



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Lacunas de produtividades e estratégias de cultivo na melhoria da produção de forragem para a região semiárida brasileira - Revisão

Antonio Gebson Pinheiro¹, Luciana Sandra Bastos de Souza², Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim³, George do Nascimento Araújo Júnior⁴, Cleber Pereira Alves⁵, Carlos André Alves de Souza⁶, Renan Matheus Cordeiro Leite⁷, Thieres George Freire da Silva⁸

¹Doutorando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Dom Manuel de Medeiros; s/n; Dois Irmãos; CEP 52171-900; Recife; Pernambuco, (81)995441896, gebson10@hotmail.com. ²Dr. em Meteorologia Agrícola, Professora Assistente I, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco. (87) 3929-3216. sanddrbastos@yahoo.com.br. ³Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, alexandremrfj@gmail.com. ⁴Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, georgearaujo.agro@gmail.com. ⁵Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, cleberp.alves@hotmail.com. ⁶Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, carlosandre08_msn.com. ⁷Mestrando em Produção Vegetal da Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Gregório Ferraz Nogueira, s/n - José Tomé de Souza Ramos, Serra Talhada, PE, Brasil. CEP: 56909-535, renanmatheuscl@gmail.com. ⁸Dr. Professor Associado II, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco. (87) 3929-3208. thieres_freire@yahoo.com.br (autor correspondente).

Artigo recebido em 16/04/2021 e aceito em 10/07/2021

RESUMO

A pecuária é uma atividade econômica fundamental para a região semiárida, porém é diretamente influenciada por fatores como as características do solo, qualidade da forragem e a sazonalidade pluviométrica. A irregularidade desses fatores reduz os níveis de produtividade, tornando-os dependentes das condições climáticas. Nesse sentido, o conhecimento das principais causas redutoras da produtividade e a adoção de práticas agrícolas resilientes são essenciais na redução dos efeitos sazonais do clima, aumentando a oferta de forragem no período de escassez hídrica. O uso de forrageiras adaptadas e com potencial produtivo constitui-se com eficiente prática de resiliência agrícola, dentre elas destacam-se a palma forrageira, sorgo, milheto, feijão guandu e girassol. Essas constituem-se com elevada capacidade de conversão hídrica em matéria seca, complementação nutricional e aumento produtivo. Adicionalmente, a implementação de práticas (e.g. consorciação, irrigação, adensamento, cobertura, etc.) contribuem na otimização dos recursos naturais e proporcionam melhores resultados no subsídio contínuo da produção de forragem. Com isso, o presente estudo teve como objetivo apresentar as características ambientais do semiárido brasileiro, expor conceitos sobre os níveis de produtividades e os principais fatores das lacunas de produção, além de difundir estratégias mitigatórias de produção de forragem. Após compilação dessas informações, destaca-se a importância de plantas forrageiras adaptadas e a adoção de práticas de manejo agrícola como estratégias para atenuar os efeitos sazonais do clima, contribuindo no subsídio contínuo da produção de forragem. Paralelamente, a análise de *Yield Gap* permite o conhecimento mais amplo dos fatores limitantes de produção, direcionando o planejamento agrícola de forma mais eficiente.

Palavras-chave: plantas forrageiras; semiárido brasileiro; agricultura.

Yield Gap and cultivation strategies in improving forage production for the Brazilian semi-arid region - Review

ABSTRACT

Livestock farming is a fundamental economic activity for the semi-arid region, but it is directly influenced by factors such as soil characteristics, forage quality and rainfall seasonality. The irregularity of these factors reduces productivity levels, making them dependent on climatic conditions. In this sense, the knowledge of the main causes that reduce productivity and the adoption of resilient agricultural practices are essential in reducing the seasonal effects of the climate, increasing the supply of forage in the period of water scarcity. The use of adapted forage crops and with productive potential constitutes an efficient agricultural resilience practice, among which stands out the forage cactus, sorghum, millet, pigeon pea and sunflower. These are constituted with a high capacity for water conversion into dry matter, nutritional

