-524.

984 SANTOS, D. C.; FARIAS, I.; LIRA, M. A.; SANTOS, M. V. F.; ARRUDA, G. P.;  
 985 COELHO, R. S. B.; DIAS, F. M.; MELO, J. N. 2006. Manejo e utilização da palma  
 986 forrageira (*Opuntia e Nopalea*) em Pernambuco. Recife: IPA. 48 p. (IPA. Documento,  
 987 30).

988 SANTOS, K. C.; MAGALHÃES, A. L. R.; SILVA, D. K. A.; ARAÚJO, G. G. L.;  
 989 FAGUNDES, G. M.; YBARRA, N. G.; ABDALLA, A. L. 2017. Nutritional potential of  
 990 forage species found in Brazilian Semiarid region. *Livestock Science*, v. 195, p. 118-  
 991 124.

- 992 SANTOS, S. M.; FARIAS, M. M. M. W. E. C. 2017. Potential for rainwater harvesting  
993 in a dry climate: Assessments in a semiarid region in northeast Brazil. Journal of  
994 Cleaner Production, v. 164, p. 1007-1015.
- 995 SILVA, C. C. F.; SANTOS, L. C. 2006. Palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill.)  
996 como alternativa na alimentação de ruminantes. Revista Eletrônica de Veterinária, v. 7,  
997 n. 10, p. 1-13.
- 998 SILVA, E. F.; REIS, L. M. M. 2017. Situação ambiental de uma comunidade rural no  
999 Semiárido Potiguar. Revista GeoInterações, v. 1, n. 1, p. 69-85.
- 1000 SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SANTOS, J. Y. G. 2017. Evaluation and modeling  
1001 of runoff and sediment yield for different land covers under simulated rain in a semiarid  
1002 region of Brazil. International Journal of Sediment Research, v. 32, p. 1-9.
- 1003 SILVA, T. G. F.; ARAÚJO PRIMO, J. T.; SILVA, S. M. S.; MOURA, M. S. B.;  
1004 SANTOS, D. C.; SILVA, M. C.; ARAÚJO, J. E. M. 2014a. Indicadores de eficiência do  
1005 uso da água e de nutrientes de clones de palma forrageira em condições de sequeiro no  
1006 Semiárido brasileiro. Bragantia, v. 73, p. 184-191.
- 1007 SILVA, T. G. F.; MIRANDA, K. R.; SANTOS, D. C.; QUEIROZ, M. G.; SILVA, M. C.;  
1008 CRUZ NETO, J. F.; ARAÚJO, J. E. M. 2014b. Área do cladódio de clones de palma  
1009 forrageira: modelagem, análise e aplicabilidade. Revista Brasileira de Ciências Agrárias,  
1010 v. 9, n. 4, p. 633-641.
- 1011 SILVA, T. G. F.; ARAÚJO, G. G. L.; MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B. 2017.  
1012 Agrometeorological research on forage cactus and its advances in Brazil. Amazonian  
1013 Journal of Plant Research, v. 1, n. 2, p. 45-68.
- 1014 SIQUEIRA, M. C. B.; FERREIRA, M. A.; MONNERAT, J. P. I. S.; SILVA, J. L.;  
1015 COSTA, C. T. F.; CONCEIÇÃO, M. G.; ANDRADE, R. P. X.; BARROS, L. J. A.;  
1016 MELO, T. T. B. 2017. Optimizing the use of spineless cactus in the diets of cattle: Total  
1017 and partial digestibility, fiber dynamics and ruminal parameters. Animal Feed Science  
1018 and Technology, v. 226, p. 56-64.

- 1019 SOUZA FILHO, P. F.; RIBEIRO, V. T.; SANTOS, E. S.; MACEDO, G. R. 2016.  
1020 Simultaneous saccharification and fermentation of cactus pear biomass-evaluation of  
1021 using different pretreatments. *Industrial Crops and Products*, v. 89, p. 425-433.
- 1022 SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. 2011.  
1023 Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupi sob sistemas de  
1024 plantio exclusivo e consorciado no Semiárido brasileiro. *Bragantia*, v. 70, n. 3, p. 715-  
1025 721.
- 1026 TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. 2017. *Plant Physiology &*  
1027 *Development*. 6<sup>th</sup> Edition. Oxford University Press. 761p.
- 1028 TANG, C.; SUN, C.; DU, F.; CHEN, F.; AMEEN, A.; FU, T.; XIE, G. H. 2018. Effect of  
1029 Plant Density on Sweet and Biomass Sorghum Production on Semiarid Marginal Land.  
1030 *Sugar Tech*, v. 20, n. 3, p. 312-322.
- 1031 TEIXEIRA, E. I.; RUITER, J.; AUSSEIL, A. N.; DAIGNEAULT, A.; JOHNSTONE, P.;  
1032 HOLMES, A.; TAIT, A.; EWERT, F. 2018. Adapting crop rotations to climate change in  
1033 regional impact modelling assessments. *Science of the Total Environment*, v. 616, p.  
1034 785-795.
- 1035 THORNTHWAITE, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of  
1036 climate. *Geographical Review*, v. 38, n. 1, p. 55-94.
- 1037 UPADHYAYA, H. D.; REDDY, K. N.; VETRIVENTHAN, M.; AHMED, M. I.;  
1038 KRISHNA, G. M.; REDDY, M. T.; SINGH, S. K. 2017. Sorghum germplasm from West  
1039 and Central Africa maintained in the ICRISAT genebank: Status, gaps, and diversity.  
1040 *The Crop Journal*, v. 5, n. 6, p. 518-532.
- 1041 VAEZI, A. R.; AHMADI, M.; CERDÀ, A. 2017. Contribution of raindrop impact to the  
1042 change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls. *Science*  
1043 *of the Total Environment*, v. 583, p. 382-392.
- 1044 VASCONCELOS, A. G. V.; LIRA, M. A.; CAVALCANTI, V. L. B.; SANTOS, M. V. F.;  
1045 WILLADINO, L. 2009. Seleção de clones de palma forrageira resistentes à cochonilha-  
1046 do-carmim (*Dactylopius* sp). *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 38, n. 5, p. 827-831.

- 1047 VIEGAS NETO, A. L.; HEINZ, R.; GONÇALVES, M. C.; CORREIA, A. M. P.;  
1048 MOTA, L. H. S.; ARAÚJO, W. D. 2012. Milho pipoca consorciado com feijão em  
1049 diferentes arranjos de plantas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 42, n. 1, p. 28-33.
- 1050 VON PINHO, R. G.; VASCONCELOS, R. D.; BORGES, I. D.; RESENDE, A. D. 2007.  
1051 Produtividade e qualidade da silagem de milho e sorgo em função da época de  
1052 semeadura. *Bragantia*, v. 66, n. 2, p. 235-245.
- 1053 WAKCHAURE, G. C.; MINHAS, P. S.; RATNAKUMAR, P.; CHOUDHARY, R. L.  
1054 2016. Effect of plant bioregulators on growth, yield and water production functions of  
1055 sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Agricultural Water Management*, v. 177, p.  
1056 138-145.
- 1057 WANG, Q.; HUO, Z.; ZHANG, L.; WANG, J.; ZHAO, Y. 2016. Impact of saline water  
1058 irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid  
1059 regions of China. *Agricultural Water Management*, v. 163, p. 125-138.
- 1060 WANG, Z.; ZHAO, X.; WU, P.; GAO, Y.; YANG, Q.; SHEN, Y. 2017. Border row  
1061 effects on light interception in wheat/maize strip intercropping systems. *Field Crops*  
1062 *Research*, v. 214, p. 1-13.
- 1063 WATSON, L.; DALLWITZ, M. J. 1992. The grass genera of the world. CAB  
1064 International, Wallingford. 1038 p.
- 1065 WET, J. M. J. 1978. Systematics and evolution of *Sorghum* sect. *Sorghum* (Gramineae).  
1066 *American Journal of Botany*, v. 65, n. 4, p. 477-484.
- 1067 WET, J. M. J.; HUCKABAY, J. P. 1967. The origin of *Sorghum bicolor*. II Distribution  
1068 and domestication. *Evolution*, v. 21, p. 787-802.
- 1069 WU, H. 2018. Plant salt tolerance and Na<sup>+</sup> sensing and transport. *The Crop Journal*, v. 6,  
1070 n. 3, p. 215-225.
- 1071 XU, L.; BALDOCCHI, D. D. 2003. Seasonal trends in photosynthetic parameters and  
1072 stomatal conductance of blue oak (*Quercus douglasii*) under prolonged summer drought  
1073 and high temperature. *Tree Physiology*, v. 23, n. 13, p. 865-877.

1074 YANG, L.; LU, M.; CARL, S.; MAYER, J. A.; CUSHMAN, J. C.; TIAN, E.; LIN, H.  
 1075 2015. Biomass characterization of *Agave* and *Opuntia* as potential biofuel feedstocks.  
 1076 Biomass and Bioenergy, v. 76, n. 1, p. 43-53.

1077 YILMAZ, Ş.; ÖZEL, A.; ATAĞ, M.; ERAYMAN, M. 2015. Effects of seeding rates on  
 1078 competition indices of barley and vetch intercropping systems in the Eastern  
 1079 Mediterranean. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, v. 39, n. 1, p. 135-143.

1080 YIMAM, Y. T.; OCHSNER, T. E.; KAKANI, V. G. 2015. Evapotranspiration  
 1081 partitioning and water use efficiency of switchgrass and biomass sorghum managed for  
 1082 biofuel. Agricultural Water Management, v. 155, p. 40-47.

1083 YONG, T.; CHEN, P.; DONG, Q.; DU, Q.; YANG, F.; WANG, X.; LIU, W.; YANG, W.  
 1084 2018. Optimized nitrogen application methods to improve nitrogen use efficiency and  
 1085 nodule nitrogen fixation in a maize-soybean relay intercropping system. Journal of  
 1086 Integrative Agriculture, v. 17, n. 3, p. 664-676.

1087 ZHANG, L.; WANG, C.; LI, X.; CAO, K.; SONG, Y.; HU, B.; LU, D.; WANG, Q.; DU,  
 1088 X.; CAO, S. 2016. A new paleoclimate classification for Deep time. Palaeogeography,  
 1089 Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 443, p. 98-106.

1090

## **CAPÍTULO 2 - A complementaridade interespecífica do consórcio palma-sorgo contribui na eficiência biológica e habilidade competitiva sob sistemas de agricultura bioassalada**

### **Resumo**

Como alternativa de atenuação do elevado déficit hídrico dos ambientes áridos e semiáridos e, visando melhor uso dos recursos naturais, a utilização de culturas adaptadas como a palma forrageira e o sorgo em sistemas consorciados, torna-se uma alternativa de cultivos mais resilientes e promissores. Assim, objetivou-se avaliar o desempenho do consórcio palma-sorgo sob caráter quantitativo e qualitativo, e quantificar a eficiência biológica e habilidade competitiva de clones de palma forrageira e cultivares de sorgo para recomendação do consórcio sustentável em ambiente semiárido sob irrigação com água salina. O experimento foi conduzido em Serra Talhada, Pernambuco, Brasil, em delineamento em blocos casualizados com quatro repetições e 15 tratamentos. Os tratamentos foram compostos por sistemas de cultivo com três clones de palma forrageira (IPA Sertânia [IPA], Miúda [Miu] e Orelha de Elefante Mexicana [OEM]) e, três cultivares de sorgo (467, SF11 e 2502), sob configuração exclusiva, e as máximas combinações entre si para compor os consórcios. A colheita foi realizada para quantificar os rendimentos dos sistemas para calcular os índices de eficiência biológica e habilidade competitiva das culturas sob os diferentes cultivos. Os sistemas consorciados palma-sorgo foram 2,11 vezes superiores aos seus sistemas exclusivos em rendimento de massa seca e, não alterarão a qualidade de forragem da palma. Em todas as configurações de consórcio, os valores dos usos eficientes da terra total foram  $> 1,0$ . O consórcio OEM-467 apresentou maior índice de produtividade ( $17,57 \text{ Mg MS ha}^{-1}$ ). Os maiores coeficientes de adensamento relativo foram da configuração Miu-SF11 (20,39) e IPA-467 (19,61). Os clones de palma forrageira foram expressivos e dominantes sobre as cultivares de sorgo. A consorciação média geral apresentou ganho de rendimento expressivo nos sistemas ( $454,08 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). O maior índice de vantagem monetária foi do sistema IPA-SF11 ( $26.518,44 \text{ R\$ ha}^{-1}$ ). A utilização de consórcio palma-sorgo proporciona vantagem no sistema, satisfatórias eficiências biológicas e retorno econômico. Apesar das competições interespecíficas houve complementaridade das culturas quando consorciadas e manutenção de qualidade

de forragem das mesmas, sendo os sistemas OEM-467 e Miu-467 com melhores performances para ambientes hostis.

Palavras-chave: índices de competitividade; *Opuntia*; *Nopalea*; *Sorghum*

**The interspecific complementarity of the forage cactus-sorghum consortium  
contributes to the biological efficiency and competitive ability under bioassaline  
farming systems**

Abstract

As an alternative to attenuate the high water deficit of arid and semi-arid environments, and to better use natural resources, the use of adapted crops such as forage cactus and sorghum in intercropping systems becomes an alternative to more resilient and promising crops. The objective of this study was to evaluate the performance of the forage cactus-sorghum consortium under a quantitative and qualitative character and to quantify the biological efficiency and competitive ability of forage cactus clones and sorghum cultivars for the recommendation of a sustainable consortium in a semi-arid environment under irrigation with saline water. The experiment was conducted in Serra Talhada, Pernambuco, Brazil, in a randomized complete block design with four replicates and 15 treatments. The treatments were composed by cultivation systems with three clones of forage cactus ('IPA Sertânia' [IPA], 'Miúda' [Miu] and 'Orelha de Elefante Mexicana' [OEM]) and three cultivars of sorghum (467, SF11 and 2502) exclusive, and the maximum combinations between them to compose the consortia. Biometric analyses of clones were performed to quantify growth parameters over time and, at the time of harvesting, the yields of the systems to calculate the indices of biological efficiency and competitive ability of the crops under different crops. The forage cactus-sorghum intercropping systems were 2.11 times higher than their exclusive dry mass yield systems and would not change the forage quality of the cactus. In all consortium configurations, the values of the efficient uses of the total land were > 1.0. The OEM-467 consortium had the highest productivity index (17.57 Mg MS ha<sup>-1</sup>). The highest relative densities were Miu-SF11 (20.39) and IPA-467 (19.61). The clones of forage cactus were expressive and dominant on sorghum cultivars. The general average consortium presented significant yield gain in the systems (454.08 Mg ha<sup>-1</sup>).

The highest index of monetary advantage was the IPA-SF11 system (26,518.44 R\$ ha<sup>-1</sup>). The use of forage cactus-sorghum consortium provides system advantage, satisfactory biological efficiencies, and economic return. In spite of the interspecific competitions, there was complementarity of the cultures when intercropping and maintenance of fodder quality of the same, being the systems OEM-467 and Miu-467 with better performances for hostile environments.

Keywords: competitiveness indices; *Opuntia*; *Nopalea*; *Sorghum*

## 1. Introdução

O deficit hídrico ocasionado pelo decréscimo dos eventos de precipitação pluvial influencia diretamente no crescimento, desenvolvimento e no declínio da produção de fitomassa das culturas, bem como na capacidade produtiva dos ecossistemas (Jha and Srivastava, 2018). Em decorrência dos impactos causados pela variabilidade climática aos vegetais, a utilização de técnicas como a consorciação entre culturas auxilia no planejamento agrícola e, torna-se uma alternativa relevante para a melhoria do aproveitamento dos recursos naturais (Brooker et al., 2015; Liu et al., 2018; Vrignon-Brenas et al., 2018).

Espécies adaptadas as condições deficitárias, como o sorgo (*Sorghum* spp.) e a palma forrageira (*Nopalea* spp. e *Opuntia* spp.) em sistemas consorciados podem contribuir para a melhoria de rendimentos em biomassa das áreas agrícolas, melhorando a eficiência no uso da terra, nutrientes, água e radiação (Chimonyo et al., 2018; Diniz et al., 2017; Lima et al., 2018a), e o sinergismo da produção.

Os benefícios provenientes do consórcio entre culturas de importância agrícola, em comparação aos sistemas exclusivos, podem ser obtidos em decorrência do melhor aproveitamento dos recursos em escala temporal e espacial, uma vez que o nicho ecológico existente no ambiente ocasiona diminuição da competição interespecífica e promove complementariedade entre os mesmos (Chimonyo et al., 2018; Franco et al., 2018).

O sorgo e a palma, embora sejam espécies forrageiras, apresentam metabolismos fotossintéticos distintos. A primeira do tipo C4, com assimilação de carbono diurno, possui elevado potencial de produção de biomassa, alto retorno econômico, produção de açúcares e biocombustíveis, tolerância ao deficit hídrico, eficiência no uso da água

quando comparado com outras culturas do mesmo metabolismo e, adaptabilidade a ambientes áridos e semiáridos (Habyarimana et al., 2016; Roby et al., 2017). Já a segunda do tipo CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*), com fechamento estomático no período diurno e assimilação noturna de carbono, proporciona uma maior capacidade adaptativa a fatores abióticos; possui características relevantes como o sorgo, e respostas positivas sob o uso da irrigação (Santos et al., 2016; Souza Filho et al., 2016; Diniz et al., 2017).

Em ambientes áridos e semiáridos, o uso de irrigação permite maiores produções das culturas, não ocorrendo assim a estacionalidade dos ciclos em períodos de estresse ou em declínio de produção. A adoção de sistema de irrigação localizado favorece no melhor aproveitamento de água pelas culturas e menores perturbações ao solo (Mostafa et al., 2018). A utilização de água de baixa qualidade e elevado aporte de sais na agricultura é bastante comum, devido às limitações de recursos hídricos em várias regiões do mundo (Mbarki et al., 2018). Como a palma e o sorgo, mesmo sendo espécies com moderada tolerância a água salina, estudos reportam a viabilidade desse tipo de agricultura irrigada biossalina em ambiente semiárido (Wakchaure et al., 2016; Diniz et al., 2017; Podda et al., 2017; Lima et al., 2018a).

No entanto, estudos de sistemas consorciados voltados a avaliações de interações interespecíficas de clones de palma e cultivares de sorgo sob irrigação com águas de baixa qualidade ainda são incipientes na literatura, visto que, nenhum trabalho reporta o uso de consorciação múltipla dessas espécies. Quando consorciadas, essas culturas podem sofrer modificações nas taxas de crescimento e na dinâmica de uso dos recursos biofísicos, todavia ainda é esperada vantagem produtiva quando adotado esse tipo de sistema (Diniz et al., 2017; Lima et al., 2018a). Aplicações de índices biológicos em sistemas consorciados podem auxiliar no entendimento da competitividade das culturas, dos benefícios econômicos e das configurações de plantio ideais (clones versus cultivares) (Sadeghpour et al., 2013; Lin and Hülsbergen, 2017; Chimonyo et al., 2018).

Neste estudo, objetivou-se avaliar o desempenho do consórcio palma-sorgo sob caráter quantitativo e qualitativo, e quantificar a eficiência biológica e habilidade competitiva de clones de palma forrageira e cultivares de sorgo para recomendação do consórcio sustentável em ambiente semiárido sob irrigação com água salina.

## 2. Material e métodos

### 2.1. Descrição do local

O experimento foi conduzido na Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST), município de Serra Talhada, PE, Brasil (7°56'20" S; 38°17'31" O e 499 m), de 18 de março de 2017 a 16 de junho de 2018 (455 dias, ~15 meses). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo BSw<sup>h</sup>, Semiárido, com incidência de chuva nos meses mais quentes, e seca nos meses frios do ano (Alvares et al., 2013), com temperaturas mínima e máxima do ar de 20,1 e 32,9 °C, respectivamente, umidade relativa do ar próximo de 63%, precipitação pluvial média de 642 mm ano<sup>-1</sup>, e demanda atmosférica de 1.800 mm ano<sup>-1</sup>, resultando em déficit de 1.143 mm ano<sup>-1</sup> (Pereira et al., 2015; Silva et al., 2015).

A área experimental apresentava relevo plano e solo do tipo Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico, cuja amostragem, na profundidade de 0,00 a 0,20 m, apresentou os seguintes resultados físico-químicos: pH<sub>(água)</sub> = 5,95; CE<sub>c</sub> = 0,32 dS m<sup>-1</sup>; P<sub>(Mehlich<sup>-1</sup>)</sub> = 168,96 mg dm<sup>-3</sup>; K<sup>+</sup> = 13,8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Na<sup>+</sup> = 1,09 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Ca<sup>2+</sup> = 3,45 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg<sup>2+</sup> = 1,90 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H + Al = 0,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; SB = 20,25 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC = 20,85 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Saturação por bases (V%) = 97,15%; C<sub>orgânico</sub> = 4,6 g kg<sup>-1</sup>; M.O = 7,93 g kg<sup>-1</sup>; Areia = 828,6 g kg<sup>-1</sup>; Silte = 148,25 g kg<sup>-1</sup>; Argila = 23,15 g kg<sup>-1</sup> e densidade do solo de 1,45 g dm<sup>-3</sup>.

### 2.2. Espécies estudadas e design experimental da área

Os materiais vegetais utilizados foram os clones de palma forrageira: IPA Sertânia [IPA] e Miúda [Miu], ambos da espécie *N. cochenillifera* (L.) Salm-Dyck, e, a Orelha de Elefante Mexicana [OEM] da espécie *O. stricta* (Haw.) Haw., sendo as mesmas resistentes à Cochonilha-do-carmim (*Dactylopius opuntiae* Cockerell, 1929, Hemiptera: Dactylopidae). Adicionalmente foram utilizadas três cultivares de sorgo (*S. bicolor* (L.) Moench) de duplo propósito: 467, SF11 e 2502.

Antes da realização do plantio das culturas, houve o preparo inicial do solo, com aração, gradagem e sulcagem. Os clones de palma forrageira foram plantados em fevereiro de 2016, sendo conduzidos em condições de sequeiro até janeiro de 2017. Em março de 2017 foi efetuado o corte de uniformização deixando os cladódios basais (i.e., cladódios inseridos no solo) e os cladódios de 1ª ordem. Após esse período efetuaram-se

irrigações com base na evapotranspiração real da cultura (Queiroz et al., 2016), sendo posteriormente colhidos em junho de 2018. Os cladódios foram inseridos no solo de forma vertical (90°), deixando 50% da extremidade inferior inserida no solo, em sistema de alinhamento bilateral dos cladódios, espaçados em 1,0 x 0,2 m (i.e., 50.000 plantas ha<sup>-1</sup>).

As cultivares de sorgo foram semeadas em sulcos com 0,05 m de profundidade, distanciados a 0,25 m do cladódio basal da palma forrageira em março de 2017, sendo realizado um desbaste do estande com 28 dias após a emergência das plântulas, deixando-se 20 plantas por metro linear (i.e., 200.000 plantas ha<sup>-1</sup>). Para a cultura do sorgo, foram conduzidos quatro ciclos produtivos consecutivos: o primeiro ciclo de todas as cultivares teve um período de 120 dias após a emergência, sendo realizado o corte em julho de 2017; no segundo ciclo a cultivar 2502 com 71 dias após o corte (DAC), e as cultivares 467 e SF11 com 92 DAC. No terceiro ciclo o 2502 com 94 DAC, e as cultivares 467 e SF11 com 102 DAC; no quarto e último ciclo, foram 84 e 85 DAC, para 2502 e as cultivares 467 e SF11, respectivamente.