complementation and increased production. In addition, the implementation of practices (e.g. intercropping, irrigation, densification, mulch, etc.) contribute to the optimization of natural resources and provide better results in the continuous subsidy of forage production. With this, the present study aimed to present the environmental characteristics of the Brazilian semiarid region, to expose concepts about the levels of productivity and the main factors of the production gaps, in addition to disseminating mitigation strategies of forage production. After compiling this information, it highlights the importance of adapted forage crops and the adoption of agricultural management practices as strategies to mitigate the seasonal effects of the climate, contributing to the continuous subsidy of forage production. At the same time, the *Yield Gap* analysis allows for a broader knowledge of the limiting factors of production, directing agricultural planning more efficiently.

Keywords: forage crops; Brazilian semi-arid; agriculture.

Introdução

A pecuária brasileira representa 31% do Produto Interno Bruto do agronegócio do país, e compreende uma atividade de mitigação à vulnerabilidade socioeconômica da região, sendo mais estável ao longo do ano que a agricultura. (Moraes et al., 2019; Nunes et al., 2016; Veloso et al., 2020). Entretanto, a sazonalidade anual na produção de forragem na região semiárida apresenta-se como grande adversidade para a produção de forragem sob sistema de sequeiro, podendo ocasionar desequilíbrio entre a sua oferta e a demanda de ração animal (Bell et al., 2018).

Nesse sentido, o conhecimento dos principais fatores que ocasionam tal desequilíbrio na relação oferta x demanda de forragem e nos sistemas agrícolas é fundamental na definição das melhores estratégias de plantio (Lobell et al., 2009; Pourhadian et al., 2019; Zu et al., 2018). Para tal, diversos estudos baseiam-se na metodologia mundialmente conhecida pelo termo “Yield Gap”, que se relacionados aos distintos modelos ecológicos de produção agrícola. A estimativa da “Yield Gap” pode ser realizada pela diferença entre a produtividade potencial (Y_P), obtida por meio de modelos de simulação, a produtividade atingível (Y_A) e a produtividade real (Y_R) (Battisti et al., 2018; Fischer, 2015; Lobell et al., 2009; Sentelhas et al., 2016; Sentelhas et al., 2015; Silva et al., 2017; Van Ittersum e Rabbinge, 1997).

Diversos estudos com culturas forrageiras e sistemas de cultivos alternativos têm sido amplamente realizados a fim de minimizar os efeitos do déficit hídrico e a sazonalidade climática na produção de forragem durante todo o ano. Como resultados, verificou-se que a palma forrageira (e.g., *Opuntia* e *Nopalea*) constitui-se como fonte importante de forragem pela alta capacidade de adaptação e pelo alto potencial produtivo em condições de déficit hídrico nessa região (Costa et al., 2009; Silva et al., 2015, 2017; Jardim et al., 2021a). Além de apresentar alta eficiência no uso da água, conteúdo de água elevado na planta e

elevado rendimento de biomassa (Moraes et al., 2019; Taiz et al., 2017).

A palma forrageira, apesar de adaptada a regiões com altas restrições hídricas, apresenta baixo teor de fibras e lento desenvolvimento vegetativo (Silva et al., 2015; Siqueira et al., 2017). Com isso, a adoção de práticas agrícolas resilientes pode elevar a produção de alimentos e otimizar o uso eficiente dos recursos naturais no Semiárido brasileiro. Dentre essas práticas, a consorciação da palma com outras culturas forrageiras (i.e. sorgo, milheto, feijão guandu e girassol) e o adensamento são importantes na minimização dos efeitos sazonais da produção de forragem, na suplementação alimentar e no aumento de produção (Cardoso et al., 2019; Lima et al., 2018; Morugán-Coronado et al., 2020; Jardim et al., 2021b). O uso de irrigações complementares minimiza as oscilações da produção de forragem nos períodos mais secos do ano (Diniz et al., 2017). Já a cobertura morta reduz o impacto da radiação solar direta no solo, eleva o conteúdo de matéria orgânica e proporciona maior conservação da umidade (Carvalho et al., 2017; Alves et al., 2018).

Com isso, esta revisão teve como objetivo reunir informações sobre as principais características climáticas da região do Nordeste brasileiro, investigar a importância da Pecuária como fonte de atenuação à vulnerabilidade agrícola. Além de recomendar sistemas de produção mais adequados para a região, mediante conhecimento dos principais fatores limitantes, e, com isso, otimizar o planejamento e desenvolvimento das políticas agrícolas e tomadas de decisões.

Fatores edafoclimáticos do Semiárido brasileiro limitantes à produção agropecuária

As regiões semiáridas são um subtipo de clima seco com um índice de aridez (i.e., razão entre precipitação e evapotranspiração potencial anuais) entre 0,20 e 0,50. A maioria dos solos dessas regiões exibem textura arenosa, baixa

concentração de carbono orgânico, baixa capacidade de retenção de água, além de fertilidade reduzida (Garcia-Franco et al., 2018; Lal, 2004).

No Brasil, de acordo com o Instituto Nacional de Semiárido Brasileiro (INSA, 2017), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019) e a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE, 2017), o semiárido apresenta área de 1.127.953 km², correspondendo a 73% e 13% da região Nordeste e do território nacional, respectivamente. Ao todo, a região semiárida está localizada na região nordeste do Brasil e norte de Minas Gerais, com

1.262 municípios situados em dez Estados: Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe (Figura 1). É a região semiárida com maior população do mundo, i.e., quase 22 milhões de habitantes (IBGE, 2010). E que apresenta grande importância da pecuária extensiva e a agricultura de sequeiro, os quais normalmente são desenvolvidas por pequenos agricultores, que realizam cultivos após a queima da vegetação nativa (Souza Medeiros et al., 2020; Silva et al., 2017).