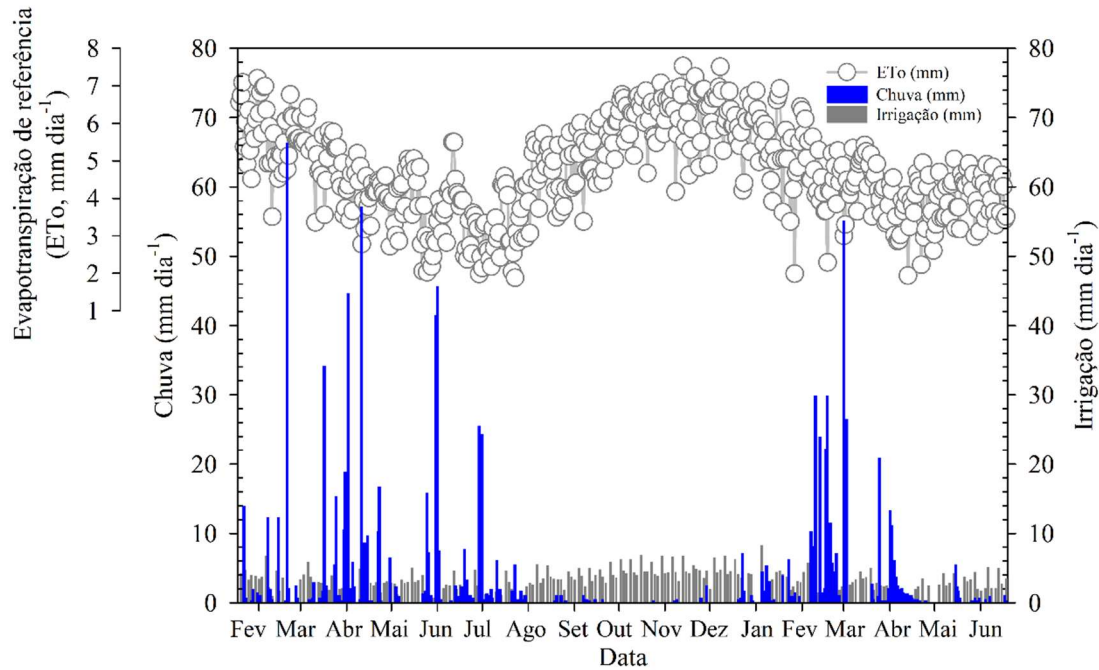
Foram realizadas duas adubações minerais com NPK em toda a área experimental, sendo a primeira de fundação em janeiro e a segunda de cobertura em agosto de 2017 na formulação 14-00-18 + 16 S, aplicando-se 525 kg ha<sup>-1</sup> (73,5 kg N ha<sup>-1</sup>; 94,5 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> e 84 kg S ha<sup>-1</sup>), ao longo do período experimental conforme Diniz et al. (2017). Os tratos culturais na área experimental foram realizados constantemente para possibilitar condições propícias ao desenvolvimento das culturas.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados (DBC, modelo:  $Y_{ij} = \mu + b_j + \tau_i + \varepsilon_{ij}$ , em que:  $Y_{ij}$  representa as variáveis dependentes;  $\mu$  a média geral das observações;  $b_j$  o efeito do bloco;  $\tau_i$  o tratamento utilizado e,  $\varepsilon_{ij}$  o erro residual aleatório), com 15 tratamentos, onde se têm três clones de palma forrageira e três cultivares de sorgo em sistemas de plantios exclusivos; e, nove sistemas consorciados a partir do número máximo de combinações entre os clones de palma forrageira e as cultivares de sorgo. Cada tratamento foi constituído por quatro parcelas (repetições), totalizando 60 unidades experimentais, as quais foram compostas por quatro fileiras, cada uma com 25 plantas da cactácea, totalizando uma área de 60 m<sup>2</sup>. A parcela útil foi composta pelas duas fileiras centrais, com 46 plantas úteis (sendo desprezadas quatro plantas das extremidades), totalizando uma área útil de 16,4 m<sup>2</sup>.

A irrigação foi realizada por meio de um sistema de gotejamento com vazão 1,75 ± 0,14 L h<sup>-1</sup>, a uma pressão de serviço de 101,32 kPa e coeficiente de uniformização da

aplicação de água igual a 94%, com espaçamento entre emissores de 0,20 m, utilizando-se água proveniente de um poço artesiano, localizado próximo à área experimental. A mesma apresentou uma condutividade elétrica média de  $1,51 \text{ dS m}^{-1}$ , sendo classificada como água de alta salinidade (C3) de acordo com Richards (1954);  $\text{pH} = 6,84$ ;  $\text{Na}^+ = 168,66 \text{ mg L}^{-1}$  e  $\text{K}^+ = 28,17 \text{ mg L}^{-1}$ .

O manejo da irrigação foi adotado com base na exigência hídrica da cultura da palma forrageira (i.e., devido a mesma ser a cultura principal), utilizando coeficiente de cultura ( $K_c$ ) de 0,52, conforme Queiroz et al. (2016). Os dados meteorológicos (Figura 1), para a determinação da reposição de água no solo, foram coletados diariamente de uma estação meteorológica automática, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia, localizada a 20 m da área experimental. Para a determinação da evapotranspiração de referência ( $E_{To}$ ), utilizou-se o método de Penman-Monteith padronizado pelo Boletim 56 da FAO (Allen et al., 1998).



**Figura 1.** Condições ambientais e disponibilidade hídrica via irrigação durante o período experimental de fevereiro de 2017 a junho de 2018 para o município de Serra Talhada-PE, Brasil.

Durante o período experimental (~15 meses), as chuvas se concentraram nos meses de fevereiro a julho em 2017 e, fevereiro a maio de 2018, totalizando um acumulado de precipitação pluvial de 997 mm. Os meses de agosto a janeiro compreenderam o período de estiagem. A suplementação de água por irrigação totalizou

623,21 mm ( $1,4 \text{ mm dia}^{-1}$ ). A ETo apresentou média de  $4,71 \text{ mm dia}^{-1}$  durante o período experimental (i.e., com máxima de  $7,53 \text{ mm dia}^{-1}$  e mínima de  $0,40 \text{ mm dia}^{-1}$ ), totalizando uma demanda atmosférica de 2.431,32 mm.

### *2.3. Rendimento de biomassa da palma forrageira e do sorgo*

A biomassa verde e seca total ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) dos cladódios da palma forrageira foi mensurada na ocasião da colheita. Considerou-se as plantas da parcela útil, de modo que as mesmas, uma vez pesadas (para obtenção do peso fresco) em balança de precisão, foram posteriormente fragmentadas e acondicionadas em sacos de papel. Estes foram identificados e conduzidos a uma estufa de ventilação forçada de ar a  $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , até obtenção de peso seco constante (Sadeghpour et al., 2013). Além disso, manteve-se nas plantas em campo os cladódios basais e os de primeira ordem no momento do corte.

Para as cultivares de sorgo, a análise de biomassa foi determinada através da produtividade de biomassa verde e seca ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) da parte aérea (i.e., colmo + folhas + panícula). A produção de forragem foi obtida a partir da colheita das plantas de dois metros lineares das fileiras centrais de cada parcela útil, cortadas a 0,10 m acima do solo. Três plantas representativas de sorgo foram selecionadas na parcela útil, possibilitando a estimativa da matéria seca após serem secadas em estufa de ventilação forçada de ar a  $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (Sadeghpour et al., 2013).

Após a pesagem e secagem da biomassa das culturas, as mesmas foram moídas individualmente em moinho tipo Willey (peneira de 1,0 mm), acondicionadas em saco de polietileno devidamente identificadas, e posteriormente foram realizadas as análises bromatológicas como matéria seca total (MSt), proteína bruta (PB), carboidratos totais (CT), nitrogênio total (NT), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), extrato etéreo (EE), matéria mineral (MM), cinzas (CZ) e digestibilidade *in vitro* da matéria seca (DIVMS) conforme metodologia proposta pela AOAC (1990) e Van Soest et al. (1991).

### *2.4. Aplicações de índices de eficiência biológica e habilidade competitiva*

A eficiência biológica do consórcio palma-sorgo foi obtida por meio dos índices descritos a seguir. O índice de uso eficiente da terra (UET), que consiste no

aproveitamento da área relativa da terra, analisando a eficiência biológica das culturas em sistema exclusivo e consorciado, foi obtido através da Equação 1 (Liu et al., 2018):

$$UET = \left[ \frac{(Y_{ab})}{(Y_{aa})} + \frac{(Y_{ba})}{(Y_{bb})} \right] \quad (1)$$

em que,  $Y_{ab}$  e  $Y_{ba}$  - produtividade da palma forrageira e produtividade do sorgo, ambas em sistemas consorciados, respectivamente;  $Y_{aa}$  e  $Y_{bb}$  - produtividade da palma forrageira e do sorgo em sistema exclusivo, respectivamente. Quando UET for maior que 1,0 existe vantagem na utilização do sistema consorciado atribuindo maior eficiência do uso da terra quando comparado com o monocultivo; quando a UET for menor que 1,0, significa desvantagem no uso do consórcio, ocasionado pela competição interespecífica, tornando-se desvantajoso o uso do consórcio; e se UET for = 1 não apresenta vantagem em consorciar.

A razão de área equivalente no tempo (RAET), coeficiente equivalente de terra (CET) e o índice de produtividade do sistema (IPS), por sua vez, auxiliam na avaliação da eficiência biológica da consorciação palma-sorgo, sendo calculados através das Equações 2, 3 e 4, respectivamente (Diniz et al., 2017; Xiao et al., 2018).

$$RAET = \left[ \frac{(UET_p \cdot t_p) + (UET_s \cdot t_s)}{(t_{ps})} \right] \quad (2)$$

$$CET = (UET_p \cdot UET_s) \quad (3)$$

$$IPS = \left[ \frac{(Y_{aa})}{(Y_{bb})} \cdot Y_{ba} \right] + Y_{ab} \quad (4)$$

em que,  $t_p$  - tempo em dias do ciclo da palma forrageira;  $t_s$  - tempo em dias do ciclo do sorgo;  $t_{ps}$  - tempo total do sistema de cultivo.

Entre os índices de habilidade competitiva foram utilizados o coeficiente de adensamento relativo (K), que expressa a vantagem e dominância relativa da cultura sobre a outra (Diniz et al., 2017; Xiao et al., 2018), determinados através das expressões matemáticas abaixo (Equações 5, 6 e 7):

$$K = (K_{ps} \cdot K_{sp}) \quad (5)$$

$$K_{ps} = \frac{(Y_{ab} \cdot Z_{ba})}{(Y_{aa} - Y_{ab}) \cdot Z_{ab}} \quad (6)$$

$$K_{sp} = \frac{(Y_{ba} \cdot Z_{ab})}{(Y_{bb} - Y_{ba}) \cdot Z_{ba}} \quad (7)$$

sendo que,  $K_{ps}$  - coeficiente de adensamento relativo da palma sobre o sorgo;  $K_{sp}$  - coeficiente de adensamento relativo do sorgo sobre a palma; Se o valor de  $K > 1$ , indica que o sistema consorciado tem uma vantagem de rendimento sobre o sistema de monocultivo; caso o valor de  $K = 1$ , indica ausência de vantagem de rendimento do sistema; e o valor de  $K < 1$ , indica uma desvantagem de produção sobre o sistema em monocultivo.

Já o índice de agressividade (A) foi determinado por meio das expressões matemáticas descritas abaixo.

$$A_{ab} = \left[ \frac{(Y_{ab})}{(Y_{aa} \cdot Z_{ab})} \right] - \left[ \frac{(Y_{ba})}{(Y_{ba} \cdot Z_{ba})} \right] \quad (8)$$

$$A_{ba} = \left[ \frac{(Y_{ba})}{(Y_{bb} \cdot Z_{ba})} \right] - \left[ \frac{(Y_{ab})}{(Y_{aa} \cdot Z_{ab})} \right] \quad (9)$$

em que,  $Z_{ab}$  - proporção de plantio da palma forrageira consorciada com o sorgo (20% - 50.000 plantas  $ha^{-1}$ );  $Z_{ba}$  - proporção de plantio de sorgo forrageira consorciada com a palma (80% - 200.000 plantas  $ha^{-1}$ ). Se  $A_{ab}$  for maior que 0, a habilidade competitiva da palma forrageira é sobressalente a do sorgo; caso contrário, o sorgo tem maior competitividade e; se  $A_{ab}$  for = 0, ambas as culturas possuem competição igual.

Calculou-se a perda e/ou ganho real de rendimento (PGAR) com auxílio da Equação 10, que expressa a perda e/ou ganho de rendimento proporcional nos sistemas consorciados em comparação com a monocultura. Calculou-se também a razão de competitividade (RC), através da Equação 11 e 12, que avalia a capacidade competitiva e vantagem da palma e do sorgo no sistema, respectivamente.

$$PGAR = \left[ UET_p \cdot \left( \frac{100}{Z_{ab}} \right) - 1 \right] + \left[ UET_s \cdot \left( \frac{100}{Z_{ba}} \right) - 1 \right] \quad (10)$$

316

$$RC_a = \left[ \frac{(UET_p)}{(UET_s)} \cdot \frac{(Z_{ba})}{(Z_{ab})} \right] \quad (11)$$

318

$$RC_b = \left[ \frac{(UET_s)}{(UET_p)} \cdot \frac{(Z_{ab})}{(Z_{ba})} \right] \quad (12)$$

320

321 onde,  $UET_p$  - uso eficiente da terra parcial da palma forrageira;  $UET_s$  - uso eficiente da  
 322 terra parcial do sorgo;  $Z_{ab}$  e  $Z_{ba}$  - proporção de plantio da palma forrageira consorciada  
 323 com o sorgo; proporção de plantio de sorgo forrageira consorciada com a palma,  
 324 respectivamente.

325 Todos os procedimentos de cálculos dos índices citados anteriormente foram  
 326 seguidos conforme Sadeghpour et al. (2013) e Diniz et al. (2017).

327

## 328 2.5. Índice econômico

329

330 Os custos econômicos para analisar a viabilidade da consorciação foram  
 331 realizados através do índice de vantagem monetária (IVM), considerando a receita  
 332 líquida do sistema (RL) para cada tratamento, conforme Baxevanos et al. (2017):

333

$$IVM = RL \cdot \left[ \frac{(UET - 1)}{(UET)} \right] \quad (13)$$

335

336 em que, IVM - é o índice de vantagem monetária (R\$ ha<sup>-1</sup>); RL - receita líquida por  
 337 hectare (R\$ ha<sup>-1</sup>), calculada conforme a subtração da receita bruta e o custo operacional  
 338 total de insumos e serviços. Atribuiu-se o valor fixo comercializado da matéria fresca de  
 339 forragem da palma e do sorgo de 150,00 e 450,00 R\$ Mg<sup>-1</sup>, respectivamente.

340

## 341 2.6. Análise estatística

342

343 Os dados de rendimento de biomassa dos sistemas, índices de eficiência  
 344 biológica e habilidade competitiva do sistema de consorciação foram comparados entre  
 345 os consórcios utilizados. Os mesmos foram submetidos aos testes de normalidade,

homocedasticidade e análise de variância pelo teste F ( $p < 0,05$ ). Quando significativa, as médias foram comparadas entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. As transformações de dados foram realizadas quando necessárias, para atenderem às condições das análises paramétricas. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa R (R Core Team, 2019).

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1. Rendimento das culturas

Nos quatro ciclos produtivos da cultura do sorgo em sistemas consorciados com a palma forrageira e nos sistemas exclusivos houve variações da produção de biomassa das cultivares em relação a massa fresca e seca (Tabela 1).

**Tabela 1.** Produtividade de massa fresca (MF, Mg ha<sup>-1</sup>) e massa seca (MS, Mg ha<sup>-1</sup>) dos quatro ciclos produtivos do sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e da palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*), no período de 2017 a 2018.

| Ciclos               | Tratamentos consorciados (Massa fresca, Mg ha <sup>-1</sup> ) |             |             |            |             |             |            |             |             | Tratamentos exclusivos (Massa fresca, Mg ha <sup>-1</sup> ) |             |             |             |              |              |
|----------------------|---------------------------------------------------------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
|                      | OEM<br>467                                                    | OEM<br>SF11 | OEM<br>2502 | IPA<br>467 | IPA<br>SF11 | IPA<br>2502 | Miu<br>467 | Miu<br>SF11 | Miu<br>2502 | OEM<br>Exc.                                                 | IPA<br>Exc. | Miu<br>Exc. | 467<br>Exc. | SF11<br>Exc. | 2502<br>Exc. |
| <sup>†</sup> Ciclo 1 | 24,74bcd                                                      | 21,04cd     | 8,17d       | 52,21ab    | 57,50ab     | 20,94cd     | 52,57abc   | 43,84abc    | 14,75d      | -                                                           | -           | -           | 49,61abc    | 72,22a       | 28,42bcd     |
| Ciclo 2              | 31,00bcd                                                      | 22,95cde    | 5,31e       | 44,94ab    | 61,69a      | 17,86de     | 46,61ab    | 46,85ab     | 12,31de     | -                                                           | -           | -           | 49,60ab     | 44,26abc     | 18,06de      |
| Ciclo 3              | 20,50bc                                                       | 13,84bc     | 10,24c      | 26,56ab    | 23,76abc    | 17,54bc     | 24,56abc   | 21,52abc    | 13,21bc     | -                                                           | -           | -           | 36,09a      | 26,20ab      | 14,96bc      |
| Ciclo 4              | 19,59bcd                                                      | 18,57bcd    | 4,37d       | 33,23ab    | 28,59abc    | 8,83cd      | 26,10abc   | 26,15abc    | 7,92cd      | -                                                           | -           | -           | 43,42a      | 34,78ab      | 20,13bcd     |
| <sup>§</sup> Soma    | 95,83bcd                                                      | 76,40d      | 28,09e      | 156,94ab   | 171,54a     | 65,17de     | 149,84ab   | 138,36abc   | 48,19de     | -                                                           | -           | -           | 178,72a     | 177,46a      | 81,57cd      |
| Yp                   | 132,28ab                                                      | 98,92abc    | 106,39abc   | 25,88c     | 49,35c      | 32,03c      | 47,91c     | 49,05c      | 32,49c      | 154,86a                                                     | 57,54bc     | 74,14abc    | -           | -            | -            |
| Yps                  | 228,11a                                                       | 175,32ab    | 134,48bcd   | 182,82ab   | 220,89a     | 97,20cde    | 197,75ab   | 187,41ab    | 80,68de     | 154,86abc                                                   | 57,54e      | 74,14de     | 178,72ab    | 177,46ab     | 81,57cde     |
| Ciclos               | Tratamentos consorciados (Massa seca, Mg ha <sup>-1</sup> )   |             |             |            |             |             |            |             |             | Tratamentos exclusivos (Massa seca, Mg ha <sup>-1</sup> )   |             |             |             |              |              |
|                      | OEM<br>467                                                    | OEM<br>SF11 | OEM<br>2502 | IPA<br>467 | IPA<br>SF11 | IPA<br>2502 | Miu<br>467 | Miu<br>SF11 | Miu<br>2502 | OEM<br>Exc.                                                 | IPA<br>Exc. | Miu<br>Exc. | 467<br>Exc. | SF11<br>Exc. | 2502<br>Exc. |
| Ciclo 1              | 7,42bcd                                                       | 6,35cd      | 3,73d       | 21,51ab    | 20,73abc    | 9,25bcd     | 18,88abc   | 15,72bcd    | 6,42cd      | -                                                           | -           | -           | 18,33abcd   | 32,23a       | 11,69bcd     |
| Ciclo 2              | 12,85bcd                                                      | 8,99cd      | 3,86d       | 19,54ab    | 24,83a      | 10,49bcd    | 19,07ab    | 19,17ab     | 7,85d       | -                                                           | -           | -           | 19,56ab     | 17,76abc     | 11,16bcd     |
| Ciclo 3              | 5,58bc                                                        | 3,33c       | 4,65bc      | 7,14abc    | 6,40bc      | 8,60ab      | 7,03abc    | 5,30bc      | 6,61bc      | -                                                           | -           | -           | 12,02a      | 7,16abc      | 5,56bc       |
| Ciclo 4              | 6,19abc                                                       | 5,73abc     | 1,54c       | 11,54a     | 8,80ab      | 2,83bc      | 8,56ab     | 7,20abc     | 2,75bc      | -                                                           | -           | -           | 12,43a      | 9,70a        | 6,27abc      |
| <sup>§</sup> Soma    | 32,04bcd                                                      | 24,40cd     | 13,78d      | 59,73a     | 60,76a      | 31,17bcd    | 53,54ab    | 47,39abc    | 23,63d      | -                                                           | -           | -           | 62,34a      | 66,85a       | 34,68bcd     |
| Yp                   | 11,56a                                                        | 8,27abc     | 9,34ab      | 1,68c      | 3,81bc      | 2,22c       | 3,93bc     | 4,41bc      | 2,81bc      | 12,05a                                                      | 4,42bc      | 5,83abc     | -           | -            | -            |
| <sup>†</sup> Yps     | 43,60bcd                                                      | 32,67cde    | 23,12ef     | 61,41ab    | 64,57ab     | 33,39cde    | 57,47ab    | 51,80abc    | 26,44de     | 12,05fg                                                     | 4,42g       | 5,83g       | 62,34ab     | 66,85a       | 34,68cde     |

Médias seguidas de letras iguais na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda; Exc. - Exclusivo. Cultivares de sorgo - 467, SF11 e 2502.

Yp - Rendimento do ciclo da palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*); Yps - Rendimento do sistema palma-sorgo.

<sup>§</sup>Dados referentes ao somatório dos quatro ciclos produtivo das cultivares de sorgo.

<sup>†</sup>Dados transformados pelo método de Raiz quadrada ( $x+0,5$ ).

Os ciclos 1 e 2 das cultivares de sorgo, de maneira geral, apresentaram rendimentos de produção de massa fresca 1,62 vezes maior, quando comparados aos ciclos 3 e 4; e para produção de massa seca foram 2,13 vezes superiores. Esses resultados estão relacionados ao vigor das plantas de sorgo, que nos primeiros ciclos (i.e., planta e soca) apresentaram maior capacidade produtiva. As condições ambientes deficitárias no ciclo 3, resultantes da elevada evapotranspiração de referência e do baixo

suprimento hídrico via irrigação, culminou em expressivos declínios do rendimento produtivo de massa seca do sorgo (54,29%). As irrigações foram feitas com base na exigência hídrica da palma forrageira, que é bem inferior à demanda hídrica do sorgo.

Apesar do sorgo ser uma cultura com tolerância ao deficit hídrico, Bell et al. (2018) observaram reduções expressivas no rendimento das culturas quando expostas há manejos inadequados de irrigação e demanda atmosférica elevada em ambiente semiárido, principalmente em fases fenológicas com maior requerimento hídrico, comprometendo na produção de biomassa da cultura e acarretando em mortalidade do estande ao longo do ciclo, justificando o declínio de rendimento no presente estudo.

Ao final dos ciclos produtivos (i.e., soma dos rendimentos dos ciclos do sorgo), observa-se na Tabela 1, que as cultivares 467 e SF11 em sistema exclusivo apresentaram elevados rendimentos de biomassa fresca, sendo superiores a cultivar 2502 ( $p < 0,05$ ). Entretanto, as cultivares 467 e SF11 exclusivas, não diferiram dos sistemas consorciados nas configurações: IPA-467, IPA-SF11, Miu-467 e Miu-SF11, contudo a última configuração não se deferiu da cultivar 2502 em sistema exclusivo. Devido suas características genéticas e fenotípicas, porte de crescimento e acúmulo de fitomassa em suas estruturas vegetativas, a cultivar 2502 exibiu os menores rendimentos de produção de biomassa, em ambos os sistemas (i.e., consorciado e exclusivo, média de 47,15 e 81,57 Mg ha<sup>-1</sup> massa fresca, respectivamente).

Em média, os resultados apresentados, neste estudo, foram superiores aos reportadas por Samarappuli and Berti (2018), trabalhando com duas cultivares híbridas de sorgo forrageiro (non-BMR (*Brown midrib*) e BMR brachytic dwarf) em sistema exclusivo e consorciado, com médias produtivas de 12,8 e 17,7 Mg ha<sup>-1</sup> de massa seca de forragem no sistema de plantio exclusivo. Segundo esses autores, a consorciação sorgo com o milho promoveu decréscimo no rendimento de massa seca, comportamento esse análogo aos dos sistemas palma-sorgo no presente estudo.

O uso da consorciação melhora o aproveitamento de recursos ambientais, entretanto, esse tipo de sistema proporcionou decréscimos de produção de massa seca nas diferentes configurações. No primeiro ciclo de produção, as cultivares de sorgo SF11, 467 e 2502, apesar da consorciação, apresentaram satisfatórios rendimentos de biomassa seca comparado com o sistema exclusivo ( $p > 0,05$ ), sendo a cultivar SF11 superior a cultivar 2502 em sistema exclusivo ( $p < 0,05$ ). Decréscimos no rendimento de biomassa seca também foram relatados por Borghi et al. (2013) para a cultura do sorgo em sistemas consorciados com capim-marandu (*Brachiaria brizantha* Stapf) e

capim-mombaça (*Panicum maximum* Jacq.), no entanto, esses efeitos não foram intensos devido à alta capacidade do uso de radiação proeminente da cultura do sorgo.

A utilização do sorgo como cultura secundária nos sistemas consorciados é capaz de promover cultivos mais resilientes e estáveis, principalmente, em ambientes com baixa fertilidade e sob condições hídricas deficitárias, devido a sua elevada capacidade adaptativa, além disso, diversas cultivares de sorgo apresentam satisfatória performance na produção de matéria seca (Samarappuli and Berti, 2018).

Os sistemas de plantio palma-sorgo, em geral, que apresentaram maiores performances nos rendimentos produtivos de massa fresca, foram os consorciados com as cultivares de sorgo 467 e SF11 (134,20 e 128,76 Mg ha<sup>-1</sup> massa fresca, respectivamente). Logo, os sistemas de menores rendimentos foram aqueles consórcios com a cultivar 2502 ( $p < 0,05$ ) (Tabela 1), resultante da menor contribuição de biomassa. Na produção de massa seca dos sistemas, o desempenho de rendimento dos mesmos, foram bem similares ao de produção de massa fresca, exceto nos sistemas de cultivo com as cultivares 467 e SF11. Por se tratarem de cultivares fenotipicamente distintas da 2502, com estatura de colmo mais longa, ciclos fenológicos mais tardios e maiores quantidades de nós, a produção de biomassa torna-se mais elevada incrementando, assim, o sistema de produção (Shukla et al., 2017).