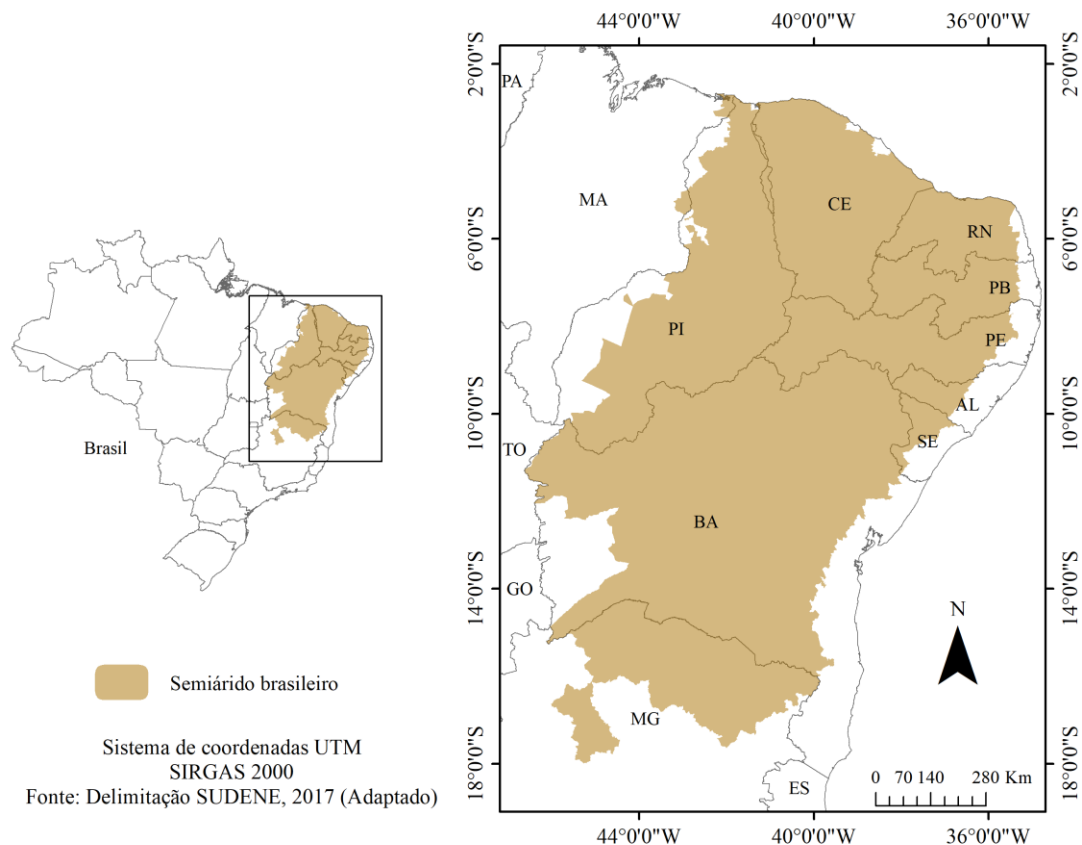


Figura 1. Delimitação do semiárido brasileiro (Adaptado: SUDENE, 2017).

A região do semiárido brasileiro apresenta média pluviométrica acumulada inferior a 800 mm ano⁻¹, alta evapotranspiração potencial, aproximadamente 2.000 mm ano⁻¹, além de temperaturas altas, em torno de 25 °C ao longo do ano (Alvares et al., 2013; Alves et al., 2015; de

Souza Medeiros et al., 2020; Marengo et al., 2011), fato evidenciado mediante análise da Figura 2, na qual são destacados os respectivos dados históricos (1981-2010) para municípios localizados em diferentes regiões do Semiárido brasileiro.

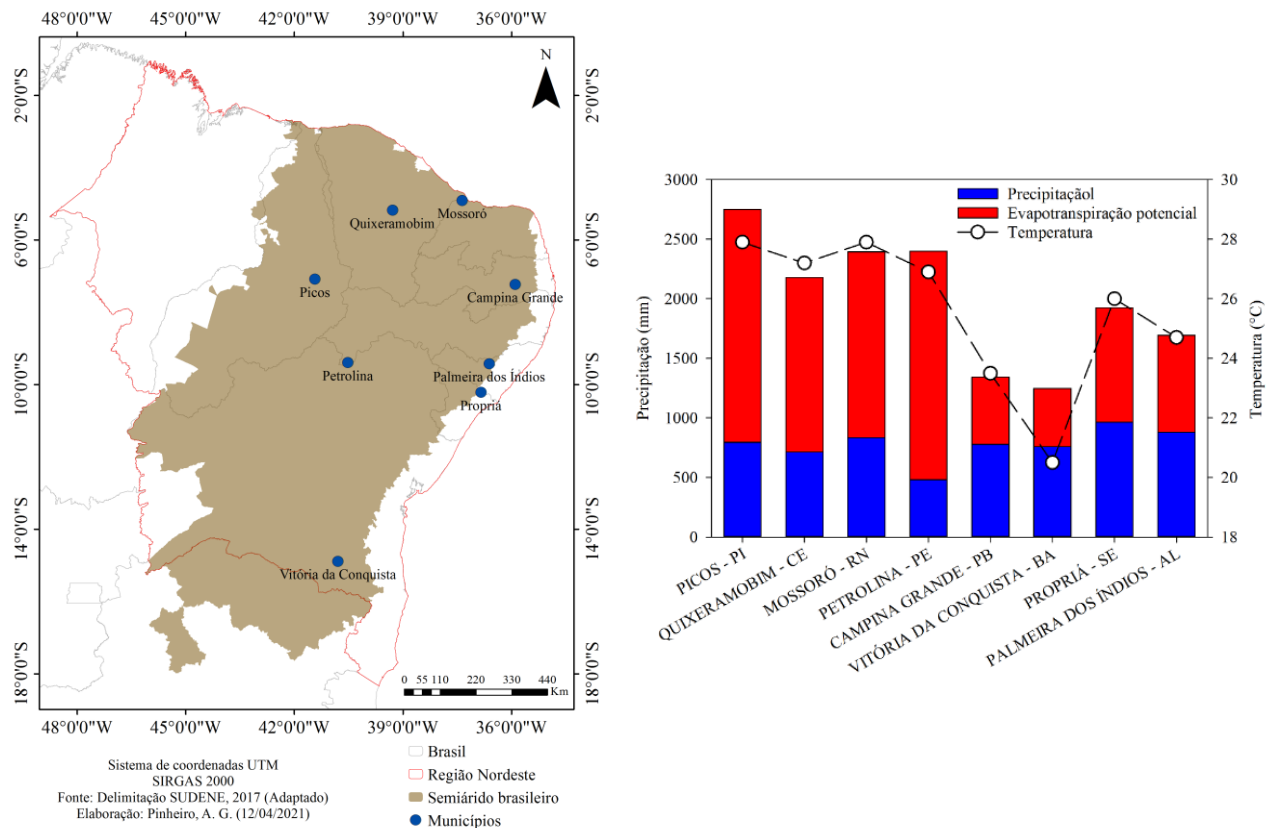


Figura 2. Localização de estações na região Semiárida com totais anuais de precipitação e evapotranspiração potencial, e a temperatura média do ar.

Historicamente, o Semiárido brasileiro apresenta alta sazonalidade na distribuição pluviométrica ao longo do ano (Alvares et al., 2013). A região concentra a maioria dos eventos

pluviométricos em torno de quatro a cinco meses, e o restante do ano é caracterizado por apresentar escassez hídrica. Fato que, associado a elevadas demandas da atmosfera (Figura 3).

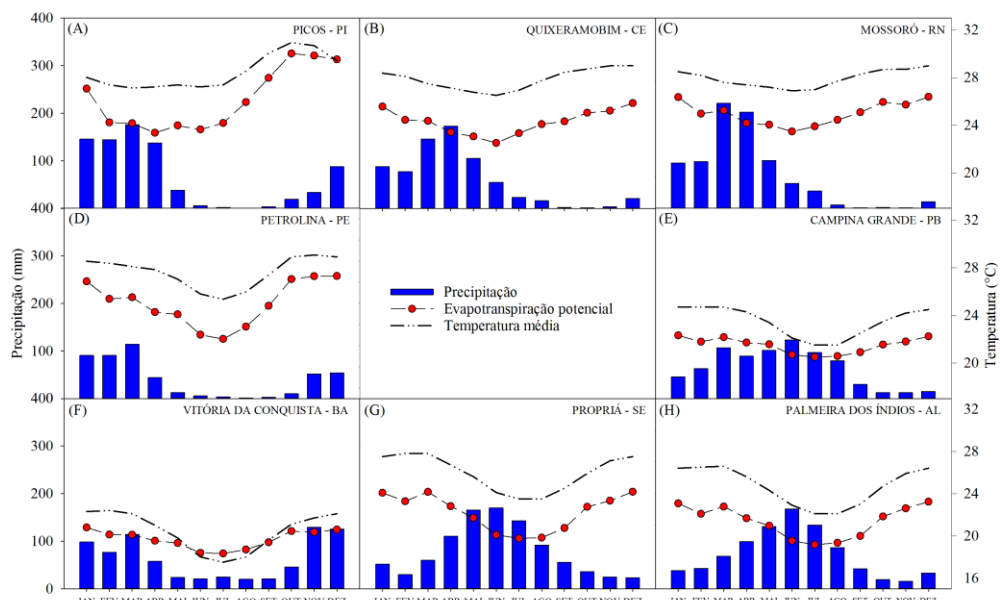


Figura 3. Média histórica mensal de precipitação (mm), evapotranspiração potencial (mm) e temperatura (°C) de municípios localizados em diferentes estados do Semiárido brasileiro.