Os sistemas de plantio de palma forrageira consorciados com a cultivar de sorgo 2502, em geral, influenciaram na produção de forragem das cactáceas ( $p < 0,05$ ) (Tabela 1). Isso pode estar relacionado as distintas morfologias radiculares das culturas em consórcio, como também, a presença de compostos alelopáticos exsudados pelas raízes (e.g., sorgoleona), expressivo nesse tipo de genótipo de sorgo, acarretando em menor atividade microbiana no solo, trocas gasosas e inibição do rendimento da cultura devido sua atividade supressora e fitotóxica (Gimsing et al., 2009). Os maiores rendimentos produtivos de massa seca de forragem foram observados nos clones OEM e Miúda ( $p > 0,05$ ) em sistemas de cultivo exclusivo, e a OEM consorciada com a cultivar de sorgo 467, sendo diferente dos rendimentos dos clones IPA e Miúda, em configuração com todas as cultivares de sorgo.

Os resultados deste estudo são superiores aos reportados por Diniz et al. (2017) tanto em proporção de matéria fresca quanto de matéria seca, quando adotaram o sistema consorciado da OEM (*O. stricta* (Haw.) Haw.) com a cultivar de sorgo SF15 em ambiente semiárido, com irrigação de água salobra. Lima et al. (2018b) também

estudando o mesmo clone de cacto consorciado com sorgo 2502 em ambiente similar, obtiveram resultados inferiores de rendimento ao do presente estudo.

Uma das justificativas das maximizações desses rendimentos nos sistemas de cultivo serem superiores aos reportados na literatura, pode estar atrelado a densidade de plantas da cactácea (i.e., 50.000 plantas ha<sup>-1</sup>), sendo superior aos cultivos convencionais, e ao uso da irrigação complementar. Dando ênfase a espécie *O. stricta*, a mesma destaca-se devido a expressiva adaptabilidade e agressividade (Rule and Hoffmann, 2018); e também, a resposta positiva ao aumento da densidade populacional, como observada por Dubeux Jr. et al. (2006), avaliando densidades de 5.000 a 40.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Souza et al. (2017), trabalhando também com as mesmas densidades e adicionando o gênero *Nopalea* em seu estudo, obtiveram demasiado incremento nos rendimentos. Sob irrigação, Diniz et al. (2017) verificaram respostas substanciais da OEM em sistema de plantio exclusivo e consorciado com sorgo.

Os rendimentos individuais dos clones de palma forrageira nos sistemas consorciados com as cultivares de sorgo apresentaram declínio de produção quando comparados aos seus sistemas exclusivos ( $p < 0,05$ ). Todavia, os sistemas consorciados quando comparados com os respectivos clones de palma em sistema exclusivo não apresentaram diferença significativa. Diversos estudos na literatura reportaram o efeito da diminuição do rendimento da cultura principal quando submetida ao sistema consorciado (Diniz et al., 2017; Kimura et al., 2018; Lima et al., 2018b; Sun et al., 2018), porém, esses rendimentos são superiores quando somados as contribuições das culturas individualmente, como também seus benefícios ecológicos e econômicos.

Os maiores rendimentos de biomassa seca para os sistemas exclusivos de sorgo foram das cultivares SF11 e 467 ( $p > 0,05$ ). Já para palma forrageira exclusiva, as melhores performances foram dos clones OEM e Miu ( $p > 0,05$ ), no entanto não havendo diferença significativa comparando-se entre os clones de *Nopalea* (Tabela 1). Em geral, nos rendimentos totais dos clones de *Nopalea* consorciados com as cultivares 467 e SF11 apresentaram os maiores rendimentos de massa seca, contribuição essa expressiva por causa da cultura do sorgo, visto que a mortalidade dos clones de *Nopalea* foram elevados. As mortalidades dos clones *Nopalea* foram bem superiores (IPA e Miúda com  $81,62 \pm 1,45\%$  e  $71,68 \pm 3,71\%$ , respectivamente) ao clone *Opuntia* ( $8,56 \pm 1,29\%$ ), como consequência da ocorrência patógenos proveniente da alta umidade do solo durante os períodos chuvosos e irrigações (Guevara et al., 2003). O consórcio OEM e as cultivares de sorgo apresentou os menores patamares produtivos (23,40 Mg

ha<sup>-1</sup>). Por se tratarem de espécies com expressiva competitividade, quando associadas ocorrem efeitos antagônicos, havendo declínio, sobretudo nos rendimentos das cultivares de gramíneas ( $p < 0,05$ ).

### 3.2. Composição química de forragem

Na Tabela 2 são apresentadas as composições químico-bromatológicas dos cladódios de palma forrageira e do sorgo em sistema de cultivo exclusivo e consorciado ao final do ciclo das culturas.

**Tabela 2.** Parâmetros químico-bromatológicas de clones de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) em sistema de cultivo exclusivo e consorciado com sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench).

| Variáveis (%) | Tratamentos consorciados |          |          |         |          |          |         |          |          | Tratamentos exclusivos |          |          |
|---------------|--------------------------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|------------------------|----------|----------|
|               | OEM 467                  | OEM SF11 | OEM 2502 | IPA 467 | IPA SF11 | IPA 2502 | Miu 467 | Miu SF11 | Miu 2502 | OEM Exc.               | IPA Exc. | Miu Exc. |
| MSt           | 7,92                     | 7,28     | 7,86     | 6,36    | 6,80     | 6,01     | 7,34    | 7,92     | 7,65     | 6,95                   | 6,86     | 6,99     |
| PB            | 4,01                     | 4,65     | 4,06     | 3,57    | 4,51     | 4,80     | 4,07    | 3,24     | 2,14     | 4,09                   | 4,10     | 3,76     |
| CT            | 74,77                    | 74,55    | 74,95    | 74,35   | 70,00    | 69,52    | 73,21   | 76,38    | 73,21    | 70,95                  | 70,39    | 65,46    |
| EE            | 1,22                     | 0,97     | 0,96     | 1,10    | 1,97     | 1,60     | 0,99    | 0,92     | 1,51     | 1,74                   | 0,84     | 2,60     |
| FDN           | 16,86                    | 17,13    | 18,59    | 24,46   | 16,25    | 16,22    | 13,83   | 15,07    | 9,00     | 19,74                  | 17,17    | 29,13    |
| FDA           | 3,09                     | 3,10     | 3,36     | 7,99    | 3,59     | 3,74     | 2,73    | 3,04     | 4,28     | 3,57                   | 3,52     | 3,39     |
| MM            | 19,99                    | 19,81    | 20,01    | 20,97   | 23,51    | 24,06    | 21,72   | 19,45    | 23,12    | 23,21                  | 24,66    | 28,17    |
| DIVMS         | 76,50                    | 77,64    | 81,03    | 89,61   | 84,90    | 79,90    | 82,82   | 85,81    | 81,11    | 80,07                  | 87,24    | 83,47    |

| Variáveis (%) | **Tratamentos consorciados |          |          |         |          |          |         |          |          | **Tratamentos exclusivos |           |           |
|---------------|----------------------------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|--------------------------|-----------|-----------|
|               | 467 OEM                    | SF11 OEM | 2502 OEM | 467 IPA | SF11 IPA | 2502 IPA | 467 Miu | SF11 Miu | 2502 Miu | 467 Exc.                 | SF11 Exc. | 2502 Exc. |
| MSt           | 28,13b                     | 28,11b   | 41,91a   | 31,40b  | 28,99b   | 28,93b   | 29,39b  | 28,92b   | 31,90b   | 25,64c                   | 25,03c    | 28,16b    |
| PB            | 11,25                      | 7,52     | 11,89    | 11,09   | 5,28     | 9,05     | 9,49    | 12,82    | 10,27    | 9,85                     | 9,76      | 10,53     |
| CT            | 81,45                      | 85,40    | 81,15    | 81,03   | 87,16    | 83,40    | 83,47   | 77,99    | 81,62    | 83,11                    | 82,48     | 81,07     |
| EE            | 1,31                       | 1,41     | 2,25     | 1,35    | 1,45     | 1,55     | 1,42    | 1,62     | 2,00     | 1,72                     | 1,68      | 1,85      |
| FDN           | 50,95                      | 53,99    | 36,38    | 54,37   | 54,71    | 44,52    | 53,61   | 64,72    | 44,25    | 51,75                    | 52,62     | 53,09     |
| FDA           | 29,20                      | 26,36    | 16,26    | 21,67   | 27,48    | 20,31    | 27,10   | 32,66    | 20,05    | 26,58                    | 27,15     | 24,84     |
| MM            | 5,98                       | 5,65     | 4,70     | 6,52    | 6,10     | 5,98     | 5,60    | 7,56     | 6,11     | 5,31                     | 6,07      | 6,52      |
| DIVMS         | 60,67                      | 65,88    | 74,37    | 63,97   | 64,33    | 68,72    | 55,50   | 61,35    | 73,29    | 64,01                    | 59,98     | 63,21     |

OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda. Cultivares de sorgo - 467, SF11 e 2502; Exc. - Exclusivo. MSt - Matéria seca total; PB - Proteína bruta; CT - Carboidratos totais; EE - Extrato etéreo; FDN - Fibra em detergente neutro; FDA - Fibra em detergente ácido; MM - Matéria mineral; e, DIVMS - Digestibilidade *in vitro* da matéria seca. \*\*Dados químico-bromatológicos referente ao último ciclo da cultura do sorgo. Médias seguidas de letras iguais na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados de todas as variáveis químico-bromatológicas da palma forrageira nas distintas configurações de cultivo não apresentaram diferença significativa. Apesar dos clones serem submetidos a distintas condições de competição por recursos biofísicos, as mesmas não foram capazes de alterar as características bromatológicas, mantendo-se assim, a qualidade da forragem independente do sistema de cultivo. Fatores como idade dos cladódios são expressivas nas alterações químicas e

bromatológicas dos mesmos (Hernández-Urbiola et al., 2011), contudo, acredita-se que pelo fato de todos os clones apresentarem a mesma idade essas alterações não foram significativas.

As fibras e proteínas na alimentação animal e de humanos são elementos importantes na composição de dietas. Além disso, auxiliam na saúde e incrementam na performance de produtos agropecuários (e.g., carne, leite e derivados). Estudos realizados por Abidi et al. (2009) e Méndez et al. (2015) reportaram não haver diferença nos teores de proteína bruta em diversos clones de cactos do gênero *Opuntia*, e que fatores ambientais e época de colheita em diferentes estações do ano podem modificar as características químico-bromatológicas dos mesmos.

Com características nutricionais relevantes e ausência de alterações em sua composição aos sistemas de cultivo consorciados, a palma forrageira é um alimento com expressiva aceitação animal e favorece em melhor rendimento de carne quando adicionado a dieta. Em estudos realizados por Abreu et al. (2019) com ovinos de corte, a substituição de farelo de trigo por palma forrageira do gênero *Nopalea* proporcionou maior qualidade da carne, como também intenção de compra pelos consumidores.

Já para a cultura do sorgo, todas as variáveis químico-bromatológicas não apresentaram diferença, com exceção da matéria seca ( $p < 0,05$ ) (Tabela 2). A matéria seca mais elevada foi do sorgo 2502 consorciado com OEM (41,91%). Em geral, as cultivares em sistemas consorciados produziram maiores teores de matéria seca, quando comparado com o sistema exclusivo ( $p < 0,05$ ), exceto o 2502 exclusivo. Apesar da cultivar 2502, não apresentar rendimento de massa seca expressivamente elevado no quarto ciclo (Tabela 1), quando comparado com 467 e SF11, por ser um sorgo de porte menor, o acúmulo de água em suas estruturas celulares são menores e sua concentração de matéria seca torna-se maior.

Resultados similares de matéria seca na cultura do sorgo foram reportados por Wannasek et al. (2017) ressaltando a importância da cultura na produção de biomassa em áreas que possuem baixa disponibilidade hídrica, como também seu potencial forrageiro na produção de silagem e biogás. A proteína bruta do sorgo para a alimentação animal é de suma importância, em média, sendo similar aos achados de Borghi et al. (2013), entretanto os sistemas de consórcio com outras gramíneas forrageiras proporcionaram alterações bromatológicas nos percentuais de proteína bruta do sorgo.

Na utilização do consórcio palma-sorgo, evidencia-se diversos benefícios para a alimentação animal, visto que esse sistema contribui para suprir carências nutricionais entre as culturas. Devido à palma forrageira apresentar baixa matéria seca e proteína bruta, a complementaridade do sorgo pode incrementar em uma dieta mais relevante para os animais, como também, uma menor suscetibilidade a sazonalidade de forragem por serem duas culturas adaptadas. Para Gregory and Felker (1992), esse tipo de adicionamento suplementar na palma forrageira, causa diminuição de custos com suplementação proteica na dieta de animais, visto que, sua utilização na alimentação animal é bastante difundida em diversas regiões do mundo (Hernández-Urbiola et al., 2011).

### 3.3. Eficiência biológica e habilidade competitiva dos sistemas

Na Tabela 3, observa-se os valores dos índices de eficiência biológica e o índice de vantagem monetária dos sistemas de cultivos da palma forrageira consorciados com as cultivares de sorgo 467, SF11 e 2502.

**Tabela 3.** Índices de eficiência biológica de clones de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) em consórcio com cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench).

| Tratamentos | UET <sub>p</sub> | UET <sub>s</sub> | UET <sub>Total</sub> | RAET | CET  | IPS      | IVM        |
|-------------|------------------|------------------|----------------------|------|------|----------|------------|
| OEM-2502    | 0,81             | 0,42ab           | 1,23ab               | 1,14 | 0,34 | 14,53ab  | -30,05d    |
| OEM-467     | 1,01             | 0,50ab           | 1,51ab               | 1,41 | 0,50 | 17,57a   | 11.217,38b |
| OEM-SF11    | 0,66             | 0,36b            | 1,02b                | 0,95 | 0,24 | 12,57abc | -325,51d   |
| IPA-2502    | 0,64             | 1,00a            | 1,64ab               | 1,42 | 0,42 | 7,23c    | 1.652,53c  |
| IPA-467     | 0,47             | 0,98a            | 1,45ab               | 1,24 | 0,41 | 6,25c    | 13.775,37b |
| IPA-SF11    | 0,99             | 0,94ab           | 1,93a                | 1,73 | 0,81 | 8,29bc   | 26.518,44a |
| Miu-2502    | 0,47             | 0,72ab           | 1,19ab               | 1,04 | 0,34 | 6,81c    | -303,85d   |
| Miu-467     | 0,69             | 0,91ab           | 1,60ab               | 1,41 | 0,57 | 8,90bc   | 15.168,34b |
| Miu-SF11    | 0,78             | 0,72ab           | 1,50ab               | 1,34 | 0,57 | 8,53bc   | 13.086,74b |

OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda. Cultivares de sorgo - 467, SF11 e 2502. UET<sub>p</sub> - Uso eficiente da terra parcial da palma forrageira; UET<sub>s</sub> - Uso eficiente da terra parcial do sorgo; UET<sub>Total</sub> - Uso eficiente da terra total; RAET - Razão de área equivalente no tempo; CET - Coeficiente equivalente de terra; IPS - Índice de produtividade do sistema (Mg MS ha<sup>-1</sup>) e, IVM - Índice de vantagem monetária (R\$ ha<sup>-1</sup>). Médias seguidas de letras iguais no mesmo índice não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados de uso eficiente da terra parcial da palma forrageira (UET<sub>p</sub>), embora não apresentassem diferença significativa, obtiveram performance distintas entre os clones do gênero *Opuntia* e *Nopalea*. No uso eficiente da terra parcial do sorgo (UET<sub>s</sub>) houve diferença significativa para as cultivares em relação as configurações de consorciação, observando-se que os clones (OEM e Miu) de elevado desempenho e maior UET, influenciaram no menor desempenho das cultivares de sorgo. Em todos as

configurações de consórcio, o uso eficiente da terra total ( $UET_{Total}$ ) obtidos foram superiores a 1,0; apresentando oscilação de 1,02 a 1,93.

O sistema de consórcio de maior  $UET_{Total}$  foi proeminente da IPA-SF11 (i.e., 1,93) ( $p < 0,05$ ), entretanto, não diferenciou-se das demais configurações de plantio, exceto OEM-SF11 ( $p < 0,05$ ) (Tabela 3). Entende-se que, com 1,93 de  $UET_{Total}$ , o consórcio dessa configuração contribuiu com incremento satisfatório no sistema de 93%, sendo assim necessário a implantação de 0,93 ha a mais caso fosse utilizar a cultura em sistema exclusivo, acarretando na utilização de mais terra e insumos agrícolas. Esses resultados corroboram com estudos realizados por Diniz et al. (2017), que evidenciaram  $UET_{Total}$  de 1,51, para sistema consorciado de palma Orelha de Elefante Mexicana e o sorgo cultivar SF15 em ambiente semiárido.

A contribuição média do sistema de consórcio no uso eficiente da terra com *Opuntia* foi de 25%, considerando todas as cultivares de sorgo; já para *Nopalea*, sendo a IPA e Miúda, foram de 67% e 43%, respectivamente. Esses resultados confirmam que a utilização do consórcio palma-sorgo possui relevante importância e viabilidade, desde o melhor aproveitamento da terra (i.e., recursos biofísicos), como também incrementos significativos no rendimento final da lavoura. Utilizando também a cultura do sorgo em sistemas consorciados com feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) e porongo (*Lagenaria siceraria* (Molina) Standl.), Chimonyo et al. (2016) obtiveram valores de  $UET_{Total}$  de 1,54 e 1,44, respectivamente. Apesar das respostas de  $UET_{Total}$  serem inferiores ao do presente estudo, os autores relataram que a cultura do sorgo foi crucial na complementaridade e estabilidade desses sistemas.

A utilização de gramíneas como sorgo em sistema consorciado com a palma, além de favorecer esta complementariedade produtiva, minimiza as perdas de água do solo por evaporação no período diurno para a atmosfera, decorrente da proteção e fechamento do dossel (Chimonyo et al., 2016). Este tipo de microclima criado pelos dosséis favorece em uma menor temperatura e ascensão da umidade relativa do ar, que contribuirá para uma maior abertura estomática e, conseqüentemente, maior assimilação de  $CO_2$  pelas plantas, convertendo-o em biomassa posteriormente no processo de fotossíntese.

Resultados como esses promovem melhoria na proteção e recobrimento dos solos, e na disponibilidade hídrica dos sistemas consorciados, tornando-o promissor em ambientes com vulnerabilidade climática (Chimonyo et al., 2016), já que o plantio de

palma forrageira é considerado uma alternativa crescente no setor pecuário (Derak et al., 2017), devido sua diversidade de uso.

Corroborando com os resultados obtidos nos rendimentos de biomassa das culturas nos sistemas consorciados (Tabela 1) e, juntamente com o uso eficiente da terra elevado (Tabela 3), pode-se caracterizá-lo como viável para esse tipo de implantação do sistema. Esse tipo de achado, não pode ser unicamente concluído com os resultados do  $UET_{Total}$ , devido a alguns fatores intrínsecos do sistema e/ou da cultura, fazendo-se necessário a interpretação concatenada com o rendimento de biomassa dos sistemas (Nelson et al., 2018). Liu et al. (2018) afirmaram que um dos principais motivos de sucesso no rendimento desses sistemas é a densidade de plantas e o arranjo das fileiras de cultivo, que ocasiona otimização de espaço físico da área.

Os resultados obtidos para a razão de área equivalente no tempo (RAET) apresentaram superioridade a 1,0; com exceção para o consórcio OEM-SF11, sendo 0,95 ( $p > 0,05$ ) (Tabela 3). Quando os valores de RAET são inferiores a 1,0 consiste que o consórcio não possui vantagem (Diniz et al., 2017), entretanto, essa desvantagem foi de 5%, fenômeno esse decorrente do menor  $UET_{Total}$  do sistema OEM-SF11, o que possivelmente poderia ser corrigida com algum manejo cultural, dentre eles o tempo de corte (i.e., antecipação da colheita), já que o índice é calculado, adicionando-se o intervalo de tempo (dias) que as culturas foram mantidas em campo.

Os resultados relatados por Diniz et al. (2017) de  $RAET = 1,30$  foram bem próximos ao do presente estudo, devido ao ciclo mais curto de avaliação experimental tanto para a palma forrageira como para o sorgo e,  $UET$  foram elevados. Ambos os estudos podem ser classificados como sistemas consorciados viáveis para a produção agrícola.

Para o coeficiente equivalente de terra (CET), a vantagem produtiva é estabelecida quando o CET é acima de 0,25 (ou 25%). A configuração de OEM-SF11, esboçou valor inadequado ( $CET = 0,24$ ). Apesar de ser ínfima a diferença, relatos na literatura atribui como valores insatisfatórios para sistemas de cultivo com palma e sorgo (Diniz et al., 2017). Embora este fator expresse a idealização de performance do sistema, quando observa-se o índice de produtividade do sistema (IPS) do mesmo é notório que o rendimento foi bastante elevado, decorrente da alta produtividade dos sistemas exclusivos utilizado no cálculo, porém, a configuração OEM-SF11 não houve diferença significativa dos demais arranjos.

O IPS que apresentou maior magnitude entre as configurações de plantios foi da cactácea OEM consorciado com a cultivar 467 (17,57 Mg MS ha<sup>-1</sup>), entretanto, o mesmo esboçou diferença dos clones de *Nopalea* com sorgo ( $p < 0,05$ ). Quando comparado o clone do gênero *Opuntia* com os sorgos 2502, 467 e SF11, não houve diferença. Por tratar-se do mesmo clone de palma forrageira e, seu rendimento de forragem apresentar resultado elevado (Tabela 1), as respostas desses índices são condizentes aos resultados apresentados neste estudo, considerando-se rentável o uso, já que o IPS utiliza os resultados do sistema exclusivo e consorciado.

Tais respostas de rendimentos elevados podem estar ligadas aos mecanismos morfofisiológicos da palma forrageira. Como as gramíneas C4 fazem a liberação de CO<sub>2</sub> no período noturno e a abertura estomática dos cactos ocorre preponderantemente neste mesmo período, ocorre uma injeção de CO<sub>2</sub> no sistema beneficiando a atividade fotossintética da CAM, favorecendo na produção de biomassa e uso eficientes de recursos ambientais (Scalisi et al., 2016).

Estudos realizados por León-González et al. (2018), com palma forrageira *O. ficus-indica*, em clima sub-úmido na região do México, elucidaram resultados que esse tipo de cultura trabalha como uma sumidouro eficiente de CO<sub>2</sub>, sendo superior a cultura do milho (i.e., gramínea C4) e estocando expressivas quantidades de carbono no solo, resultando assim, em incrementos na biomassa das raízes e da parte aérea das plantas.

Para os resultados do IVM houve diferença significativa entre os sistemas consorciados, apresentando índices positivos e negativos (Tabela 3). A configuração IPA-SF11 foi detentora do maior IVM com 26.518,44 R\$ ha<sup>-1</sup> ( $p < 0,05$ ), seguidos da Miu-467, IPA-467, Miu-SF11 e OEM-467, entretanto, as mesmas não diferenciaram entre si. Os elevados IVM está diretamente relacionado na performance dos sistemas consorciados na utilização da terra, ou seja, no UET<sub>Total</sub> efetivo do sistema (Baxevanos et al., 2017; Ghosh, 2004).

O menor IVM positivo foi da IPA-2502 ( $p < 0,05$ ) com 1.652,53 R\$ ha<sup>-1</sup>. Apesar da contribuição de massa fresca dos clones de *Nopalea*, nas configurações reportadas anteriormente, não serem elevadas (vide a Tabela 1) quando comparada com *Opuntia*, os sistemas apresentaram índices positivos e expressiva rentabilidade econômica proeminente da massa de forragem do sorgo, devido o valor de venda ser maior que o da palma forrageira (450,00 vs. 150,00 R\$ Mg<sup>-1</sup> em matéria natural, respectivamente).

Utilizando sistema consorciado de palma forrageira e sorgo, Lima et al. (2018b) observaram que os benefícios econômicos são maiores quando comparados com sistema

de palma exclusiva, devido a soma de forragem para a venda favorecer em maiores retornos econômicos, como também o preço comercializado. Esses resultados corroboram com os achados no presente estudo para a maioria dos sistemas de consórcio, exceto, OEM-2502, Miu-2502 e OEM-SF11, sendo os mesmos com IVM negativo (Tabela 3), acarretando em prejuízos econômicos na implantação do primeiro ano de cultivo do sistema.