O clima no Sertão Nordestino brasileiro apresenta precipitações máximas na estação verão/outono e mínimas no inverno, como evidenciado na região R7 (Figura 4A). Essa região é diretamente influenciada pela atuação de sistemas atmosféricos que determinam a distribuição espaço-temporal das chuvas. Tais sistemas atmosféricos são oriundos do ramo descendente da atividade convectiva na Amazônia, Zona de Convergência Intertropical - ZCIT, Vórtices

Ciclônicos de Altos Níveis subtropicais e tropicais - VCANs, frentes frias e quentes, e o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul – ASAS (Reboita et al., 2010; Jardim et al., 2019; Jardim et al., 2021c) (Figura 4B). Esses distúrbios são influenciados pela temperatura da superfície do mar (TSM), interferindo diretamente na ocorrência de períodos mais úmidos ou mais secos no Nordeste brasileiro (Alves et al., 2015; Marengo et al., 2011; Costa et al., 2021).

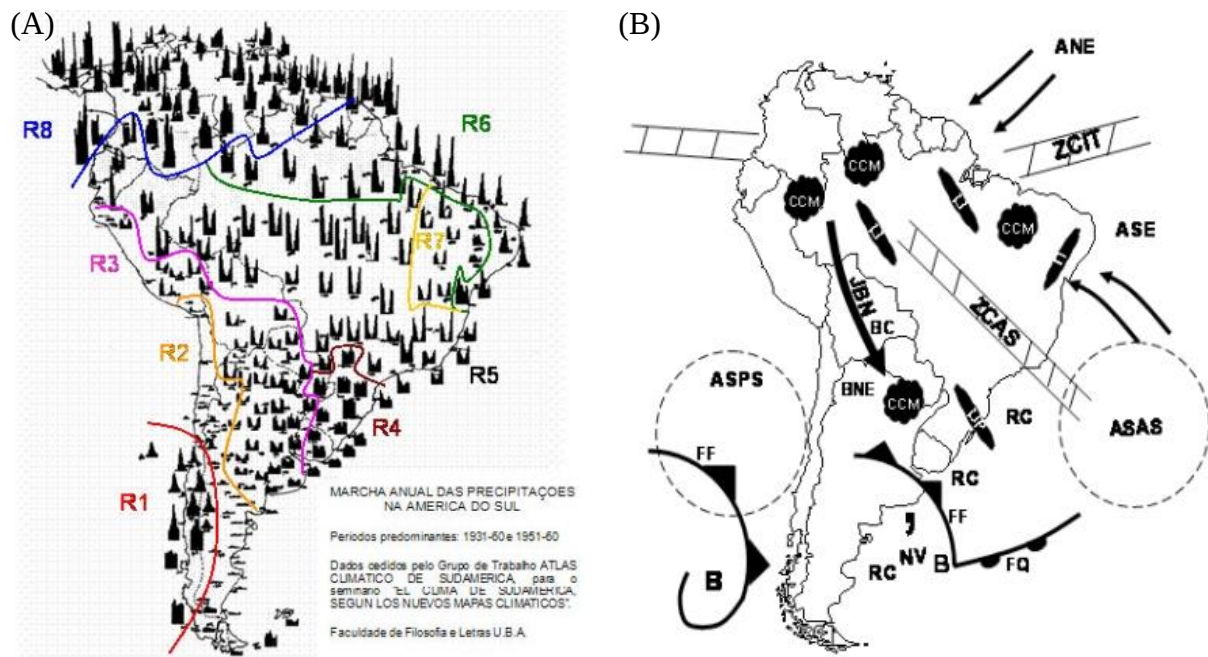


Figura 4. Regionalização dos diferentes regimes pluviométricos (A) e sistemas atmosféricos de Baixa Troposfera (B) na América do Sul (Fonte: REBOITA et al., 2010).

A vegetação sazonalmente seca presente no Semiárido brasileiro é a Caatinga, que comporta em torno de 5.300 espécies (Althoff et al., 2016; Alves et al., 2015; de Almeida et al., 2019; Queiroz et al., 2021). Esse bioma tem como principal característica espécies xerofíticas, lenhosas com topos descontínuos, cuja forma principal são espécies suculentas (cactos) e arbustos, situados em solos sedimentares, e vegetação decíduas e semidecíduas em locais de solos mais ricos de nutrientes (Silva e Lacher, 2020; Queiroz et al., 2019). Quase 80% da Caatinga teve alteração de sua forma natural (Vieira et al., 2013). Tais modificações podem ser oriundas de três principais causas: a substituição de grandes áreas de vegetação nativa por áreas de agricultura comercial, reservatórios hídricos, além da construção de rodovias; modificações severas diante de práticas como corte e queima; além da

introdução de espécies exóticas de animais e plantas (Silva e Lacher, 2020).

Tais processos contínuos e de intensa modificação no bioma Caatinga associados com as adversidades climáticas da região ocasionam perdas de biodiversidade, redução da fertilidade do solo e aceleração dos processos erosivos (Silva et al., 2017; Souza et al., 2015). Como consequência há efeitos na atividade agropecuária, por causa das implicações no clima local e no aporte forrageiro para os animais. Diante desse cenário é fundamental a adoção de práticas resilientes para atenuar as oscilações socioeconômicas da região (Queiroz et al., 2015; Silva et al., 2017).

Culturas forrageiras de potencial regional

As plantas forrageiras, de modo geral, possuem alta capacidade de aproveitamento da energia solar, além do frequente cultivo em locais

com características limitantes para outras culturas (Marsalis et al., 2010; Putnam e Orloff, 2014). A falta de informações acerca de espécies adaptadas limita as tomadas de decisões com o objetivo de reduzir os riscos de produção. Diante disso, diversos estudos (Jahanzad et al., 2013; Queiroz et al., 2018; Queiroz et al., 2015; Silva et al., 2017) recomendam a utilização de fontes alternativas de forragens com características resilientes a condições ambientais extremas. Essas fontes alimentícias podem aperfeiçoar e maximizar os sistemas de produção local, sobretudo no período de escassez hídrica. A palma forrageira, e.g., produz de quatro a cinco vezes mais matéria seca por milímetro de chuva do que qualquer outro tipo de planta, por causa do seu metabolismo ácido das crassuláceas (Degu et al., 2009; Taiz et al., 2017).

Outras culturas com características adaptativas da região (e.g., leguminosas, gramíneas e oleaginosas) apresentam-se como importantes alternativas para a minimização dos efeitos biogeoquímicos e aumento na dinâmica da matéria orgânica do solo. Logo, a alimentação combinada

da palma com essas culturas proporciona alternativa com potencial de suprir as necessidades nutricionais e energéticas dos animais, principalmente no período de maior escassez hídrica, contribuindo com a mitigação do sistema produtivo da pecuária (Gusha et al., 2015; Medeiros et al., 2015).

Sorgo forrageiro

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é uma planta herbácea da família Poaceae, subfamília Panicoideae, tribo Andropogoneae e gênero *Sorghum* (Pourhadian et al., 2019; Jardim et al., 2020a). A planta possui espículas hermafroditas, misturadas com masculinas em uma panícula terminal, sendo as glumas das espículas ovóides, tridentadas na ponta. Normalmente, é uma espécie com ciclo anual, têm colmos altos e espessos, cheios de uma seiva doce. As folhas apresentam formas lineares, compridas e largas, além de sistema radicular com raízes adventícias bem desenvolvidas e profundas (Figura 5) (Pereira e Cardoso, 1987).