Nas configurações de cultivo com IVM negativo, não houve diferença entre os sistemas. A OEM-SF11 foi detentora do menor IVM (-325,52 R\$ ha<sup>-1</sup>), influenciando em débitos econômicos. Esse comportamento está atrelado a baixa produção do sorgo devido a competição interespecífica, visto que, é uma planta forrageira de elevado valor de mercado, como também, o baixo UET<sub>Total</sub> (1,02) utilizado na composição do IVM proporcionando resultados insatisfatórios no primeiro ano de produção. Acredita-se que os resultados negativos podem tornar-se positivos e lucrativos a partir do segundo ano de produção (Lima et al., 2018b). De acordo com Vlachostergios et al. (2018), o IVM auxilia no entendimento das receitas geradas pelos sistemas consorciados, e algumas configurações de cultivo podem proporcionar IVM negativo.

Na Tabela 4, observa-se os valores dos índices de habilidade competitiva dos clones de palma forrageira consorciadas com as cultivares de sorgo.

**Tabela 4.** Índices de habilidade competitiva de clones de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) em consórcio com cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench).

| Tratamentos | K <sub>ps</sub> | K <sub>sp</sub> | K       | RC <sub>a</sub> | RC <sub>b</sub> | A <sub>ps</sub> | A <sub>sp</sub> | PGAR <sub>p</sub> | PGAR <sub>s</sub> | PGAR   |
|-------------|-----------------|-----------------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|--------|
| OEM-2502    | -28,61          | 0,20            | -8,30ab | 8,54a           | 0,13            | 3,55            | -3,55           | 407,06            | 51,81ab           | 458,88 |
| OEM-467     | 19,50           | 0,26            | 2,7ab   | 8,21ab          | 0,13            | 4,44            | -4,44           | 506,70            | 62,21ab           | 568,91 |
| OEM-SF11    | 29,97           | 0,15            | 4,18ab  | 7,45ab          | 0,14            | 2,87            | -2,87           | 331,82            | 44,63b            | 376,46 |
| IPA-2502    | -0,34           | 0,62            | -0,58ab | 4,08ab          | 7,36            | 1,96            | -1,96           | 320,89            | 124,24a           | 445,14 |
| IPA-467     | 8,77            | 3,88            | 19,61a  | 2,20b           | 2,18            | 1,14            | -1,14           | 236,12            | 121,93a           | 358,05 |
| IPA-SF11    | -14,01          | 0,72            | -19,40b | 4,94ab          | 0,73            | 3,77            | -3,77           | 494,96            | 117,33ab          | 612,29 |
| Miu-2502    | 4,18            | -0,49           | -0,59ab | 2,86ab          | 0,41            | 1,49            | -1,49           | 238,96            | 89,48ab           | 328,44 |
| Miu-467     | -1,50           | 0,28            | 0,96ab  | 3,75ab          | 0,43            | 2,31            | -2,31           | 345,58            | 113,63ab          | 459,22 |
| Miu-SF11    | 21,10           | 0,81            | 20,39a  | 4,33ab          | 0,24            | 3,00            | -3,00           | 390,14            | 89,22ab           | 479,35 |

OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda. Cultivares de sorgo - 467, SF11 e 2502. K<sub>ps</sub> - Coeficiente de adensamento relativo da palma sobre o sorgo; K<sub>sp</sub> - Coeficiente de adensamento relativo do sorgo sobre a palma; K - Coeficiente de adensamento relativo; RC<sub>a</sub> - Razão de competição da palma; RC<sub>b</sub> - Razão de competição do sorgo; A<sub>ps</sub> - Agressividade da palma sobre o sorgo; A<sub>sp</sub> - Agressividade do sorgo sobre a palma; PGAR<sub>p</sub> - Perda ou ganho atual de rendimento da palma; PGAR<sub>s</sub> - Perda ou ganho atual de rendimento do sorgo e, PGAR - Perda ou ganho atual de rendimento. Médias seguidas de letras iguais no mesmo índice não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os coeficientes de adensamento relativo da palma sobre o sorgo (K<sub>ps</sub>) e do sorgo sobre a palma (K<sub>sp</sub>) apresentaram variações entre os mesmos, porém não houve diferença significativa (p > 0,05). Observa-se que as configurações OEM-467, OEM-

SF11, IPA-467, Miu-2502 e Miu-SF11 apresentaram valores de  $K_{ps}$  superiores a 1,0; o que implica em vantagens positivas na sua utilização. O comportamento esperado entre os sistemas consorciados é que o mesmo apresente rendimentos inferiores ao sistema de monocultivo devido a maior competição interespecífica. Entretanto, no presente estudo, a presença de valores negativos como pode ser visto nos índices  $K_{ps}$  e  $K_{sp}$  (Tabela 4) foram provenientes de menores rendimentos individuais de ambas as culturas em sistema exclusivo em detrimento destas quando consorciadas.

Esses resultados se confirmam quando observados simultaneamente com as razões de competição da palma e do sorgo,  $RC_a$  e  $RC_b$ , respectivamente. Devido a densidade de plantio da palma forrageira no presente estudo ser do tipo adensado e as suas características inerentes da cultura, a razão de competitividade das cactáceas foram bem mais expressivas que as dos sorgos, confirmando também a presença expressiva de uma competição interespecífica. Convergências como essas, também foram observadas por Diniz et al. (2017), mostrando que, o clone de palma forrageira foi mais dominante do que a cultura do sorgo.

A agressividade da palma forrageira sobre o sorgo ( $A_{ps}$ ) em todas as condições de consórcios foram mormente superiores e de caráter positivo, em detrimento da agressividade do sorgo sobre a palma ( $A_{sp}$ ) (Tabela 4). Esses resultados expressam quão relevante é a agressividade dos sistemas intercalados de palma-sorgo perante as condições expostas. Apesar dos resultados de  $A_{sp}$  apresentarem respostas negativas para a cultura do sorgo, esses valores são bem superiores aos reportados por Borghi et al. (2013), em que a cultura do sorgo não apresentou características dominantes também nos sistemas de consórcio com outras plantas forrageiras.

O tempo de exposição do consórcio é uma característica interessante para auxiliar nos ganhos de rendimento de biomassa das lavouras (Borghi et al., 2013). O índice de perda ou ganho atual de rendimento (PGAR), apresentado na Tabela 4, expressa se os sistemas consorciados tiveram vantagem ou desvantagem na sua utilização quando comparado com o sistema exclusivo.

Na perda ou ganho atual de rendimento da palma ( $PGAR_p$ ), ainda que não apresentado diferença significativa, pode-se afirmar que os rendimentos obtidos foram satisfatórios, com 236,12 a 506,70; sendo assim, os mesmos foram superiores a 1,0 e adotados como vantajosos em relação aos monocultivos, considerando-se que houve ganho de rendimento do consórcio. Para a cultura do sorgo, os valores de perda ou ganho atual de rendimento do sorgo ( $PGAR_s$ ) apresentaram diferença significativa ( $p <$

0,05), os mesmos também apresentaram valores superiores a 1,0. Observa-se que quando a cultura da palma apresentou ganhos elevados, houve um declínio nos ganhos do sorgo, porém, na PGAR apesar de não haver diferença significativa, os valores para todos os sistemas foram bem elevados.

Além disso, as vantagens dos sistemas consorciados que foram encontradas neste estudo podem estar atribuídas à melhor utilização dos recursos naturais presentes no ambiente, tornando-se um sistema de agricultura mais sustentável e ecológico. Estes resultados também estão corroborando com os achados dos demais índices citados anteriormente, validando assim, a eficiência e vantagem dos sistemas consorciados, como também concretizando com os resultados apresentados por Diniz et al. (2017).

#### **4. Conclusões**

A introdução do sistema consorciado palma-sorgo biossalino resultou em melhorias no rendimento de produção de massa fresca para o clone Orelha de Elefante Mexicana. O consórcio influenciou nos rendimentos de *Nopalea*, havendo compensação de produção proeminente do sorgo. Os rendimentos dos consórcios com clones de IPA Sertânia e Miúda proporcionaram elevada produção de massa seca. A agressividade do clone Orelha de Elefante Mexicana foi fator preponderante na redução do rendimento dos consórcios com as distintas cultivares de sorgo. Os índices de eficiência biológica e habilidade competitiva categorizaram como vantajoso o uso, apresentando-se promissores na consorciação destas culturas contribuindo na maximização dos rendimentos econômicos.

O consórcio da palma forrageira com sorgo não alterou as características qualitativas da forragem, sendo assim, o consórcio torna-se viável, tendo em vista a manutenção dos aspectos nutricionais apesar da competição interespecífica, favorecendo na alimentação de ruminantes. Em geral as configurações de cultivo Orelha de Elefante Mexicana e Miúda consorciadas com o sorgo 467 apresentaram as melhores performances, indicando sua utilização em ambientes hostis. Mais pesquisas são necessárias para examinar o desempenho das culturas em ambientes menos deficitários, e com outros espaçamentos e consórcios.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo do primeiro autor.

## 5. Referências

- Abidi, S., Ben Salem, H., Martín-García, A.I., Molina-Alcaide, E., 2009. Ruminant fermentation of spiny (*Opuntia amyclae*) and spineless (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) cactus cladodes and diets including cactus. *Anim. Feed Sci. Technol.* 149, 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2008.06.006>
- Abreu, K.S.F., Vêras, A.S.C., de Andrade Ferreira, M., Madruga, M.S., Maciel, M.I.S., Félix, S.C.R., Melo Vasco, A.C.C., Urbano, S.A., 2019. Quality of meat from sheep fed diets containing spineless cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck). *Meat Sci.* 148, 229–235. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2018.04.036>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists), 1990. Official methods of analysis of the association of official analytical chemists, 15th ed, Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013135>
- Baxevanos, D., Tsialtas, I.T., Vlachostergios, D.N., Hadjigeorgiou, I., Dordas, C., Lithourgidis, A., 2017. Cultivar competitiveness in pea-oat intercrops under Mediterranean conditions. *F. Crop. Res.* 214, 94–103. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2017.08.024>
- Bell, J.M., Schwartz, R., McInnes, K.J., Howell, T., Morgan, C.L.S., 2018. Deficit irrigation effects on yield and yield components of grain sorghum. *Agric. Water Manag.* 203, 289–296. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2018.03.002>
- Borghi, E., Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Sousa, V. V., Martins, P.O., Mateus, G.P., Costa, C., 2013. Sorghum grain yield, forage biomass production and revenue as affected by intercropping time. *Eur. J. Agron.* 51, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.006>
- Brooker, R.W., Bennett, A.E., Cong, W.F., Daniell, T.J., George, T.S., Hallett, P.D., Hawes, C., Iannetta, P.P.M., Jones, H.G., Karley, A.J., Li, L., McKenzie, B.M., Pakeman, R.J., Paterson, E., Schöb, C., Shen, J., Squire, G., Watson, C.A., Zhang, C., Zhang, F., Zhang, J., White, P.J., 2015. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytol.* 206, 107–117. <https://doi.org/10.1111/nph.13132>
- Chimonyo, V.G.P., Modi, A.T., Mabhaudhi, T., 2018. Sorghum radiation use efficiency

783 and biomass partitioning in intercrop systems. South African J. Bot. 118, 76–84.  
784 <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.06.009>

785 Chimonyo, V.G.P., Modi, A.T., Mabhaudhi, T., 2016. Water use and productivity of a  
786 sorghum–cowpea–bottle gourd intercrop system. Agric. Water Manag. 165, 82–96.  
787 <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2015.11.014>

788 Derak, M., Cortina, J., Taiqui, L., 2017. Integration of stakeholder choices and multi-  
789 criteria analysis to support land use planning in semiarid areas. Land use policy 64,  
790 414–428. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.03.006>

791 Diniz, W.J.S., Silva, T.G.F., Ferreira, J.M.S., Santos, D.C., Moura, M.S.B., Araújo,  
792 G.G.L., Zolnier, S., 2017. Forage cactus-sorghum intercropping at different  
793 irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. Pesqui. Agropecuária  
794 Bras. 52, 724–733. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000900004>

795 Dubeux Jr., J.C.B., Santos, M.V.F., Lira, M.A., Santos, D.C., Farias, I., Lima, L.E.,  
796 Ferreira, R.L.C., 2006. Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller under  
797 different N and P fertilization and plant population in north-east Brazil. J. Arid  
798 Environ. 67, 357–372. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2006.02.015>

799 Franco, J.G., King, S.R., Volder, A., 2018. Component crop physiology and water use  
800 efficiency in response to intercropping. Eur. J. Agron. 93, 27–39.  
801 <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.005>

802 Ghosh, P.K., 2004. Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal  
803 fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India. F. Crop. Res. 88,  
804 227–237. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2004.01.015>

805 Gimsing, A.L., Bælum, J., Dayan, F.E., Locke, M.A., Sejerø, L.H., Jacobsen, C.S.,  
806 2009. Mineralization of the allelochemical sorgoleone in soil. Chemosphere 76,  
807 1041–1047. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.04.048>

808 Gregory, R.A., Felker, P., 1992. Crude protein and phosphorus contents of eight  
809 contrasting *Opuntia* forage clones. J. Arid Environ. 22, 323–331.  
810 [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(18\)30574-3](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(18)30574-3)

811 Guevara, J.C., Yahia, E.M., Brito de la Fuente, E., Biserka, S.P., 2003. Effects of  
812 elevated concentrations of CO<sub>2</sub> in modified atmosphere packaging on the quality  
813 of prickly pear cactus stems (*Opuntia* spp.). Postharvest Biol. Technol. 29, 167–  
814 176. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(03\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(03)00021-8)

815 Habyarimana, E., Lorenzoni, C., Marudelli, M., Redaelli, R., Amaducci, S., 2016. A  
816 meta-analysis of bioenergy conversion relevant traits in sorghum landraces, lines  
817 and hybrids in the Mediterranean region. Ind. Crops Prod. 81, 100–109.  
818 <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2015.11.051>

819 Hernández-Urbiola, M.I., Pérez-Torrero, E., Rodríguez-García, M.E., Hernández-  
820 Urbiola, M.I., Pérez-Torrero, E., Rodríguez-García, M.E., 2011. Chemical Analysis  
821 of Nutritional Content of Prickly Pads (*Opuntia ficus indica*) at Varied Ages in an  
822 Organic Harvest. Int. J. Environ. Res. Public Health 8, 1287–1295.  
823 <https://doi.org/10.3390/ijerph8051287>

824 Jha, S., Srivastava, R., 2018. Impact of drought on vegetation carbon storage in arid and  
825 semi-arid regions. Remote Sens. Appl. Soc. Environ. 11, 22–29.  
826 <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.04.013>

- 827 Kimura, E., Fransen, S.C., Collins, H.P., Stanton, B.J., Himes, A., Smith, J., Guy, S.O.,  
828 Johnston, W.J., 2018. Effect of intercropping hybrid poplar and switchgrass on  
829 biomass yield, forage quality, and land use efficiency for bioenergy production.  
830 Biomass and Bioenergy 111, 31–38.  
831 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.01.011>
- 832 León-González, F., Ponce-Fuentes, M.H.F., Bautista-Cruz, A., Leyva-Pablo, T., Castillo-  
833 Juárez, H., Rodríguez-Sánchez, L.M., 2018. Cactus crop as an option to reduce soil  
834 C–CO<sub>2</sub> emissions in soils with declining fertility. Agron. Sustain. Dev. 38, 1–10.  
835 <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0481-3>
- 836 Lima, L.R., Silva, T.G.F., Jardim, A.M.R.F., Souza, C.A.A., Queiroz, M.G., Tabosa,  
837 J.N., 2018a. Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum  
838 intercropping under different water depths. Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.  
839 22, 113–118. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p113-118>
- 840 Lima, L.R., Silva, T.G.F., Pereira, P.C., Morais, J.E.F., Assis, M.C.S., 2018b. Productive  
841 economic benefit of forage cactus-sorghum intercropping systems irrigated with  
842 saline water. Rev. Caatinga 31, 191–201. [https://doi.org/10.1590/1983-](https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n122rc)  
843 [21252018v31n122rc](https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n122rc)
- 844 Lin, H.C., Hülsbergen, K.J., 2017. A new method for analyzing agricultural land-use  
845 efficiency, and its application in organic and conventional farming systems in  
846 southern Germany. Eur. J. Agron. 83, 15–27.  
847 <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.003>
- 848 Liu, X., Rahman, T., Song, C., Yang, F., Su, B., Cui, L., Bu, W., Yang, W., 2018.  
849 Relationships among light distribution, radiation use efficiency and land equivalent  
850 ratio in maize-soybean strip intercropping. F. Crop. Res. 224, 91–101.  
851 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.05.010>
- 852 Mbarki, S., Cerdà, A., Zivcakas, M., Brestic, M., Rabhi, M., Mezni, M., Jedidi, N.,  
853 Abdelly, C., Pascual, J.A., 2018. Alfalfa crops amended with MSW compost can  
854 compensate the effect of salty water irrigation depending on the soil texture.  
855 Process Saf. Environ. Prot. 115, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.09.001>
- 856 Méndez, L.P., Flores, F.T., Martín, J.D., Rodríguez Rodríguez, E.M., Díaz Romero, C.,  
857 2015. Physicochemical characterization of cactus pads from *Opuntia dillenii* and  
858 *Opuntia ficus indica*. Food Chem. 188, 393–398.  
859 <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2015.05.011>
- 860 Mostafa, H., El-Nady, R., Awad, M., El-Ansary, M., 2018. Drip irrigation management  
861 for wheat under clay soil in arid conditions. Ecol. Eng. 121, 35–43.  
862 <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2017.09.003>
- 863 Nelson, W.C.D., Hoffmann, M.P., Vadez, V., Roetter, R.P., Whitbread, A.M., 2018.  
864 Testing pearl millet and cowpea intercropping systems under high temperatures. F.  
865 Crop. Res. 217, 150–166. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.12.014>
- 866 Pereira, P.C., Silva, T.G.F., Zolnier, S., Morais, J.E.F., Santos, D.C., 2015. Morfogênese  
867 da palma forrageira irrigada por gotejamento. Rev. Caatinga 28, 184–195.  
868 <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n321rc>
- 869 Podda, L., Santo, A., Leone, C., Mayoral, O., Bacchetta, G., 2017. Seed germination,  
870 salt stress tolerance and seedling growth of *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae),

871 invasive species in the Mediterranean Basin. *Flora* 229, 50–57.  
872 <https://doi.org/10.1016/J.FLORA.2017.02.002>

873 Queiroz, M.G., Silva, T.G.F., Zolnier, S., Silva, S.M.S., Souza, C.A.A., Carvalho,  
874 H.F.S., 2016. Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em  
875 ambiente Semiárido Edição Esp, 141–154.  
876 <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p141-154>

877 R Core Team, 2019. A language and environment for statistical computing. R  
878 Foundation for Statistical Computing.

879 Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agricultural*  
880 *hand book* 60. U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.

881 Roby, M.C., Salas Fernandez, M.G., Heaton, E.A., Miguez, F.E., VanLoocke, A., 2017.  
882 Biomass sorghum and maize have similar water-use-efficiency under non-drought  
883 conditions in the rain-fed Midwest U.S. *Agric. For. Meteorol.* 247, 434–444.  
884 <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2017.08.019>

885 Rule, N.F., Hoffmann, J., 2018. The performance of *Dactylopius opuntiae* as a  
886 biological control agent on two invasive *Opuntia cactus* species in South Africa.  
887 *Biol. Control* 119, 7–11. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.01.001>

888 Sadeghpour, A., Jahanzad, E., Esmaeili, A., Hosseini, M.B., Hashemi, M., 2013. Forage  
889 yield, quality and economic benefit of intercropped barley and annual medic in  
890 semi-arid conditions: Additive series. *F. Crop. Res.* 148, 43–48.  
891 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.03.021>

892 Samarappuli, D., Berti, M.T., 2018. Intercropping forage sorghum with maize is a  
893 promising alternative to maize silage for biogas production. *J. Clean. Prod.* 194,  
894 515–524. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.083>

895 Santos, T.N., Dutra, E.D., Prado, A.G., Leite, F.C.B., Souza, R.F.R., Santos, D.C.,  
896 Abreu, C.A.M., Simões, D.A., Morais Jr, M.A., Menezes, R.S.C., 2016. Potential  
897 for biofuels from the biomass of prickly pear cladodes: Challenges for bioethanol  
898 and biogas production in dry areas. *Biomass and Bioenergy* 85, 215–222.  
899 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.005>

900 Scalisi, A., Morandi, B., Inglese, P., Lo Bianco, R., 2016. Cladode growth dynamics in  
901 *Opuntia ficus-indica* under drought. *Environ. Exp. Bot.* 122, 158–167.  
902 <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.10.003>

903 Shukla, S., Felderhoff, T.J., Saballos, A., Vermerris, W., 2017. The relationship between  
904 plant height and sugar accumulation in the stems of sweet sorghum (*Sorghum*  
905 *bicolor* (L.) Moench). *F. Crop. Res.* 203, 181–191.  
906 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.004>

907 Silva, T.G.F., Araújo Primo, J.T., Moura, M.S.B., Silva, S.M.S., Morais, J.E.F., Pereira,  
908 P.C., Souza, C.A.A., 2015. Soil water dynamics and evapotranspiration of forage  
909 cactus clones under rainfed conditions. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 50, 515–525.  
910 <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000700001>

911 Souza Filho, P.F., Ribeiro, V.T., Santos, E.S., Macedo, G.R., 2016. Simultaneous  
912 saccharification and fermentation of cactus pear biomass-evaluation of using  
913 different pretreatments. *Ind. Crops Prod.* 89, 425–433.  
914 <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.05.028>

- 915 Souza, M.V.F., Santos, M.V.F., Dubeux Júnior, J.C.B., Lira, M.A., Santos, D.C., Cunha,  
916 M. V., Lima, L.E., Silva, R.R., 2017. Productivity and nutrient concentration in  
917 spineless cactus under different fertilizations and plant densities. Rev. Bras.  
918 Ciências Agrárias 12, 555–560. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i4a5473>
- 919 Sun, T., Li, Z., Wu, Q., Sheng, T., Du, M., 2018. Effects of alfalfa intercropping on crop  
920 yield, water use efficiency, and overall economic benefit in the Corn Belt of  
921 Northeast China. F. Crop. Res. 216, 109–119.  
922 <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2017.11.007>
- 923 Van Soest, P.J., Robertson, J.B., Lewis, B.A., 1991. Methods for Dietary Fiber, Neutral  
924 Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. J.  
925 Dairy Sci. 74, 3583–3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- 926 Vlachostergios, D.N., Lithourgidis, A.S., Dordas, C.A., 2018. Agronomic, forage quality  
927 and economic advantages of red pea (*Lathyrus cicera* L.) intercropping with wheat  
928 and oat under low-input farming. Grass Forage Sci. 73, 777–788.  
929 <https://doi.org/10.1111/gfs.12348>
- 930 Vrignon-Brenas, S., Celette, F., Piquet-Pissaloux, A., Corre-Hellou, G., David, C., 2018.  
931 Intercropping strategies of white clover with organic wheat to improve the trade-  
932 off between wheat yield, protein content and the provision of ecological services  
933 by white clover. F. Crop. Res. 224, 160–169.  
934 <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2018.05.009>
- 935 Wakchaure, G.C., Minhas, P.S., Ratnakumar, P., Choudhary, R.L., 2016. Effect of plant  
936 bioregulators on growth, yield and water production functions of sorghum  
937 [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. Agric. Water Manag. 177, 138–145.  
938 <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2016.07.020>
- 939 Wannasek, L., Ortner, M., Amon, B., Amon, T., 2017. Sorghum, a sustainable feedstock  
940 for biogas production? Impact of climate, variety and harvesting time on maturity  
941 and biomass yield. Biomass and Bioenergy 106, 137–145.  
942 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.08.031>
- 943 Xiao, J., Yin, X., Ren, J., Zhang, M., Tang, L., Zheng, Y., 2018. Complementation  
944 drives higher growth rate and yield of wheat and saves nitrogen fertilizer in wheat  
945 and faba bean intercropping. F. Crop. Res. 221, 119–129.  
946 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.12.009>

947

### **CAPÍTULO 3 - Como a utilização dos sistemas de consórcio palma-sorgo causam impactos no crescimento da palma forrageira**

#### **Resumo**

Devido a demanda crescente de forragem, a aplicação de técnicas que visam melhorias nos sistemas produtivos é fundamental, visto que, a aplicação de curvas de crescimento de biomassa e conhecimentos fenológicos são de alta relevância. Assim, objetivou-se analisar os índices morfofisiológicos, a fenologia e o momento de corte de clones de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) consorciadas com *Sorghum* spp. O experimento foi conduzido em Serra Talhada-PE, Brasil, em um delineamento em blocos casualizados com quatro repetições e 12 tratamentos. Foram realizadas análises biométricas e de biomassa para quantificar os índices morfofisiológicos, fenologia e momento de corte, com auxílio de taxas de crescimento. A *Opuntia* apresentou taxa de crescimento absoluto (TCA) maiores no início do ciclo, em relação aos clones de *Nopalea*. As curvas de crescimento da IPA e Miúda apresentaram similaridade, porém, o clone Miúda tenha alcançado taxas de crescimento mais elevadas ( $0,0046 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{Cdia}^{-1}$ ). A taxa de crescimento relativo (TCR) foi maior em *Opuntia* consorciadas com 467 e SF11 ( $p < 0,05$ ), sendo duas vezes maiores ao sistema consorciado com 2502. Os sistemas com Miúda sobressaíram-se as configurações de cultivo com IPA. Em sistemas de cultivo exclusivo e consorciado com 2502, a taxa de assimilação líquida (TAL) para *Opuntia* foi superior a de *Nopalea*, entretanto, para a taxa de área do cladódio específica (TACE), os maiores valores foram do clone IPA ( $10,97 \text{ ha Mg}^{-1}$ ), sendo superior aos demais clones citados anteriormente. Ao longo do ciclo, a *Opuntia* apresentou maiores taxa de índice de área do cladódio (TIAC), seguido das maiores taxas detentora do clone IPA. Para as fases fenológicas o clone *Opuntia* apresentou fases menores de duração (média  $331 \text{ }^{\circ}\text{Cdia}$ ), seguido do clone IPA e Miúda ( $700$  e  $1.029 \text{ }^{\circ}\text{Cdia}$ , respectivamente), entretanto apenas o clone Miúda apresentou fase fenológica três. No momento de corte a *Opuntia* apresentou precocidade na realização do corte, seguido da Miúda e IPA. O uso de sistemas de consórcio palma-sorgo resultou em variações na dinâmica de crescimento da palma forrageira impactando no crescimento da mesma. Os sistemas de *Opuntia* com 467 e 2502, foram responsáveis pelos menores impactos negativos no crescimento da palma forrageira, recomendando-se a sua utilização.

Palavras-chave: taxas de crescimento; *Opuntia*; *Nopalea*; fenologia

## **How the use of the forage cactus-sorghum consortium systems causes impacts on forage cactus growth**

### **Abstract**

Due to the increasing demand of forage, the application of techniques that aim at improvements in the productive systems is fundamental, since the application of biomass growth curves and phenological knowledge are of high relevance. The objective of this study was to analyze the morphological and phylogenetic indexes and the cut-off time of forage cactus clones (*Opuntia* and *Nopalea*), which were intercropped with *Sorghum* spp. The experiment was conducted in Serra Talhada-PE, Brazil, in a randomized complete block design with four replicates and 12 treatments. Biometric and biomass analyses were performed to quantify morphophysiological indexes, phenology and cut-off, with the aid of growth rates. *Opuntia* presented higher absolute growth rate (TCA) at the beginning of the cycle, compared to the *Nopalea* clones. The growth curves of IPA and Miúda showed similarity, however, the clone Miúda showed higher growth rates ( $0.0046 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ °Cday}$ ). The relative growth rate (TCR) was higher in *Opuntia* with 467 and SF11 ( $p < 0.05$ ), being twice as large as the 2502 consortium system. In the exclusive cultivation and intercropping systems with 2502, the net assimilation rate (TAL) for *Opuntia* was higher than that of *Nopalea*. However, for the specific cladode area (TACE), the highest values were of the IPA clone ( $10.97 \text{ ha Mg}^{-1}$ ), being superior to the other clones previously mentioned. During the cycle, *Opuntia* presented higher rates of cladode area index (TIAC), followed by higher rates of IPA clone. For the phenological phases, the *Opuntia* clone showed smaller phases (average  $331 \text{ °Cday}$ ), followed by the clone IPA and Miúda (700 and 1,029  $\text{°Cday}$ , respectively), but only the clone Miúda showed phenological phase three. At the moment of cutting the *Opuntia* presented precocity in the accomplishment of the cut, followed by the Miúda and IPA. The use of forage cactus-sorghum consortium systems resulted in variations in the growth dynamics of the forage cactus, impacting its growth. The *Opuntia* systems with 467 and 2502 were responsible for the smallest negative impacts on forage cactus growth, recommending their use.

Keywords: growth rates; *Opuntia*; *Nopalea*; phenology

## 1. Introdução

A demanda crescente por forragem nos últimos anos e a escolha de culturas adaptadas tem sido uma questão bastante relatada para o desenvolvimento do setor agropecuário, visto que, melhorias nos sistemas de produção das áreas agrícolas são aplicadas com intuito de minimizar os impactos sofridos pelas plantas, e favorecer em rendimentos satisfatórios de forragem para os animais com o mínimo de danos ao meio ambiente (Ojeda et al., 2018).

Inibições e/ou estagnações do crescimento e desenvolvimento das culturas, é favorecido decorrente dos fatores bióticos e abióticos, influenciando em respostas insatisfatórias das mesmas nos ambientes estressores de cultivo, como também há competição interespecífica das culturas. Com intuito de quantificar as respostas de desempenho dos vegetais sob condições distintas de cultivo, o uso de modelos com taxas de curvas de crescimento de plantas (i.e., relativo, absoluto, assimilação líquida, e razão de área foliar), auxiliam nas elucidações de informações relevantes das mesmas sob condições hostis, favorecendo nas tomadas de decisões (Conesa et al., 2017).

Com auxílio dos dados biométricos e de biomassa da cultura, os modelos de taxas de crescimentos são confeccionados, assim, esboçando características fisiológicas e adaptativas das culturas, visto que, esse tipo de análise ainda apresenta lacunas na literatura para a palma forrageira. Apesar de tratar-se de uma cultura de relevante adaptação em ambientes deficitários e papel importante na produção de forragem, a palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.), vem crescendo no setor agropecuário principalmente pela mínima exigência hídrica e de insumos, e elevada eficiência no uso de água e carbono (Hassan et al., 2019).

Dentre as espécies de relevante adaptação a climas áridos e semiáridos, o sorgo (*Sorghum* spp.) também destaca-se no setor agropecuário decorrente da ampla capacidade produtiva, eficiência no uso de nutrientes, água e radiação e adequação de sistemas de cultivos consorciados (Chimonyo et al., 2018; Lima et al., 2018), proporcionando melhorias no setor produtivo. Apesar da consorciação ser uma técnica promissora, a sua utilização pode proporcionar competições interespecíficas e ocasionar modificações nos desenvolvimentos satisfatórios das mesmas (Chimonyo et al., 2018; Franco et al., 2018).

Entretanto, estudos com a utilização de sistemas múltiplos de consorciação com palma-sorgo e aplicações de modelos de crescimento e análise fenológica da palma forrageira são incipientes na literatura e majorados devido a importância da mesma no setor agropecuário, adotando-se a hipótese que mesmo com a competição interespecífica nos sistemas de cultivo, a cactácea alcançará performances satisfatórias quando consorciada com o sorgo.

Devido a isso, esclarecer os fatores inerentes aos sistemas de cultivo que afetam o desenvolvimento das plantas torna-se importante, para melhorar as técnicas de cultivo. Assim, objetivou-se analisar os índices morfofisiológicos, a fenologia e o momento de corte de clones de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) consorciadas com *Sorghum* spp.

## 2. Material e métodos

### 2.1. Descrição do local experimental

A condução do experimento foi realizada na Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST), município de Serra Talhada, PE, Brasil (7°56'20" S; 38°17'31" O e 499 m), em 18 de março de 2017 a 16 de junho de 2018 (totalizando 455 dias, ~15 meses). O clima da região é do tipo BSw<sup>h</sup> conforme a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), com precipitação pluvial média de 642,1 mm ano<sup>-1</sup> e demanda evapotranspirativa de 1.800 mm ano<sup>-1</sup>, acarretando em um déficit de 1.143 mm ano<sup>-1</sup> (Silva et al., 2015).

O tipo de solo da área experimental era do tipo Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico com relevo plano conforme a Tabela 1.

**Tabela 1.** Características físico-químicas do Cambissolo Háplico da área experimental na profundidade de 0,00 a 0,20 m.

| pH                                               | CE <sub>e</sub>    | P                   | Ca <sup>2+</sup>                   | Mg <sup>2+</sup> | H+Al | Na <sup>+</sup>    | K <sup>+</sup> | V     | C.O                |
|--------------------------------------------------|--------------------|---------------------|------------------------------------|------------------|------|--------------------|----------------|-------|--------------------|
|                                                  | dS m <sup>-1</sup> | mg dm <sup>-3</sup> | cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> |                  |      |                    |                | %     | g kg <sup>-1</sup> |
| 5,95                                             | 0,32               | 168,96              | 3,45                               | 1,90             | 0,6  | 1,09               | 13,8           | 97,15 | 4,6                |
| Características físicas do solo de 0,00 a 0,20 m |                    |                     |                                    |                  |      |                    |                |       |                    |
| Areia                                            |                    | Silte               |                                    | Argila           |      | Densidade do solo  |                |       |                    |
|                                                  |                    | g kg <sup>-1</sup>  |                                    |                  |      | g dm <sup>-3</sup> |                |       |                    |
| 828,6                                            |                    | 148,25              |                                    | 23,15            |      | 1,45               |                |       |                    |

pH em H<sub>2</sub>O a uma razão de 1:2,5 v/v; CE<sub>e</sub> - Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo; P - Extraído com a solução Mehlich-1; C.O. - Carbono orgânico.

### 2.2. Espécies estudadas e design experimental da área

Utilizou-se três clones de palma forrageira: IPA Sertânia [IPA] (*N. cochenillifera* (L.) Salm-Dyck), Miúda [Miu] (*N. cochenillifera* (L.) Salm-Dyck) e Orelha de Elefante Mexicana [OEM] (*O. stricta* (Haw.) Haw.), juntamente plantadas com três cultivares de sorgo (*S. bicolor* (L.) Moench): 467, SF11 e 2502. Realizou-se antes do plantio práticas de mecanização no solo (i.e., aração, gradagem e sulcagem). Em fevereiro de 2016, plantou-se os clones de palma forrageira, sendo os mesmos conduzidos até janeiro de 2017 em condições de sequeiro. Para uniformização das plantas efetuou-se o corte em março de 2017, mantendo-se os cladódios basais (i.e., cladódios mãe e 1ª ordem). Posteriormente efetuaram-se irrigações com base na evapotranspiração real da cultura (Queiroz et al., 2016). Os cladódios foram inseridos no solo, deixando 50% da extremidade inferior inserida no mesmo, espaçados em 1,0 x 0,2 m (50.000 plantas ha<sup>-1</sup>).

O semeio das cultivares de sorgo foram em março de 2017, em sulcos com 0,05 m de profundidade, distanciados a 0,25 m da palma forrageira (desbastando com 28 dias após a emergência das plântulas), 20 plantas por metro linear (200.000 plantas ha<sup>-1</sup>) foram deixadas. Foram conduzidos quatro ciclos produtivos consecutivos para a cultura do sorgo: sendo 120 dias após a emergência para todas as cultivares no primeiro ciclo (cortadas em julho de 2017); no segundo ciclo a cultivar 2502 com 71 dias após o corte (DAC), e as cultivares 467 e SF11 com 92 DAC. Já no terceiro ciclo o 2502 com 94 DAC, e as cultivares 467 e SF11 com 102 DAC; no quarto ciclo, foram 84 e 85 DAC, para 2502 e as cultivares 467 e SF11, respectivamente.

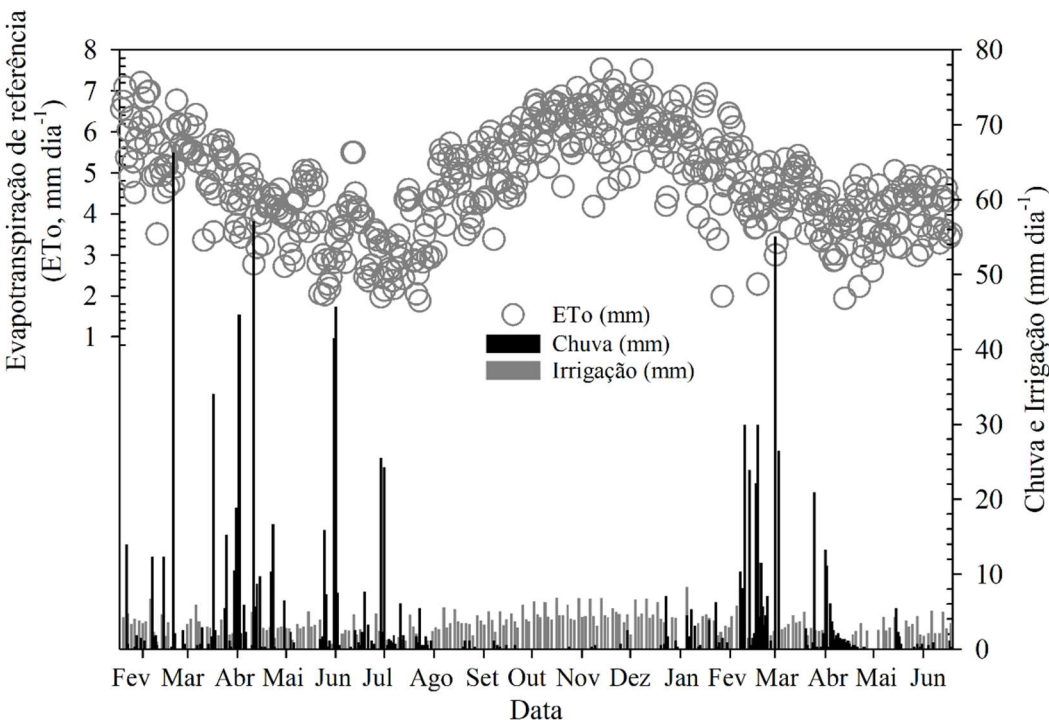
Aplicou-se durante a condução do experimento duas adubações minerais em toda a área, sendo a primeira em janeiro e a segunda em agosto de 2017 na formulação 14-00-18 + 16 S, aplicando-se 525 kg ha<sup>-1</sup> (73,5 kg N ha<sup>-1</sup>; 94,5 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> e 84 kg S ha<sup>-1</sup>) conforme Diniz et al. (2017). Todos os tratos culturais na área experimental foram realizados ao longo do desenvolvimento das culturas. Constatou-se uma elevada mortalidade dos clones de IPA (81,62% ± 1,45) e Miúda (71,68% ± 3,71) e OEM (8,56% ± 1,29) menos expressiva, decorrente de microrganismo fitopatogênicos presente no solo em toda área. Com a utilização da irrigação houve intensificação do ataque dos patógenos, decorrente da expressiva umidade do solo (Guevara et al., 2003).

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados (DBC), com 12 tratamentos, sendo três clones de palma forrageira em sistema exclusivo; e nove sistemas consorciados a partir do número máximo de combinações entre os clones de palma forrageira e as cultivares de sorgo. Os tratamentos foram constituídos por quatro

parcelas, totalizando 48 unidades experimentais, em que foram compostas por quatro fileiras (com 25 plantas da cactácea), totalizando uma área de 60 m<sup>2</sup>. A parcela útil foi composta pelas duas fileiras centrais, com 46 plantas úteis (i.e., sendo desprezadas quatro plantas das extremidades), totalizando uma área útil de 16,4 m<sup>2</sup>.

A irrigação foi realizada por meio de um sistema de gotejamento com vazão 1,75 ± 0,14 L h<sup>-1</sup>, a uma pressão de serviço de 101,32 kPa, utilizando-se água proveniente de um poço artesiano, localizado próximo à área experimental, com condutividade elétrica média de 1,51 dS m<sup>-1</sup> (classificada como C3) de acordo com Richards (1954); pH = 6,84; Na<sup>+</sup> = 168,66 mg L<sup>-1</sup> e K<sup>+</sup> = 28,17 mg L<sup>-1</sup>. A reposição hídrica das culturas foi com base na exigência hídrica da cultura da palma forrageira (i.e., por ser a cultura principal), utilizando coeficiente de cultura (Kc) de 0,52 (Queiroz et al., 2016).

A coleta de dados meteorológicos (Figura 1) foram realizadas diariamente de uma estação meteorológica automática, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia. Para a determinação da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) utilizou-se o método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) para a reposição hídrica das culturas.



**Figura 1.** Monitoramento das condições ambientais e disponibilidade hídrica via irrigação durante o período experimental (fevereiro de 2017 a junho de 2018) para o município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil.

As chuvas durante o período experimental concentraram-se nos meses de fevereiro a julho em 2017 e, fevereiro a maio de 2018, totalizando 997 mm. Nos períodos de agosto a janeiro compreenderam os meses de estiagem. A suplementação de água por irrigação totalizou 623,21 mm (1,4 mm dia<sup>-1</sup>). Em média a ETo foi de 4,71 mm dia<sup>-1</sup> durante o período experimental (i.e., com máxima de 7,53 mm dia<sup>-1</sup> e mínima de 0,40 mm dia<sup>-1</sup>), totalizando uma demanda atmosférica de 2.431,32 mm durante ~15 meses.

### 2.3. Avaliação do crescimento e fenologia da palma forrageira

Mensalmente foram realizadas medidas biométricas nas plantas de palma forrageira e a cada 90 dias foram realizadas análises de biomassa, com intuito de quantificar taxa morfogênica, índices morfofisiológicos e o momento de corte.

As medidas foram realizadas em duas plantas por parcela, onde foram registrados os valores de altura da planta (cm), para a qual se considerou a distância vertical entre a inserção da planta no solo e sua extremidade superior e, a largura do dossel das plantas (cm), distância entre as laterais da planta com auxílio de uma fita métrica; número de cladódios por planta (unidades) nas respectivas ordens de inserção na planta; comprimento (cm), medindo-se de uma extremidade vertical a outra do cladódio, largura (cm) e espessura dos cladódios (mm), realizada no terço médio do cladódio, perímetro (cm), área do cladódio (m<sup>2</sup>), índice de área do cladódio (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>) e biomassa verde e seca total (Mg ha<sup>-1</sup>).

No cálculo do índice de área do cladódio (IAC, m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>), adotou-se o método não destrutivo, através de modelos matemáticos propostos por Pinheiro et al. (2014), conforme a Equação 1. Para a determinação do mesmo, calculou-se também a área do cladódio (AC, m<sup>2</sup>), conforme Silva et al. (2014).

$$IAC = \left[ \sum_{n=1}^i (AC) / \frac{10000}{(E1 \cdot E2)} \right] \quad (1)$$

em que, IAC - índice de área do cladódio observado (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>); AC - área do cladódio (m<sup>2</sup>); 10.000 corresponde ao fator de correção de cm<sup>2</sup> em m<sup>2</sup>; e E1 · E2 - corresponde ao

espaçamento entre fileiras (i.e., no presente trabalho utilizou-se 1,0 x 0,2 m, respectivamente).

Os clones de palma forrageira tiveram sua biomassa verde e seca total (Mg ha<sup>-1</sup>) mensuradas a partir de subamostragens em diferentes datas de uma planta. Na ocasião da colheita considerou-se as plantas pertencentes à parcela útil, de modo que as mesmas, uma vez pesadas (i.e., para obtenção do peso fresco) com auxílio de uma balança eletrônica, foram fragmentadas e posteriormente acondicionadas em sacos de papel. Após a identificação das mesmas levou-se para uma estufa de ventilação forçada de ar a 65 °C, até obtenção de peso seco constante (biomassa seca) (Sadeghpour et al., 2013). Em campo no momento da colheita, mantiveram-se os cladódios basais e os de primeira ordem na planta.

Por meio dos dados de biomassa seca e biometria foram calculadas para a palma forrageira as taxas morfogênicas e os índices morfofisiológicos, ajustando-se modelos matemáticos, utilizando como variável independente os graus-dia acumulados, conforme a Equação 2, proposta por Arnold (1959).

$$GD = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(T_m + T_{mín})}{2} - T_b \right] \quad (2)$$

onde, GD - graus-dia (°C); T<sub>m</sub> - temperatura do ar máxima diária (°C); T<sub>mín</sub> - temperatura do ar mínima diária (°C); e T<sub>b</sub> - temperatura base inferior (°C). A temperatura base inferior utilizada foi de 22 °C, conforme análises previamente realizadas.

Posteriormente, os modelos de ‘regressão sigmoidal de três parâmetros’ foram derivados para determinação das taxas morfogênicas (Equações 3 e 4, respectivamente). Para os índices morfofisiológicos utilizaram-se os dados de biomassa seca total da parte aérea e índice de área do cladódio, para obtenção das: taxa de crescimento absoluto (TCA, Mg ha<sup>-1</sup> °Cdia<sup>-1</sup>), taxa de crescimento relativo (TCR, Mg Mg<sup>-1</sup> °Cdia<sup>-1</sup>), e da taxa de assimilação líquida (TAL, Mg ha<sup>-1</sup> °Cdia<sup>-1</sup>), taxa de área do cladódio específica (TACE, ha Mg<sup>-1</sup>) e a taxa de índice de área do cladódio (TIAC, ha ha<sup>-1</sup> °Cdia<sup>-1</sup>).

$$y = \frac{a}{\left(1 + e^{\left(\frac{-(x-x_0)}{b}\right)}\right)} \quad (3)$$

246

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\left(a \cdot e^{\left(\frac{-(x-x_0)}{b}\right)}\right)}{\left([1 + e^{\left(\frac{-(x-x_0)}{b}\right)}]^2 \cdot b\right)} \quad (4)$$

248

249 em que,  $y$  - variável resposta;  $a$  - valor máximo da taxa (distância entre as duas  
250 assíntotas);  $x$  - graus dias acumulado;  $x_0$  - número de graus dias necessários pela planta  
251 para expressar 50% do máximo da taxa (ponto de inflexão da curva); e  $b$  - número de  
252 graus dias necessários para o início da taxa.

253

254 As equações utilizadas para a estimativa dos valores de TCA, TCR, TAL, TACE,  
255 TIAC da palma forrageira foram avaliadas ao longo do tempo, conforme as  
256 metodologias adaptadas de Hunt (1982), Shipley (2006) e Ramírez-Valiente et al.  
257 (2017), de modo a se estabelecer os limites da fase fenológica vegetativa (i.e., 25% da  
258 taxa máxima de emissão de cladódios nas respectivas ordens) e o momento de corte  
259 (i.e., referente a 25% da máxima taxa de massa seca da palma forrageira durante o  
260 ciclo), com base na transição da evolução do crescimento da cultura.

261

#### 262 2.4. *Análise estatística*

263

264 Os dados das taxas de crescimento da palma forrageira foram comparados entre  
265 os sistemas de consórcios utilizados, expressos em ajustes de curvas sigmoidais. Os  
266 mesmos foram submetidos aos testes de normalidade, homocedasticidade, e análise de  
267 variância pelo teste F ( $p < 0,05$ ). Quando significativa, as médias foram comparadas  
268 entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Todas as análises  
269 estatísticas foram realizadas utilizando o programa R (R Core Team, 2019).

270

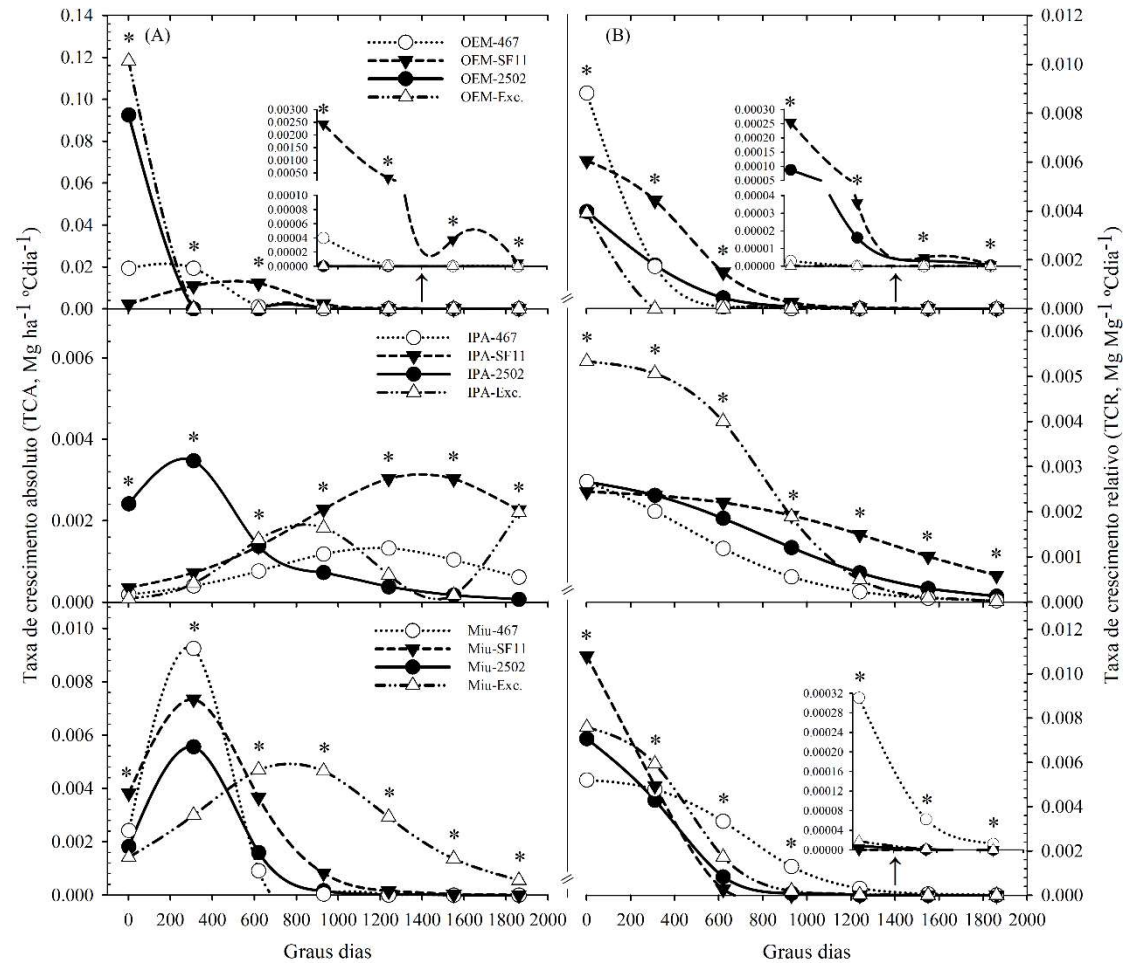
### 271 3. Resultados e discussão

#### 272 3.1. *Análise de crescimento das culturas*

273

274 Na Figura 2A e 2B, verifica-se o comportamento das taxas de crescimento  
275 absoluto (TCA) e a taxa de crescimento relativo (TCR), respectivamente, durante o

ciclo dos clones da palma forrageira consorciada com as cultivares de sorgo, como também as cactáceas em sistemas de cultivo exclusivo.



**Figura 2.** (A) Taxa de crescimento absoluto ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{Cdia}^{-1}$ ) e (B) taxa de crescimento relativo ( $\text{Mg Mg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{Cdia}^{-1}$ ) de três clones de palma forrageira (OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda) irrigados sob sistema consorciado e exclusivo (Exc.) com três cultivares de sorgo (467, SF11 e 2502). Os pontos representam os valores médios das quatro repetições entre os sistemas de cultivo; \* - Diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Diante dos comportamentos expressos das culturas nos distintos sistemas de cultivo, observa-se relevantes diferenças entre as mesmas. A palma forrageira do gênero *Opuntia* apresentou acúmulo de biomassa mais expressivos no início do ciclo. Os sistemas de cultivo com maiores acumulações iniciais foram o exclusivo e o consorciado com cultivar de sorgo 2502, que obtiveram resultados de  $0,118 \text{ Mg ha}^{-1}$

285 °Cdia<sup>-1</sup> e 0,092 Mg ha<sup>-1</sup> °Cdia<sup>-1</sup>, respectivamente, logo no início da acumulação da soma  
286 térmica. Esse tipo de comportamento específico no período inicial para esses dois  
287 sistemas de cultivo, podem estar relacionados a agressividade deste clone. A espécie  
288 quando submetida ao monocultivo, não padecerá por competições interespecíficas,  
289 podendo exibir sua capacidade máxima de acúmulo de biomassa e, assim, aprimorar o  
290 aproveitamento do nicho ecológico.

291 Por tratar-se de uma cultivar de sorgo (i.e., 2502) com porte inferior aos demais  
292 utilizados, o clone OEM, nesta condição, mesmo havendo uma competição  
293 interespecífica, os resultados da TCA foram elevados (0,092 Mg ha<sup>-1</sup> °Cdia<sup>-1</sup>) ( $p < 0,05$ ).  
294 De acordo com Ramírez-Valiente et al. (2017), espécies adaptadas a climas xerófilos  
295 exprimem taxas de crescimento superiores quando expostas a ambientes favoráveis e, os  
296 cactos do gênero *Opuntia* quando submetidos a irrigação apresentam melhor adaptação  
297 e plasticidade no metabolismo fotossintético (i.e., CAM facultativa) expressando assim  
298 crescimento mais acelerado e adequada performance em ambientes hostis (Winter et al.,  
299 2008).

300 Os sistemas de consórcio OEM-467 e com SF11 apresentaram TCA inferiores  
301 aos sistemas citados anteriormente ( $p < 0,05$ ). Para o consórcio com 467, os valores  
302 máximos foram de 0,019 Mg ha<sup>-1</sup> °Cdia<sup>-1</sup>, até atingir uma soma térmica de 310 °Cdia, e  
303 a configuração com a gramínea SF11 atingindo máximas de 0,012 Mg ha<sup>-1</sup> °Cdia<sup>-1</sup> em  
304 310 °Cdia e, mantendo-se até 620 °Cdia. E se tratando de cultivares de sorgo  
305 fenotipicamente bem semelhantes, pode-se adquirir como causa desse tipo de resposta  
306 na similaridade dos resultados. Os achados do presente estudo são superiores aos  
307 repostados por Queiroz et al. (2015) com adoção de lâminas de irrigação para o clone  
308 Orelha de Elefante Mexicana, aos 380 DAC, submetidas a condições semiáridas.

309 Na utilização de sistemas consorciados com o gênero *Nopalea*, apesar dos clones  
310 serem do mesmo grupo taxonômico, houve variações nos comportamentos das mesmas  
311 em função dos consórcios com as cultivares de sorgo ( $p < 0,05$ ). Entretanto, em ambas  
312 condições de sistema exclusivo, os clones IPA e Miúda, apresentaram similaridades nas  
313 sinuosidades das curvas de crescimento ao longo do tempo. Embora que, o clone Miúda  
314 tenha alcançado taxas de crescimento mais elevadas (0,0046 Mg ha<sup>-1</sup> °Cdia<sup>-1</sup>) em  
315 comparação com a IPA, em um mesmo intervalo de graus dia; chegando a ser quatro  
316 vezes superior à cactácea IPA.

317 Em condições de consórcio para os clones citados acima, a maior TCA obtida no  
318 clone IPA, foi para a consorciação do sorgo 2502 (0,0034 Mg ha<sup>-1</sup> °Cdia<sup>-1</sup>). Já para o

clone Miúda, as taxas foram mais elevadas nos consórcios com 467, SF11 e 2502 ( $p < 0,05$ ), atingindo valores de 0,0092, 0,0073 e 0,0055  $\text{Mg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{Cdia}^{-1}$ , respectivamente. Talvez em resposta da competição por fatores ambientais, um prognóstico ao comportamento desse clone, deva-se a capacidade de expressar inicialmente a sua TCA elevada, com intuito de maior acúmulo de biomassa. Essas variações de taxa podem estar relacionadas as características peculiares dos clones; mesmo apresentando metabolismo fotossintético iguais e serem da mesma família, particularidades morfológicas (e.g., tamanho de cladódios, área de cladódios) e utilização de recursos, são características fundamentais observadas na literatura (Müller et al., 2018).

Um traço de crescimento marcante das espécies é a taxa de crescimento relativo (TCR), bastante utilizada para explicar a variação da TCA (Müller et al., 2018). Na Figura 3B, observa-se que as taxas de crescimento relativo entre os clones de palma forrageira, em suas devidas configurações de cultivo, também apresentaram variações distintas.

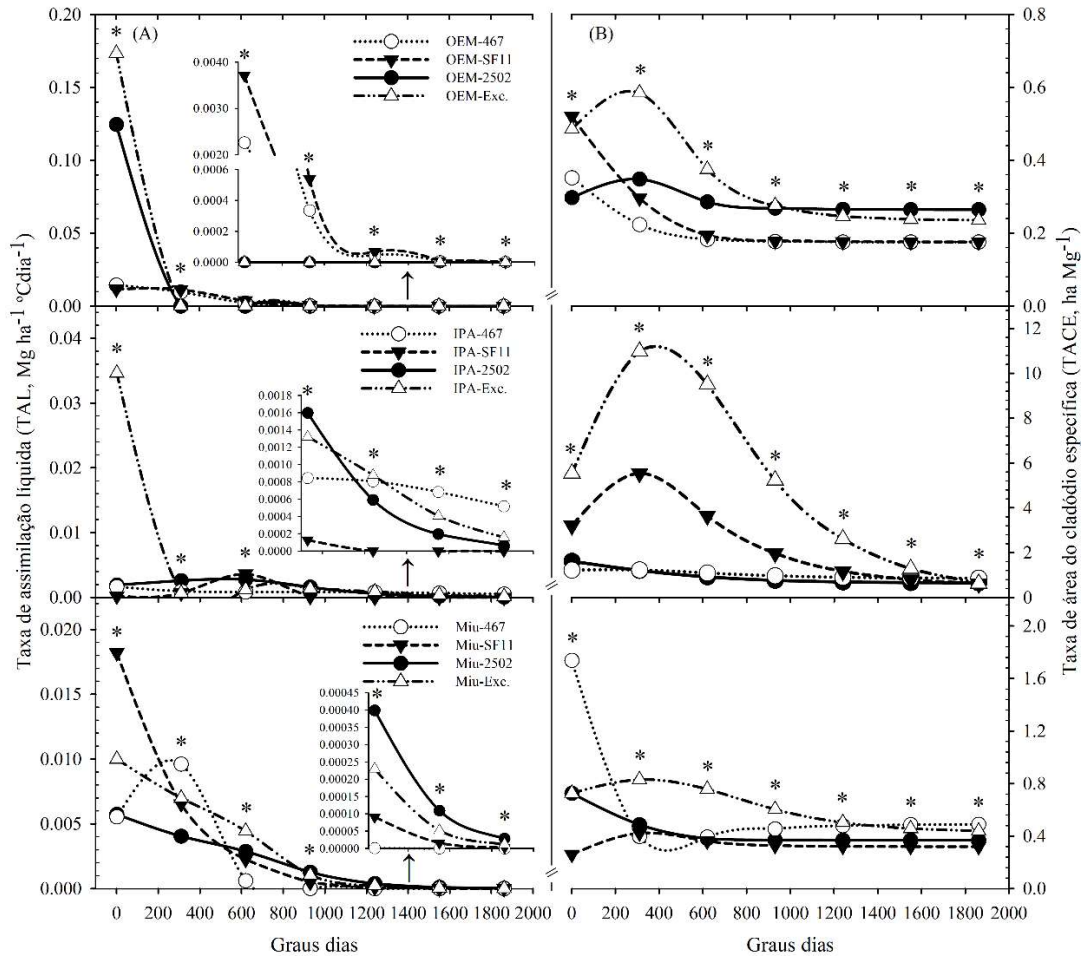
Nas configurações de cultivo com o clone OEM, as maiores TCR foram observadas na junção com 467 e SF11 ( $p < 0,05$ ), sendo 0,0088 e 0,0060  $\text{Mg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{Cdia}^{-1}$ , respectivamente. Esses resultados são em média duas vezes maiores que as configurações com a cultivar 2502 e o sistema exclusivo. Assim, entende-se que quando consorciados com sorgo de porte mais alto (i.e., 467 e SF11), o clone OEM apresenta um crescimento inicial mais acelerado, como também maior capacidade de produção de matéria seca por unidade de tempo, quando relacionado à massa obtida inicialmente da cultura.

Em sistemas configurados com clones de *Nopalea*, observa-se que o crescimento inicial também apresenta uma característica mais acentuada, sendo que o clone Miúda apresentou valores superiores quando comparados com a IPA. Nos três clones, aos 600  $^{\circ}\text{Cdia}$  houve um declínio brusco na TCR. Entretanto, o clone IPA, esboçou declínios menos acentuados após a referida soma térmica. Por ser um cacto que possui cladódios grandes e alongados, e, com hábito de crescimento mais ereto, acredita-se que o tardiamiento desse declínio seja decorrente desses atributos morfológicos.

A TCR é atribuída às características morfológicas das plantas (e.g., fração de massa foliar, área foliar, altura), sendo assim, podem ocorrer variações entre espécies, e com a idade das mesmas. Ao decorrer do ciclo, com o crescimento da cultura e o auto-sombreamento, a TCR torna-se reduzida e ocorre uma alocação de fotoassimilados para outras estruturas das plantas, como hastes que ainda estão em desenvolvimento (Müller

et al., 2018; Vasseur et al., 2018), favorecendo no entendimento dos índices morfofisiológicos dessa cactácea (Queiroz et al., 2015).

Na Figura 3A e 3B são apresentadas as taxas de assimilação líquida (TAL) e a taxa de área do cladódio específica (TACE) para os três clones de palma forrageira submetidas aos consórcios com três cultivares de sorgo, mais as condições exclusivas.



**Figura 3.** (A) Taxa de assimilação líquida ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ } ^\circ\text{Cdia}^{-1}$ ) e (B) taxa de área do cladódio específica ( $\text{ha Mg}^{-1}$ ) de três clones de palma forrageira (OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda) irrigados sob sistema consorciado e exclusivo (Exc.) com três cultivares de sorgo (467, SF11 e 2502). Os pontos representam os valores médios das quatro repetições entre os sistemas de cultivo; \* - Diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os sistemas de plantio do clone OEM sob as condições exclusiva e, consorciada com a gramínea 2502 apresentaram os maiores valores de TAL (0,173 e 0,124  $\text{Mg ha}^{-1}$

°Cdia<sup>-1</sup>, respectivamente) entre os sistemas de cultivo, como também comparados com os demais clones do gênero *Nopalea*. Entre os cactos de IPA e Miúda, para a primeira o sistema de plantio que apresentou maior TAL, foi o exclusivo; e para a segunda, foram Miúda-SF11, seguida do sistema exclusivo (Figura 3A).

A TAL exprime o ganho de carbono de uma espécie através da fotossíntese líquida, ou seja, o quanto a mesma pode incrementar de massa seca por unidade de área foliar no tempo (Huber et al., 2018). Devido a isso, em decorrência do clone IPA apresentar espessura de cladódios mais protuberante em relação aos demais clones, acarreta-se em um efeito *trade-off*, em que, apesar da mesma favorecer em um melhor armazenamento de água em seus compartimentos, devido à baixa relação superfície:volume e o excesso de estruturas parenquimáticas, acabam ocasionando uma diminuição da taxa fotossintética (Herce et al., 2014). Em consonância a isso, o sombreamento do dossel das gramíneas diminui de maneira acentuada a interceptação e energia luminosa, proporcionando declínio e/ou menor TAL.

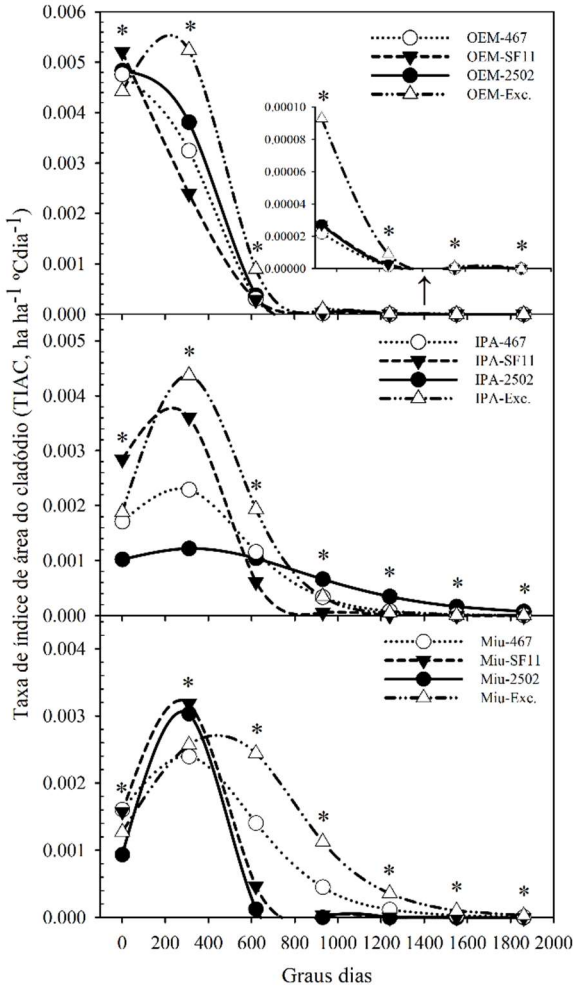
As taxas de assimilação líquida podem ser comprometidas, a depender do posicionamento que os cladódios estejam inseridos na planta, como também na opacidade da superfície, devido a tonalidade e bloqueamento físico dos raios solares. Essas diminuições de energia luminosa afetam negativamente no fluxo de fotoassimilados em cactos do gênero *Opuntia* e *Nopalea* (Nobel and Zutta, 2008).

Os clones OEM e Miúda foram detentores das menores taxas de área do cladódio específica, quando comparado com a IPA (Figura 4B). A IPA apresentou TACE na ordem 10,97 ha Mg<sup>-1</sup>, para o sistema exclusivo, seguido do consórcio com SF11, apresentando 5,54 ha Mg<sup>-1</sup>, ambas com 310 °Cdia, uma diferença de 50,5%. Os resultados para os consórcios com as demais gramíneas foram bem inferiores (~10 vezes menor). Isso foi observado devido a menor TAL, demonstrando que houve um menor aproveitamento fotossintético deste clone principalmente em consórcio. Tais constatações também foram reportadas por Queiroz et al. (2015) em clones de palma forrageira sob cultivo exclusivo e irrigado, em ambiente semiárido. Sendo esse comportamento devido ao auto-sombreamento dos cladódios da espécie.

A diminuição da área foliar específica, que para a palma forrageira seria a área do cladódio específica (Queiroz et al., 2015), em estudos realizados por Ojeda-Pérez et al. (2017) utilizando cactos do gênero *Opuntia*, observaram que os declínios dessa taxa podem estar relacionados a maiores perdas de água dos cladódios ou reservas constituídas no mesmo, devido a realocação de açúcares ou inibição de crescimento.

Como o clone de palma OEM apresentam cladódios menos espessos, isso justifica a mesma apresentar uma TACE menor em relação aos demais clones (Figura 4B).

Na Figura 4, são apresentados os resultados da taxa de índice de área do cladódio (TIAC), para os clones de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) sob as condições de consórcio e exclusivo.



**Figura 4.** Taxa de índice de área do cladódio (ha ha<sup>-1</sup> °Cdia<sup>-1</sup>) de três clones de palma forrageira (OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda) irrigados sob sistema consorciado e exclusivo (Exc.) com três cultivares de sorgo (467, SF11 e 2502). Os pontos representam os valores médios das quatro repetições entre os sistemas de cultivo; \* - Diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

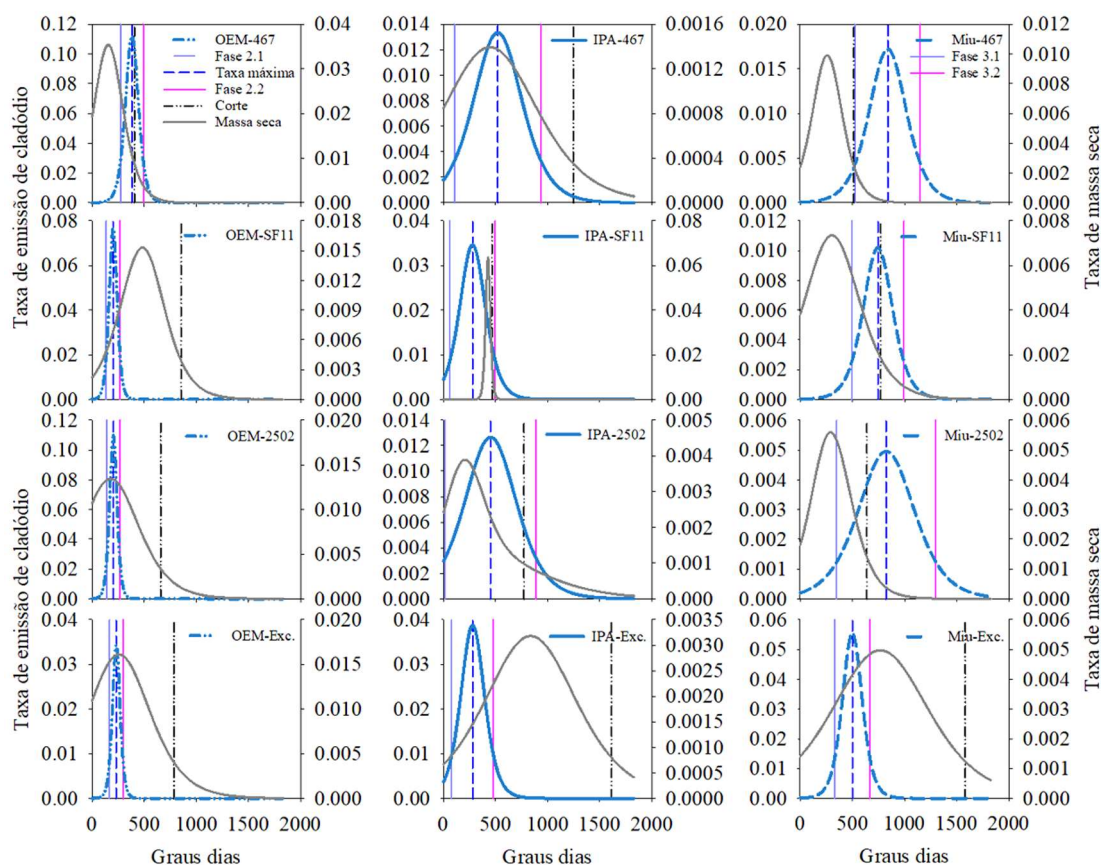
Observa-se que o clone OEM esboçou as maiores taxas, tanto ao início do ciclo, como no decorrer do mesmo (i.e., 0,0044 a 0,0052 ha ha<sup>-1</sup> °Cdia<sup>-1</sup>), no entanto, o declínio dessa taxa ao final do ciclo é uma característica biológica frequente das

espécies vegetais. Os sistemas de consórcios influenciaram diretamente nas taxas dos clones em questão, sendo os sistemas exclusivos com taxas superiores e com declínios suavizados ao longo do tempo. Para os clones do gênero *Nopalea*, a IPA sobressaiu-se em relação a Miúda, sendo que, em ambos os clones, os consórcios influenciaram diretamente no desenvolvimento do índice de área do cladódio, entretanto, a Miúda apresentou declínios de TIAC menos acentuados quando comparados com a IPA, fenômeno esse decorrente do número e missão de cladódios do clone Miúda.

Corroborando com esses resultados, Silva et al. (2014) estudando os mesmos clones de palma forrageira (i.e., OEM, IPA e Miúda), em ambiente similar, obtiveram comportamentos análogos ao do presente estudo. Isso está interligado em decorrência da morfologia de cada clone, onde, os índices produtivos ainda conforme os autores, podem ser correlacionados e influenciados por essa variável, conferindo assim, maiores rendimentos para o clone OEM em sistema exclusivo.

### 3.2. Fenofase e momento de corte da palma forrageira

Na Figura 5, verifica-se o comportamento das taxas de emissão de cladódios da palma forrageira em sistema de cultivo exclusivo e consorciado; juntamente da taxa de massa seca e momento de corte.



**Figura 5.** Determinação da fenofase vegetativa e momento de corte com base na taxa de massa seca de clones de palma forrageira (OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda) em sistemas de cultivo exclusivo (Exc.) e consorciado com cultivares de sorgo (467, SF11 e 2502).

Em geral o clone OEM apresentou a fase fenológica para cladódios de segunda ordem mais curta, para ambos os sistemas (i.e., consorciados e exclusivo). A duração média da fase para OEM foi de 331 °Cdia. A configuração de cultivo OEM-467 proporcionou maior duração da fase dois para a palma forrageira, sendo os demais sistemas com a mesma tendência de duração da fase. O prolongamento ou precocidade da fase fenológica pode estar relacionado a competição interespecífica por luz, água e nutrientes. A interação entre espécies pode influenciar na variação de energia luminosa no sistema, ocasionando modificações no tempo de início e duração das fases fenológicas (Motsa et al., 2017), visto que, as espécies de cactos possuem variações em exigências térmica e hídrica, alterando sua fenologia (Gomes et al., 2019).

O clone OEM apresentou em média apenas os cladódios de segunda ordem para caracterização da fenofase (i.e., fase dois). Diversos estudos na literatura reportam que as maiores contribuições numéricas e de biomassa dos cladódios estão nesta ordem para

o clone enfatizado (Amorim et al., 2017; Pinheiro et al., 2014). Utilizando o clone OEM em sistema de cultivo irrigado, Amorim et al. (2017) obtiveram duração máxima entre os tratamentos para a fenofase dois de aproximadamente 6,3 meses.

O tempo de duração da fenofase dois para o clone IPA foi superior aos da OEM, com média de 700 °Cdia. Os sistemas com maior duração da fase dois, foram IPA-467 e IPA-2502 (934 e 889 °Cdia, respectivamente). Já para o clone Miúda, o mesmo foi o único que apresentou fase fenológica para cladódios de terceira ordem (i.e., fase três), com duração média de 1.029 °Cdia, tornando-se a fase mais prolongada entre os clones. Tal prolongamento está relacionado a maior exigência de soma térmica da cultura para finalização da fase fenológica. Os sistemas detentores de maior duração fenológica foi Miu-467 e Miu-2502 (1.153 e 1.301 °Cdia, respectivamente).

Variações de crescimento das culturas em sistemas distintos de cultivo também foram mencionados por Amorim et al. (2017), sendo de fundamental importância o conhecimento dos estágios fenológicos para tomadas de decisões como adubações, tratos culturais e, o momento de colheita das mesmas. Em cactos de *Opuntia*, a idade das plantas podem ser determinadas pelo tamanho da planta, e/ou número de cladódios da mesma (Bowers, 1996), como também o acúmulo de biomassa dos cladódios são dependentes das condições ambientais e fluxo de carboidratos dos cladódios basais (López-García et al., 2016).

A utilização de sorgo como cultura secundária em sistemas consorciados impactou diretamente na fenologia da palma forrageira. A utilização de modelos matemáticos para determinação de curvas de crescimento, momento de colheita e, fases fenológicas são alternativas que auxiliam na condução das culturas, como também, contribui em maior segurança alimentar e garantia de safras em diversas condições ambientes (Perondi et al., 2019).

O clone OEM apresentou média de 676 °Cdia para a determinação do momento de corte (Figura 5). O sistema de cultivo com a menor soma térmica para o momento de corte foi OEM-467, seguido do sistema OEM-2502 (405 e 658 °Cdia, respectivamente), ambos os sistemas apresentaram elevadas taxas de massa seca. Dentre os sistemas consorciados, a OEM-SF11 apresentou maior soma térmica (855 °Cdia), acarretando em um momento de corte mais tardio, tornando a cultura mais suscetível a fatores bióticos e abióticos devido ao tempo de exposição no campo. O sistema exclusivo apresentou 786 °Cdia para o corte, sendo uma soma térmica intermediária aos consórcios.

As condições ambientais e os fatores genéticos das culturas são fundamentais para o entendimento das performances fenológicas das mesmas, alterando suas taxas de crescimento e demanda de insumos (McMaster et al., 2011), sendo que, um fator crucial na alteração do momento de corte foi a configuração de cultivo para todos os sistemas, visto a influência do consórcio. Devido as espécies, no presente estudo, não apresentarem fase fenológica reprodutiva, a ausência de florescimento auxiliou na manutenção exclusiva de fotoassimilados para as estruturas vegetativas, favorecendo o máximo desempenho dos cladódios (Bowers, 1996).

O clone IPA apresentou em média o maior momento de corte entre as cactáceas, correspondendo 1.025,75 °Cdia, seguido do clone Miúda com 878,25 °Cdia. Apesar de tratarem-se de indivíduos da mesma espécie, houve variação entre os clones (i.e., diferença de 147,5 °Cdia), variação essa maior decorrente dos consórcios. Observa-se que os clones IPA e Miúda em sistemas de cultivo exclusivo obtiveram similaridade na soma térmica para o momento de corte (1.614 e 1.584 °Cdia, respectivamente). Dentre os sistemas consorciados, a IPA-467 obteve 1.249 °Cdia, sendo tardio o corte para esse sistema, os sistemas com IPA-SF11 e IPA-2502, apresentaram 467 e 773 °Cdia, respectivamente.

Em sistemas de cultivo consorciados, o clone Miúda apresentou média de 643 °Cdia, sendo o mais curto momento de corte referente a configuração Miu-467 (514 °Cdia), seguidos da Miu-2502 e Miu-SF11 (641 e 774 °Cdia, respectivamente). Em sistemas de cultivos com disponibilidade hídrica para as culturas, a acumulação de biomassa é elevada e a assimilação de carbono é maximizada, quando comparados com ambientes de restrição hídrica, tornando o acúmulo de biomassa menor. De acordo com Cruz and Pavón (2013), os cactos mesmo apresentando estruturas de armazenamento de água de alta eficiência, quando submetidos a sazonalidade hídrica diminuem a fase vegetativa. Como no presente estudo a palma foi irrigada, o prolongamento desta fase foi mais acentuado, principalmente para a Miúda, decorrente de condições favoráveis, emitindo cladódios de terceira ordem, tornando-se mais tardio o momento de corte.

#### **4. Conclusões**

O uso de sistemas de consórcio palma-sorgo resultou em variações na dinâmica de crescimento da palma forrageira impactando no crescimento da mesma. A utilização de sorgo como cultura consorte causa declínios expressivos nas taxas de crescimento

após 300 °Cdia. Os clones de *Nopalea* apresentaram maiores oscilações nas durações das fases fenológicas decorrentes do consórcio, mostrando-se mais sensível a esse tipo de sistema com as distintas cultivares de sorgo. Independente dos clones, todas as cactáceas tiveram o momento de corte antecipado quando consorciados com as cultivares de sorgo.

Os sistemas de cultivo com Orelha de Elefante Mexicana e as cultivares de sorgo 467 e 2502, foram responsáveis pelos menores impactos negativos no crescimento da palma forrageira, recomendando-se a sua utilização. Para os clones de *Nopalea*, os melhores benefícios foram provenientes da configuração Miúda com 467, sendo os sistemas de cultivos citados promissores em ambientes semiáridos. Mais pesquisas são necessárias para verificar a inibição e performance do crescimento e desenvolvimento da palma forrageira em sistemas consorciados em outras condições ambientais.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo do primeiro autor.

## 5. Referências

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorol. Zeitschrift 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Amorim, D.M., Silva, T.G.F. da, Pereira, P. de C., Souza, L.S.B. de, Minuzzi, R.B., 2017. Phenophases and cutting time of forage cactus under irrigation and cropping systems. Pesqui. Agropecuária Trop. 47, 62–71. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4742746>
- Arnold, C.Y., 1959. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 74, 430–445.
- Bowers, J.E., 1996. More Flowers or New Cladodes? Environmental correlates and biological consequences of sexual reproduction in a Sonoran Desert prickly pear cactus, *Opuntia engelmannii*. Bull. Torrey Bot. Club 123, 34–40. <https://doi.org/10.2307/2996304>

- Chimonyo, V.G.P., Modi, A.T., Mabhaudhi, T., 2018. Sorghum radiation use efficiency and biomass partitioning in intercrop systems. *South African J. Bot.* 118, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.06.009>
- Conesa, M.À., Muir, C.D., Roldán, E.J., Molins, A., Perdomo, J.A., Galmés, J., 2017. Growth capacity in wild tomatoes and relatives correlates with original climate in arid and semi-arid species. *Environ. Exp. Bot.* 141, 181–190. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2017.04.009>
- Cruz, P.E., Pavón, N.P., 2013. Reproductive phenology of *Isolatocereus dumortieri* (Cactaceae) in semiarid scrub in central Mexico: Effect of rain during the dry season. *J. Arid Environ.* 92, 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.12.004>
- Diniz, W.J.S., Silva, T.G.F., Ferreira, J.M.S., Santos, D.C., Moura, M.S.B., Araújo, G.G.L., Zolnier, S., 2017. Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 52, 724–733. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000900004>
- Franco, J.G., King, S.R., Volder, A., 2018. Component crop physiology and water use efficiency in response to intercropping. *Eur. J. Agron.* 93, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.005>
- Gomes, V.G.N., Valiente-Banuet, A., Araujo, A.C., 2019. Reproductive phenology of cacti species in the Brazilian Chaco. *J. Arid Environ.* 161, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.11.001>
- Guevara, J.C., Yahia, E.M., Brito de la Fuente, E., Biserka, S.P., 2003. Effects of elevated concentrations of CO<sub>2</sub> in modified atmosphere packaging on the quality of prickly pear cactus stems (*Opuntia* spp.). *Postharvest Biol. Technol.* 29, 167–176. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(03\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(03)00021-8)
- Hassan, S., Inglese, P., Gristina, L., Liguori, G., Novara, A., Louhaichi, M., Sortino, G., 2019. Root growth and soil carbon turnover in *Opuntia ficus-indica* as affected by soil volume availability. *Eur. J. Agron.* 105, 104–110. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2019.02.012>
- Herce, M.F., Martorell, C., Alonso-Fernandez, C., Boullosa, L.F.V. V., Meave, J.A., 2014. Stem tilting in the inter-tropical cactus *Echinocactus platyacanthus*: an adaptive solution to the trade-off between radiation acquisition and temperature control. *Plant Biol.* 16, 571–577. <https://doi.org/10.1111/plb.12085>
- Huber, J., Dettman, D.L., Williams, D.G., Hultine, K.R., 2018. Gas exchange characteristics of giant cacti species varying in stem morphology and life history strategy. *Am. J. Bot.* 105, 1688–1702. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1166>
- Hunt, R., 1982. Plant growth curves. The functional approach to plant growth analysis, Edward Arn. ed. Edward Arnold Ltd., London, UK.
- Lima, L.R., Silva, T.G.F., Jardim, A.M.R.F., Souza, C.A.A., Queiroz, M.G., Tabosa, J.N., 2018. Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 22, 113–118. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p113-118>
- López-García, R., Mata-González, R., Blanco-Macías, F., Méndez-Gallegos, S. de J., Valdez-Cepeda, R.D., 2016. Fruit attributes dependence on fruiting cladode dry or fresh matter in *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller variety ‘Rojo Pelón.’ *Sci. Hortic.*

- (Amsterdam). 202, 57–62. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2016.02.028>
- McMaster, G.S., Edmunds, D.A., Wilhelm, W.W., Nielsen, D.C., Prasad, P.V.V., Ascough, J.C., 2011. PhenologyMMS: A program to simulate crop phenological responses to water stress. *Comput. Electron. Agric.* 77, 118–125. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2011.04.003>
- Motsa, M.M., Slabbert, M.M., Bester, C., Ngwenya, M.Z., 2017. Phenology of honeybush (*Cyclopia genistoides* and *C. subternata*) genotypes. *South African J. Bot.* 110, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.03.005>
- Müller, L.L.B., Albach, D.C., Zotz, G., 2018. Growth responses to elevated temperatures and the importance of ontogenetic niche shifts in Bromeliaceae. *New Phytol.* 217, 127–139. <https://doi.org/10.1111/nph.14732>
- Nobel, P.S., Zutta, B.R., 2008. Temperature tolerances for stems and roots of two cultivated cacti, *Nopalea cochenillifera* and *Opuntia robusta*: Acclimation, light, and drought. *J. Arid Environ.* 72, 633–642. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.08.005>
- Ojeda-Pérez, Z.Z., Jiménez-Bremont, J.F., Delgado-Sánchez, P., 2017. Continuous high and low temperature induced a decrease of photosynthetic activity and changes in the diurnal fluctuations of organic acids in *Opuntia streptacantha*. *PLoS One* 12, 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186540>
- Ojeda, J.J., Pembleton, K.G., Caviglia, O.P., Islam, M.R., Agnusdei, M.G., Garcia, S.C., 2018. Modelling forage yield and water productivity of continuous crop sequences in the Argentinian Pampas. *Eur. J. Agron.* 92, 84–96. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2017.10.004>
- Pereira, P.C., Silva, T.G.F., Zolnier, S., Morais, J.E.F., Santos, D.C., 2015. Morfogênese da palma forrageira irrigada por gotejamento. *Rev. Caatinga* 28, 184–195. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n321rc>
- Perondi, D., Fraisse, C.W., Staub, C.G., Cerbaro, V.A., Barreto, D.D., Pequeno, D.N.L., Mulvaney, M.J., Troy, P., Pavan, W., 2019. Crop season planning tool: Adjusting sowing decisions to reduce the risk of extreme weather events. *Comput. Electron. Agric.* 156, 62–70. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2018.11.013>
- Pinheiro, K.M., Silva, T.G.F., Carvalho, H.F.S., Santos, J.E.O., Morais, J.E.F., Zolnier, S., Santos, D.C., 2014. Correlações do índice de área do cladódio com características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 49, 939–947. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200004>
- Queiroz, M.G., Silva, T.G.F., Zolnier, S., Silva, S.M.S., Lima, L.R., Alves, J.O., 2015. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 19, 931–938. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p931-938>
- Queiroz, M.G., Silva, T.G.F., Zolnier, S., Silva, S.M.S., Souza, C.A.A., Carvalho, H.F.S., 2016. Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente Semiárido Edição Esp, 141–154. <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p141-154>
- R Core Team, 2019. A language and environment for statistical computing. R

632 Foundation for Statistical Computing.

633 Ramírez-Valiente, J.A., Center, A., Sparks, J.P., Sparks, K.L., Etterson, J.R., Longwell,  
 634 T., Pilz, G., Cavender-Bares, J., 2017. Population-level differentiation in growth  
 635 rates and leaf traits in seedlings of the Neotropical live Oak *Quercus oleoides*  
 636 grown under natural and manipulated precipitation regimes. *Front. Plant Sci.* 8, 1–  
 637 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00585>

638 Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agricultural*  
 639 *hand book* 60. U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.

640 Sadeghpour, A., Jahanzad, E., Esmaeili, A., Hosseini, M.B., Hashemi, M., 2013. Forage  
 641 yield, quality and economic benefit of intercropped barley and annual medic in  
 642 semi-arid conditions: Additive series. *F. Crop. Res.* 148, 43–48.  
 643 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.03.021>

644 Shipley, B., 2006. Net assimilation rate, specific leaf area and leaf mass ratio: Which is  
 645 most closely correlated with relative growth rate? A meta-analysis. *Funct. Ecol.* 20,  
 646 565–574. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2006.01135.x>

647 Silva, T.G.F., Araújo Primo, J.T., Moura, M.S.B., Silva, S.M.S., Morais, J.E.F., Pereira,  
 648 P.C., Souza, C.A.A., 2015. Soil water dynamics and evapotranspiration of forage  
 649 cactus clones under rainfed conditions. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 50, 515–525.  
 650 <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000700001>

651 Silva, T.G.F., Miranda, K.R., Santos, D.C., Queiroz, M.G., Silva, M.C., Cruz Neto, J.F.,  
 652 Araújo, J.E.M., 2014. Área do cladódio de clones de palma forrageira: modelagem,  
 653 análise e aplicabilidade. *Rev. Bras. Ciências Agrárias* 9, 633–641.  
 654 <https://doi.org/10.5039/agraria.v9i4a4553>

655 Vasseur, F., Bresson, J., Wang, G., Schwab, R., Weigel, D., 2018. Image-based methods  
 656 for phenotyping growth dynamics and fitness components in *Arabidopsis thaliana*.  
 657 *Plant Methods* 14, 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0331-6>

658 Winter, K., Garcia, M., Holtum, J.A.M., 2008. On the nature of facultative and  
 659 constitutive CAM: Environmental and developmental control of CAM expression  
 660 during early growth of *Clusia*, *Kalanchoë*, and *Opuntia*. *J. Exp. Bot.* 59, 1829–  
 661 1840. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern080>

662

## **CAPÍTULO 4 - O papel da utilização de análise multivariada para distinções morfogênicas de clones de palma forrageira em sistemas de consórcio**

### **Resumo**

A crescente demanda de alimento é um fator desafiante no setor agropecuário, tornando-se necessário de o uso de plantas adaptadas e ferramentas estatísticas que auxiliem na análise de dados. Neste contexto, objetivou-se avaliar as características morfogênicas de três clones de palma forrageira em sistemas de cultivo consorciado com sorgo através de análise multivariada (componentes principais) em ambiente semiárido. O experimento foi conduzido em Serra Talhada-PE, Brasil, em delineamento em blocos casualizados com quatro repetições e 12 tratamentos, sendo composto por três clones de palma forrageira (i.e., IPA Sertânia, Miúda e Orelha de Elefante Mexicana) e três cultivares de sorgo (i.e., 467, SF11 e 2502), em sistema consorciado. Foram realizadas análises biométricas (altura e largura da planta, número total de cladódio, comprimento, largura, espessura e perímetro do cladódio) e de biomassa (massa fresca, massa seca e conteúdo de matéria seca) dos clones ao longo do tempo. Os dados foram submetidos a análise estatística multivariada do tipo componentes principais. O clone Orelha de Elefante Mexicana apresentou maior agrupamento e correlações positivas das variáveis que explicam os melhores rendimentos da cultura. Dentre os dois clones de *Nopalea*, a Miúda foi detentora do maior número de cladódios, com correlação de 0,8. Houve um agrupamento de variáveis respostas em relação aos gêneros (*Opuntia* e *Nopalea*) de palma forrageira, não distinguindo o tipo de consórcio em questão. As variáveis largura, comprimento, perímetro e área do cladódio são cruciais para avaliações em cultivos de palma forrageira sendo indispensáveis sua avaliação.

Palavras-chave: análise de componentes principais; variáveis respostas; cactus; sorgo

**The role of using multivariate analysis for morphogenic distinctions of forage  
cactus clones in intercropping systems**

Abstract

The growing demand for food is a challenging factor in the agricultural sector, making it necessary to use adapted plants and statistical tools to aid in data analysis. In this context, the objective was to evaluate the morphogenic characteristics of three forage cactus clones in sorghum-intercropping systems by multivariate analysis (principal components) in a semi-arid environment. The experiment was conducted at Serra Talhada-PE, Brazil, in a randomized complete block design with four replicates and 12 treatments. It was composed of three clones of forage cactus (i.e., IPA Sertânia, Miúda and Orelha de Elefante Mexicana) and three cultivars of sorghum (i.e., 467, SF11 and 2502) in a consortium system. Biological analyzes (plant height and width, total cladode, length, width, thickness and perimeter of the cladode) and biomass (fresh mass, dry matter and dry matter content) of the clones were carried out over time. The data were submitted to multivariate statistical analysis of the principal components type. The Orelha de Elefante Mexicana clone presented higher grouping and positive correlations of the variables that explain the better yields of the culture. Among the two clones of *Nopalea*, the daughter had the highest number of cladodes, with a correlation of 0.8. There was a grouping of variable responses in relation to genera (*Opuntia* and *Nopalea*) of forage cactus, not distinguished the type of consortium in question. The variables width, length, perimeter and area of the cladodium are crucial for evaluations in forage cactus crops, being indispensable its evaluation.

53

54 Keywords: principal component analysis; response variables; cacti; sorghum

55

## 56 **1. Introdução**

57

58 A capacidade produtiva dos vegetais pode ser modificada perante as condições  
59 ambientais que são expostas nos sistemas de produção. Com o crescente aumento da  
60 população mundial, a demanda por alimento tem sido cada vez maior, tornando-se um  
61 dos grandes desafios no setor agropecuário, que visa produzir maiores quantidades de  
62 alimentos em escalas menores de terra, sem que haja riscos de degradações ambientais  
63 (Bjørge et al., 2018).

64 Utilizar espécies adaptadas a ambientes deficitários e que proporcionem  
65 melhores rendimentos nas lavouras, é uma alternativa promissora nos setores agrícolas.  
66 Dentre as diversas espécies existentes no mundo, a palma forrageira (*Opuntia* spp. e  
67 *Nopalea* spp.) vem ganhado espaço na cadeia produtiva de alimento devido a sua  
68 rusticidade, múltiplo uso (i.e., alimentação humana, animal, biocombustível) e baixa  
69 exigência hídrica (Hassan et al., 2019). Como também a cultura do sorgo (*Sorghum*  
70 spp.), com expressiva produção de forragem e adaptada a diversas configurações de  
71 cultivo, e apto ao uso da consorciação (Chimonyo et al., 2018; Diniz et al., 2017).

72 O entendimento da adaptação das plantas ao ambiente é um fator preponderante  
73 para o sucesso do vegetal em questão. Conhecer os parâmetros anatômicos e  
74 fisiológicos, que por muitas vezes são complexos, podem garantir posse de dados  
75 bastante valiosos (Patel et al., 2015) para análises estatísticas computacionais múltiplas.  
76 A utilização de análise multivariada, dentre elas a análise de componentes principais,  
77 que agrupa uma série de dados aplicando uma matriz de covariância que auxilia na

escolha de variáveis relevantes para o estudo, e proporcionando uma redução no conjunto de variáveis trabalhadas (Xiao et al., 2018).

Estudos de múltiplos consórcios de palma forrageira com sorgo, e este tipo de técnica, são bastante insipientes na literatura, e requerem mensurações de variáveis bastante complexas, sendo proposto no presente trabalho, que a utilização de análise de componentes principais podem diminuir a quantidade de dados coletados em campo para a palma forrageira, propondo-se variáveis com maior correlação com os rendimentos de forragem da cultura.

Neste contexto, objetivou-se avaliar as características morfogênicas de três clones de palma forrageira em sistemas de cultivo consorciado com sorgo através de análise multivariada (componentes principais) em ambiente semiárido.

## **2. Material e métodos**

### *2.1. Material vegetal e design experimental da área*

Foram utilizados os clones de palma forrageira da espécie *N. cochenillifera* (L.) Salm-Dyck (i.e., IPA Sertânia e Miúda), e a espécie *O. stricta* (Haw.) Haw. (i.e., Orelha de Elefante Mexicana), ambas resistentes à *Dactylopius opuntiae* Cockerell. Em consorciação com as cactáceas foram semeadas três cultivares de sorgo (*S. bicolor* (L.) Moench): 467, SF11 e 2502.

Em toda área antes do plantio das culturas, houve o preparo inicial do solo (i.e., aração, gradagem e sulcagem). A palma forrageira foi plantada em fevereiro de 2016, sendo os cladódios inseridos no solo de forma vertical em espaçamento de 1,0 x 0,2 m (i.e., 50.000 plantas ha<sup>-1</sup>), e conduzida sob condições de sequeiro até janeiro de 2017. Em março de 2017 efetuou-se um corte de uniformização (deixando os cladódios basais e de primeira ordem de inserção na planta). Após esse período iniciou-se as aplicações

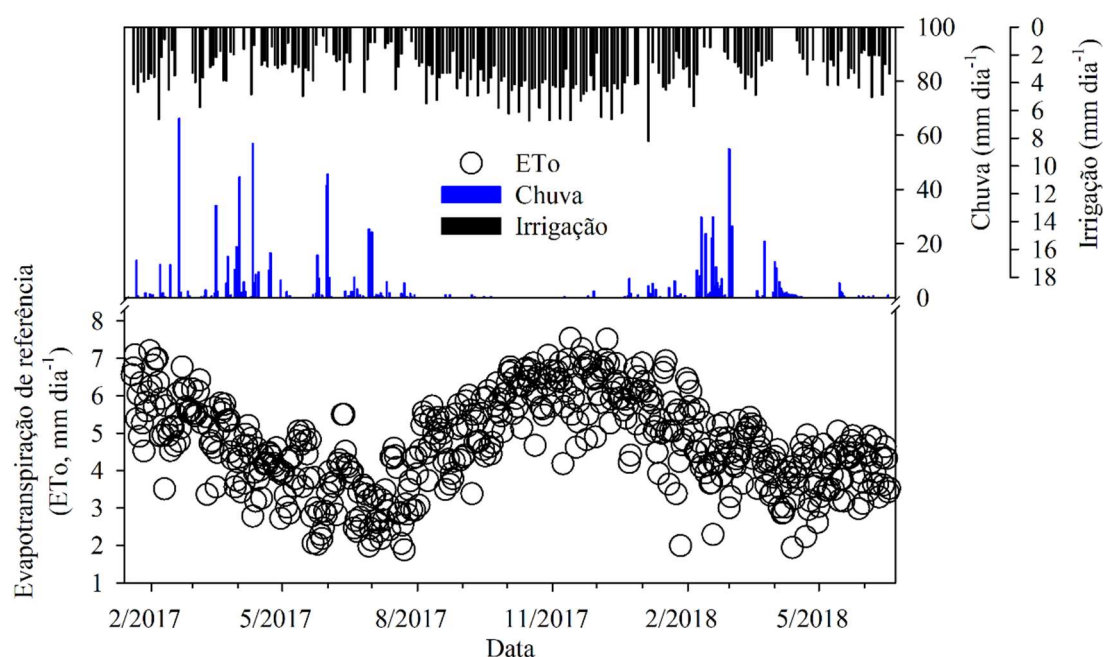
de irrigações com base na evapotranspiração real da cultura (Queiroz et al., 2016), e ao final do experimento colhidas em junho de 2018.

O semeio das cultivares de sorgo (março de 2017) foram realizadas à 0,25 m do cladódio basal da palma forrageira. Após a emergência das plântulas (i.e., 28 dias) realizou-se o desbaste das mesmas deixando 20 plantas por metro linear (i.e., 200.000 plantas ha<sup>-1</sup>). As cultivares de sorgo, foram conduzidos por quatro ciclos produtivos consecutivos durante o período experimental.

Durante o período experimental duas adubações minerais foram realizadas com NPK (14-00-18 + 16 S, aplicando-se 525 kg ha<sup>-1</sup>, corresponde a 73,5 kg N ha<sup>-1</sup>; 94,5 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> e 84 kg S ha<sup>-1</sup>) em toda a área experimental, sendo uma de fundação em janeiro e uma de cobertura em agosto de 2017 conforme Diniz et al. (2017). Os tratamentos culturais na área experimental foram realizados constantemente para possibilitar condições propícias ao desenvolvimento das culturas. Decorrente do ataque de microrganismo habitante de solo, detectou-se a expressiva mortalidade dos clones de *Nopalea* (IPA e Miúda com 81,62% ± 1,45 e 71,68% ± 3,71, respectivamente) e menos expressiva para a *Opuntia* (8,56% ± 1,29), intensificado devido à alta umidade dos cladódios (Guevara et al., 2003).

O experimento foi conduzido em blocos casualizados (DBC), com 12 tratamentos, onde têm-se três clones de palma forrageira em sistema exclusivo; e nove sistemas consorciados a partir do número máximo de combinações entre os clones de palma forrageira e as cultivares de sorgo. Cada tratamento foi constituído por quatro parcelas, totalizando 48 unidades experimentais, as quais foram compostas por quatro fileiras, cada uma com 25 plantas da cactácea, totalizando uma área de 60 m<sup>2</sup>. A parcela útil foi composta pelas duas fileiras centrais, com 46 plantas úteis (sendo desprezadas quatro plantas das extremidades), totalizando uma área útil de 16,4 m<sup>2</sup>.

As reposições hídricas via irrigação foram realizadas com base na exigência hídrica da cultura da palma forrageira (i.e., devido a mesma ser a cultura principal), utilizando-se coeficiente de cultura ( $K_c$ ) de 0,52 (Queiroz et al., 2016), toda segunda, quarta e sexta-feira por um sistema de gotejamento ( $1,75 \pm 0,14 \text{ L h}^{-1}$ ), com água de condutividade elétrica média de  $1,51 \text{ dS m}^{-1}$ , sendo classificada como água de alta salinidade (C3) (Richards, 1954);  $\text{pH} = 6,84$ ;  $\text{Na}^+ = 168,66 \text{ mg L}^{-1}$  e  $\text{K}^+ = 28,17 \text{ mg L}^{-1}$ . Para o cálculo da evapotranspiração de referência ( $E_{To}$ ) utilizou-se o método de Penman-Monteith padronizado pelo Boletim 56 da FAO (Allen et al., 1998), cujo os dados meteorológicos (Figura 1) eram coletados diariamente de uma estação automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia.



**Figura 1.** Representação das variáveis meteorológicas (chuva e evapotranspiração de referência), e irrigação durante o período experimental no município de Serra Talhada-PE, Brasil.

Os eventos de chuvas concentraram-se nos meses de fevereiro a julho em 2017 e, de fevereiro a maio de 2018, sendo em ~15 meses acumulados 997 mm. O período de estiagem ocorreu nos meses de agosto a janeiro. Por via de irrigação totalizou-se 623,21 mm, em 15 meses (1,4 mm dia<sup>-1</sup>). Em média a ETo foi de 4,71 mm dia<sup>-1</sup> durante o período experimental (i.e., com máxima de 7,53 mm dia<sup>-1</sup> e mínima de 0,40 mm dia<sup>-1</sup>), totalizando uma demanda atmosférica de 2.431,32 mm.

## 2.2. Local de estudo

O experimento foi conduzido na Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, município de Serra Talhada, PE, Brasil (7°56'20" S; 38°17'31" O e 499 m), de 18 de março de 2017 a 16 de junho de 2018 (455 dias, ~15 meses). O clima da região é do tipo BSw<sup>h</sup>, Semiárido, segundo Köppen, com incidência de chuva nos meses mais quentes, e seca nos meses frios do ano (Alvares et al., 2013).

O solo da área experimental era do tipo Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico, com relevo plano, cuja amostragem, na profundidade de 0,00 a 0,20 m, apresentou os seguintes resultados físico-químicos: pH<sub>(água)</sub> = 5,95; CE<sub>e</sub> = 0,32 dS m<sup>-1</sup>; P = 168,96 mg dm<sup>-3</sup>; K<sup>+</sup> = 13,8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Na<sup>+</sup> = 1,09 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Ca<sup>2+</sup> = 3,45 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg<sup>2+</sup> = 1,90 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H + Al = 0,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; SB = 20,25 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC = 20,85 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Saturação por bases (V%) = 97,15%; C.O = 4,6 g kg<sup>-1</sup>; M.O = 7,93 g kg<sup>-1</sup>; Areia = 828,6 g kg<sup>-1</sup>; Silte = 148,25 g kg<sup>-1</sup>; Argila = 23,15 g kg<sup>-1</sup> e densidade do solo de 1,45 g dm<sup>-3</sup>.

## 2.3. Avaliação do crescimento da palma forrageira

Em intervalos mensais foram realizadas medidas biométricas nas plantas de palma forrageira e as análises de biomassa foram realizadas a cada 90 dias. Tais medidas morfométricas foram realizadas em duas plantas por parcela, onde foram mensuradas (e.g., altura e largura da planta (cm), comprimento e largura do cladódio (cm), perímetro do cladódio (cm), espessura do cladódio (mm), número de cladódios por planta), como também a área do cladódio (m<sup>2</sup>), índice de área do cladódio (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>) e biomassa verde e seca total (Mg ha<sup>-1</sup>).

O índice de área do cladódio (IAC, m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>), foi calculado adotando-se o método não destrutivo conforme descrito por Pinheiro et al. (2014), conforme a Equação 1. A área do cladódio (AC, m<sup>2</sup>), foi calculada conforme Silva et al. (2014).

$$IAC = \left[ \sum_{n=1}^i (AC) / \frac{10000}{(E1 \cdot E2)} \right] \quad (1)$$

em que, IAC - índice de área do cladódio observado (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>); AC - área do cladódio (m<sup>2</sup>); 10.000 corresponde ao fator de correção de cm<sup>2</sup> em m<sup>2</sup>; e E1 · E2 - corresponde ao espaçamento entre fileiras (i.e., no presente trabalho utilizou-se 1,0 x 0,2 m, respectivamente).

A biomassa verde e seca total (Mg ha<sup>-1</sup>) dos cladódios da palma foi mensurada a partir da subamostragem de uma planta coletada em diferentes datas. Já na ocasião da colheita considerou-se as plantas da parcela útil, de modo que as mesmas, uma vez pesadas (para obtenção do peso fresco) em balança de precisão, foram posteriormente fragmentadas e acondicionadas em sacos de papel. Estes foram identificados e conduzidos a uma estufa de ventilação forçada de ar a 65 °C, até obtenção de peso seco

constante (biomassa seca) (Sadeghpour et al., 2013). Além disso, manteve-se nas plantas os cladódios basais e os de primeira ordem no momento do corte.

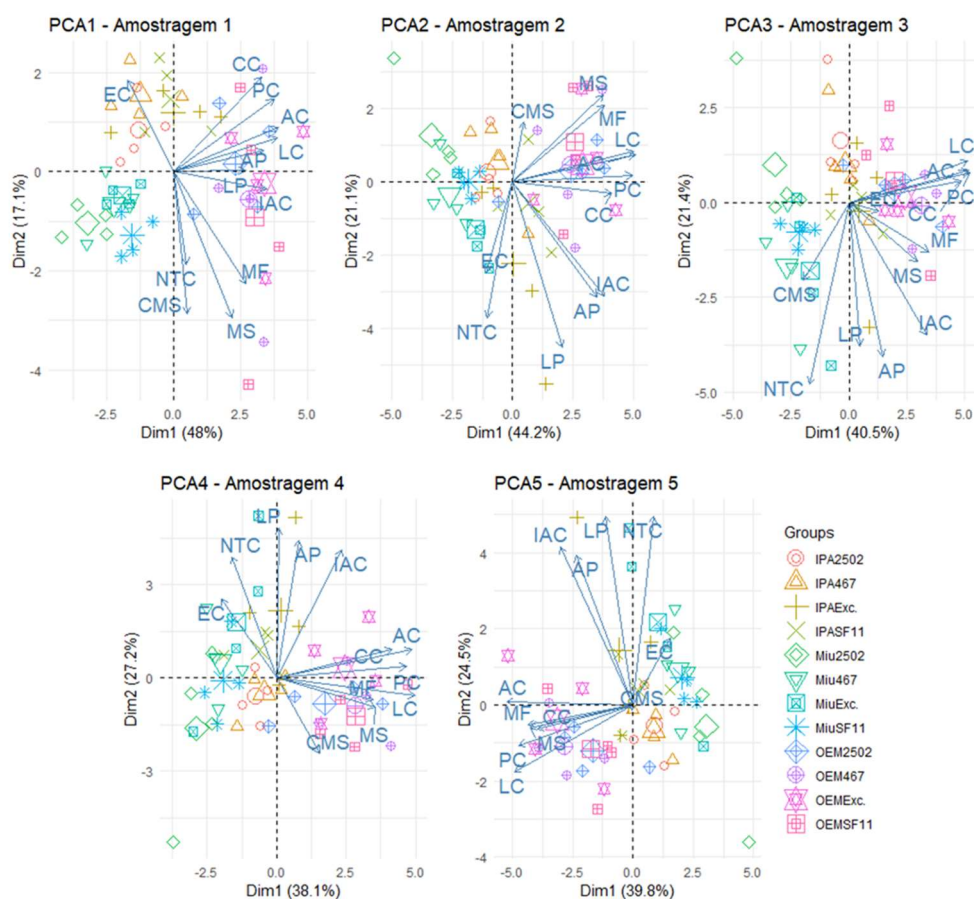
#### *2.4. Análise de dados*

Os dados biométricos e de massa fresca, massa seca e conteúdo de matéria seca ao longo do período experimental, foram comparados entre os sistemas de plantio (i.e., palma exclusiva e palma consorciada com sorgo) através de estatística multivariada. Com intuito de visualizar uma relação entre as variáveis biométricas e os dados de biomassa, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (ACP). Os dados originais foram decompostos em conjuntos de vetores ortogonais. Os resultados da matriz de covariância dos dados foram apresentados em biplots que revelou a distribuição dos mesmos no espaço de ordenação, bem como as variâncias e a correlação de Pearson ( $\alpha = 0,05$ ) das variáveis. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa R 3.5.3 (RStudio, Inc., Boston, MA, USA).

### **3. Resultados e discussão**

#### *3.1. Análises biométricas e de biomassas ao longo do tempo da palma forrageira*

Na Figura 2, são apresentadas as análises de componentes principais (ACPs) para as variáveis biométricas e de biomassa (i.e., massa fresca, massa seca e conteúdo de matéria seca) ao longo do tempo, para os clones de palma forrageira submetidas aos sistemas de cultivo exclusivo e consorciado, com três cultivares de sorgo em ambiente semiárido.



**Figura 2.** Análise de componentes principais (ACP) para variáveis biométricas e de produtividade dos clones de palma forrageira sob sistema exclusivo e diferentes consórcios com cultivares de sorgo (467, SF11 e 2502). OEM - Orelha de Elefante Mexicana; IPA - IPA Sertânia; Miu - Miúda. Exc. - Exclusivo; AP - Altura da planta (cm); LP - Largura da planta (cm); NTC - Número total de cladódio; CC - Comprimento do cladódio (cm); LC - Largura do cladódio (cm); EC - Espessura do cladódio (mm); PC - Perímetro do cladódio (cm); AC - Área do cladódio (cm<sup>2</sup>); IAC - Índice de área do cladódio (cm<sup>2</sup> cm<sup>-2</sup>); MF - Massa fresca (Mg ha<sup>-1</sup>); MS - Massa seca (Mg ha<sup>-1</sup>) e, CMS - Conteúdo de matéria seca (Mg MS Mg<sup>-1</sup> MF).

216

217 Durante a amostragem 1 (i.e., plantas de palma forrageira com 126 dias pós o  
218 corte - DAC), observa-se que as variáveis biométricas apresentaram dispersões dentro  
219 dos quadrantes. Dois grupos principais de dados estão bem caracterizados nas

componentes principais 1 e 2. A componente principal 1 (CP1) foi responsável por explicar 48% da resposta dos dados. Já a CP2 explicou apenas 17,1% da variância dos dados, sendo as variáveis com maiores correlações deste componente, o conteúdo de matéria seca (CMS), número total de cladódios (NTC), massa seca (MS) e espessura de cladódio (EC), sendo esta última com correlação negativa.

Inseridos na CP1, os dados biométricos de altura de planta (AP), largura de planta (LP), comprimento do cladódio (CC), largura do cladódio (LC), perímetro do cladódio (PC), área do cladódio (AC), índice de área do cladódio (IAC) e dados de rendimento, como massa fresca (MF), apresentaram uma correlação positiva entre si. Em clones de palma forrageira correlações altas e positivas auxiliam no entendimentos das afinidades genótípicas e seleções de características importantes para a escolha de clones para produção de forragem e melhoramento genético (Neder et al., 2013).

Observa-se que para a variável espessura de cladódio (EC), o clone IPA, em todas às configurações de cultivo, apresentou correlação inversa para as variáveis de biomassa, ou seja, MF, MS e CMS; como também, para a variável biométrica: NTC. Entende-se assim, que esses clones por apresentarem maiores espessuras das estruturas vegetativas (i.e., cladódios), possuem nesta data (126 DAC) um menor rendimento produtivo e a quantidade de cladódios emitidos de maneira inferior. Corroborando com essa hipótese, os rendimentos produtivos ao final do ciclo tornam-se inferiores decorrente desta correlação (Neder et al., 2013), e inferiores quando confrontados com o clone OEM. Resposta inversamente proporcional como essas também foram reportadas por Queiroz et al. (2015) para o clone Orelha de Elefante Mexicana.

Nas características do cladódio, o clone OEM foi detentor do maior grupo de variáveis correlacionadas, apresentando uma correlação positiva entre as mesmas. Demonstrando-se, que tais variáveis possuem complementaridade e relevante importância na diferenciação dos clones e sistemas de cultivo. Tais variabilidades de

características morfofisiológicas em clones de palma forrageira também foram observadas por Reis et al. (2018), justamente de respostas de baixo vigor vegetativo para alguns clones.

Utilizando ACP com estudos de similaridades em características fenotípicas e bioquímicas de cactos do gênero *Opuntia*, Mottese et al. (2018) observaram que análises como essas auxiliaram no entendimento de características da planta, sendo úteis para rastreabilidade de clones em diferentes regiões do mundo.

Durante a amostragem 2 (i.e., plantas de palma forrageira com 280 DAC), o clone OEM, também apresentou maiores características de cladódios. O grupo vetorial dessas variáveis (e.g., CC, LC, PC, AC e IAC), correlacionou-se positivamente com essa espécie. A CP1 explicou 44,2% da variabilidade dos dados amostrais e quando somada a CP1 mais a CP2, essa contribuição consistiu em 65,3% da variância total. Em específico as variáveis LC, CC e PC do clone OEM houve correlação alta das mesmas com a CP1, sendo explicada a expressiva AC deste clone. Para Silva et al. (2014), essas variáveis auxiliam no entendimento da área do cladódio dessa forrageira, visto que, AC maiores auxiliam na capacidade fotossintética e assimilação de carbono.

Ainda que correlacionados negativamente, observa-se que os clones de Miúda em seus sistemas de cultivo, esboçaram maiores quantidades de cladódios. Porém, influenciaram em menores contribuições de LC, AC, MF e MS. Devido à sua distância vetorial ser expressivamente mais curta, para o CMS (i.e., 0,0071 e 0,09 para a CP1 e CP2, respectivamente) essa variável foi pouco influenciada.

O agrupamento de dados referente a amostragem 3 (i.e., cactáceas com 317 DAC), esboçou 40,5% de explicação para as variáveis na CP1, seguidos de 21,4% na CP2. Os sistemas com clone Miúda apresentaram maiores agrupamentos de seus resultados nas variáveis NTC e CMS, isso explica que a mesma apresentou maior correlação com essas variáveis, sendo detentora principalmente do maior número de

cladódios. Entretanto, o clone do gênero *Opuntia*, devido ao agrupamento de variáveis, esboçou-se com as maiores LC, CC, PC e AC. Esse comportamento também pode ser ressaltado durante a amostragem 4 (i.e., 413 DCA das plantas de palma forrageira). Sendo que, para essa amostragem a CP1 contribuiu com 38,1% da variância da matriz de dados e, a CP2 com 27,2%.

No período de amostragem 5 (i.e., plantas com 455 DAC), a CP1 explica 39,8% da variância total. Como essa amostragem trata-se do período de colheita da palma forrageira, observa-se que o clone OEM apresentou maior agrupamento nas variáveis que exprimem o melhor rendimento da cultura, como também angulações entre vetores menores, o que justifica uma maior correlação. O clone Miúda apresentou maior número de cladódios, possuindo uma correlação de 0,8 e sendo a mesma explicada pela CP2, que representa 24,5% da variabilidade dos dados amostrados.

As distintas variações de características entre os clones elucidados através da ACP estar relacionadas aos gêneros que as mesmas pertencem, como também, devido aos processos de domesticação sofridos pelos clones. García-Nava et al. (2015) observaram através da ACP que características biofísicas e fisiológicas, dentre elas teor de ácido málico e tolerância ao déficit hídrico podem ser correlacionadas através dessa análise. Sendo uma justificativa devido os clones de *Nopalea* apresentarem características morfométricas menos favoráveis quando comparados com a *Opuntia*, no presente estudo.

De modo geral, o uso da ACP não apresentou distinções dos clones quanto aos tratamentos consorciados, mas sim, para os gêneros de cactos, esboçando uma ínfima alteração nas características morfométricas quando consorciada. E para as variáveis biométricas analisadas ao longo do ciclo da cactácea, observou-se que as características do cladódio referente ao comprimento, largura e perímetro, possuem correlações fortes com as variáveis de rendimentos de biomassa da mesma. Podendo-se assim, caracterizá-

las como variáveis respostas cruciais para as espécies e, fidedignas para o acompanhamento da performance dos clones de palma forrageira e/ou para seleção de clones com elevados rendimentos produtivos.

Como nem sempre sob condições de campo e cultivos protegidos é possível a utilização de amostragens destrutivas para a quantificação do rendimento fresco e seco dos clones de palma forrageira, a utilização de análises multivariadas e canônicas vem sendo estudas em correlações com as características morfométricas em espécies de cactáceas (Neder et al., 2013; Reis et al., 2018), auxiliando nas tomadas de decisões e escolha dos clones mais promissores as condições ambientais.

#### **4. Conclusões**

O uso de análise de componentes principais não detecta influência dos consórcios nas características morfogênicas da palma forrageira independente do clone. O clone que apresenta características com maior correlação das variáveis para os rendimentos de biomassa é a Orelha de Elefante Mexicana. O agrupamento de variáveis para os clones de *Nopalea* corroboram com suas características fenológicas referente ao gênero da cultura. As variáveis largura, comprimento, perímetro e área do cladódio são cruciais para avaliações em cultivos de palma forrageira sendo indispensáveis sua avaliação.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo do primeiro autor.

324

325 **5. Referências**

326

327 Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration:  
328 Guidelines for computing crop water requirements, Food and Agriculture  
329 Organization of the United Nations. Rome.

330 Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M., Sparovek, G., 2013.  
331 Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorol. Zeitschrift 22, 711–728.  
332 <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

333 Bjørge, J.D., Overgaard, J., Malte, H., Gianotten, N., Heckmann, L.-H., 2018. Role of  
334 temperature on growth and metabolic rate in the tenebrionid beetles *Alphitobius*  
335 *diaperinus* and *Tenebrio molitor*. J. Insect Physiol. 107, 89–96.  
336 <https://doi.org/10.1016/J.JINSPHYS.2018.02.010>

337 Chimonyo, V.G.P., Modi, A.T., Mabhaudhi, T., 2018. Sorghum radiation use efficiency  
338 and biomass partitioning in intercrop systems. South African J. Bot. 118, 76–84.  
339 <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.06.009>

340 Diniz, W.J.S., Silva, T.G.F., Ferreira, J.M.S., Santos, D.C., Moura, M.S.B., Araújo,  
341 G.G.L., Zolnier, S., 2017. Forage cactus-sorghum intercropping at different  
342 irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. Pesqui. Agropecuária  
343 Bras. 52, 724–733. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000900004>

344 García-Nava, F., Peña-Valdivia, C.B., Trejo, C., García-Nava, R., Reyes-Agüero, J.A.,  
345 Rivera, J.R.A., 2015. Biophysical and physiological characteristics of nopalitos  
346 (*Opuntia* spp., Cactaceae) as influenced by domestication. Genet. Resour. Crop  
347 Evol. 62, 927–938. <https://doi.org/10.1007/s10722-014-0201-7>

348 Guevara, J.C., Yahia, E.M., Brito de la Fuente, E., Biserka, S.P., 2003. Effects of  
 349 elevated concentrations of CO<sub>2</sub> in modified atmosphere packaging on the quality  
 350 of prickly pear cactus stems (*Opuntia* spp.). Postharvest Biol. Technol. 29, 167–  
 351 176. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(03\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(03)00021-8)

352 Hassan, S., Inglese, P., Gristina, L., Liguori, G., Novara, A., Louhaichi, M., Sortino, G.,  
 353 2019. Root growth and soil carbon turnover in *Opuntia ficus-indica* as affected by  
 354 soil volume availability. Eur. J. Agron. 105, 104–110.  
 355 <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2019.02.012>

356 Lima, L.R., Silva, T.G.F., Jardim, A.M.R.F., Souza, C.A.A., Queiroz, M.G., Tabosa,  
 357 J.N., 2018. Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum  
 358 intercropping under different water depths. Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.  
 359 22, 113–118. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p113-118>

360 Mottese, A.F., Naccari, C., Vadalà, R., Bua, G.D., Bartolomeo, G., Rando, R., Cicero,  
 361 N., Dugo, G., 2018. Traceability of *Opuntia ficus-indica* L. Miller by ICP-MS  
 362 multi-element profile and chemometric approach. J. Sci. Food Agric. 98, 198–204.  
 363 <https://doi.org/10.1002/jsfa.8456>

364 Neder, D.G., Costa, F.R. da, Edvan, R.L., Souto Filho, L.T., 2013. Correlations and path  
 365 analysis of morphological and yield traits of cactus pear accessions. Crop Breed.  
 366 Appl. Biotechnol. 13, 203–207. [https://doi.org/10.1590/S1984-](https://doi.org/10.1590/S1984-70332013000300009)  
 367 [70332013000300009](https://doi.org/10.1590/S1984-70332013000300009)

368 Patel, R.P., Singh, R., Saikia, S.K., Rao, B.R.R., Sastry, K.P., Zaim, M., Lal, R.K., 2015.  
 369 Phenotypic characterization and stability analysis for biomass and essential oil  
 370 yields of fifteen genotypes of five *Ocimum* species. Ind. Crops Prod. 77, 21–29.  
 371 <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2015.08.043>

- 372 Pinheiro, K.M., Silva, T.G.F., Carvalho, H.F.S., Santos, J.E.O., Morais, J.E.F., Zolnier,  
373 S., Santos, D.C., 2014. Correlações do índice de área do cladódio com  
374 características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. *Pesqui.*  
375 *Agropecuária Bras.* 49, 939–947. [https://doi.org/10.1590/S0100-](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200004)  
376 [204X2014001200004](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200004)
- 377 Queiroz, M.G., Silva, T.G.F., Zolnier, S., Silva, S.M.S., Lima, L.R., Alves, J.O., 2015.  
378 Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes  
379 lâminas de irrigação. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 19, 931–938.  
380 <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p931-938>
- 381 Queiroz, M.G., Silva, T.G.F., Zolnier, S., Silva, S.M.S., Souza, C.A.A., Carvalho,  
382 H.F.S., 2016. Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em  
383 ambiente Semiárido Edição Esp, 141–154.  
384 <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p141-154>
- 385 Reis, C.M.G., Gazarini, L.C., Fonseca, T.F., Ribeiro, M.M., 2018. Above-ground  
386 biomass estimation of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. for forage crop in a  
387 Mediterranean environment by using non-destructive methods. *Exp. Agric.* 54,  
388 227–242. <https://doi.org/10.1017/S0014479716000211>
- 389 Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agricultural*  
390 *hand book* 60. U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.
- 391 Sadeghpour, A., Jahanzad, E., Esmacili, A., Hosseini, M.B., Hashemi, M., 2013. Forage  
392 yield, quality and economic benefit of intercropped barley and annual medic in  
393 semi-arid conditions: Additive series. *F. Crop. Res.* 148, 43–48.  
394 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.03.021>
- 395 Silva, T.G.F., Miranda, K.R., Santos, D.C., Queiroz, M.G., Silva, M.C., Cruz Neto, J.F.,

396       Araújo, J.E.M., 2014. Área do cladódio de clones de palma forrageira: modelagem,  
397       análise e aplicabilidade. *Rev. Bras. Ciências Agrárias* 9, 633–641.  
398       <https://doi.org/10.5039/agraria.v9i4a4553>

399       Xiao, M., Ma, Y., Feng, Z., Deng, Z., Hou, S., Shu, L., Lu, Z., 2018. Rice blast  
400       recognition based on principal component analysis and neural network. *Comput.*  
401       *Electron. Agric.* 154, 482–490. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2018.08.028>

402