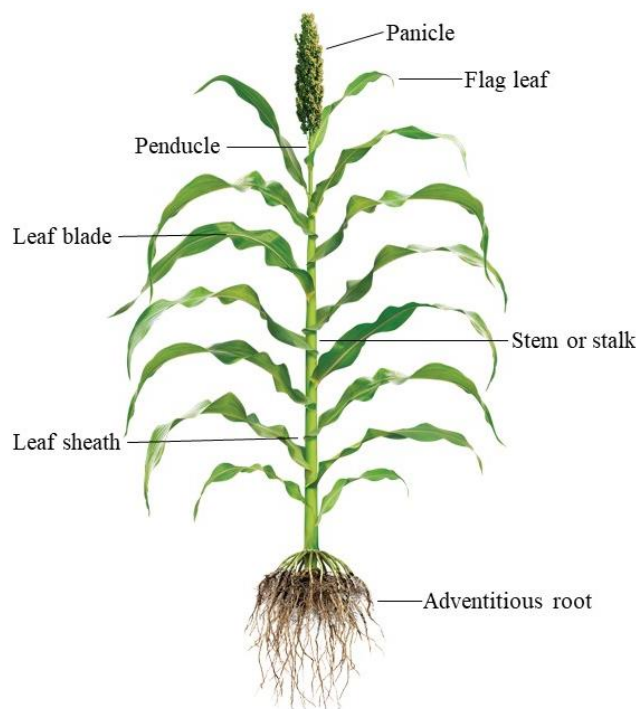


Figura 5. Características morfológicas da cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* L.).

Além da importância nutricional, o sorgo tem alta eficiência no uso da água devido ao seu metabolismo fisiológico C₄. A cultura é amplamente utilizada para ração animal no Semiárido brasileiro por ser fonte de energia e carboidratos, e também pela sua boa aceitabilidade

e fácil digestibilidade (Taiz et al., 2017; Von et al., 2014).

O sorgo se destaca pelo bom rendimento produtivo, eficiente adaptabilidade a diversas condições de fertilidade do solo, tolerância a altas temperaturas do ar e condições hídricas deficitárias, sendo possível o cultivo em uma ampla

faixa de altitudes. Tais características elevam a importância do sorgo (Pino e Heinrichs, 2017). Economicamente, o sorgo forrageiro é mais viável que outras plantas forrageiras, devido à menor necessidade de irrigação e fertilização (Bhat, 2019). Pino e Heinrichs (2017) ratificaram que, sob sistemas com lâminas limitadas de irrigação, o sorgo tem maior produtividade do que o milho. Além disso, o plantio do sorgo pode ser depois do milho, e algumas variedades têm maior capacidade

de rebrota, o que permite outras colheitas dentro de uma única estação chuvosa.

O país que mais produz sorgo no mundo é os Estados Unidos da América, com média anual equivalente a 9,7 milhões de toneladas (Tabela 1), representando 15% de toda produção global. No Brasil, a produção de sorgo é o equivalente a 3% da produção mundial, ou seja, cerca de 1,93 milhões de toneladas anuais.

Tabela 1. Principais países produtores de sorgo no mundo.

Países	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Média
Milhões de toneladas									
Estados Unidos	8,78	5,41	6,29	9,97	10,99	15,16	12,20	9,24	9,75
Nigéria	7,14	5,69	5,84	5,30	6,88	7,01	7,56	6,94	6,54
México	6,94	6,43	6,97	6,31	8,39	5,20	5,01	4,85	6,26
Índia	6,70	7,00	5,98	5,28	5,54	5,45	4,24	4,57	5,60
Etiópia	3,96	3,95	3,60	3,83	4,34	4,77	4,75	4,82	4,25
Mundo	62,62	58,83	59,85	64,76	71,14	68,76	65,65	60,40	64,00
Brasil	1,53	1,93	2,02	2,13	2,28	2,14	1,15	2,22	1,92

Fonte: FAOSTAT (2019)

De acordo com dados da FAOSTAT (2019), aproximadamente 43 milhões de hectares são utilizados na plantação de sorgo. Deste total, 14,8% estão situadas na Índia, ou seja, 6,4 milhões de hectares (Figura 6). No Brasil, a área utilizada

para cultivo de sorgo ainda é bem inferior às demais áreas utilizadas pelos principais produtores de sorgo no mundo. Em média, apenas 722 mil hectares são cultivados sorgo por ano no Brasil (Figura 6).

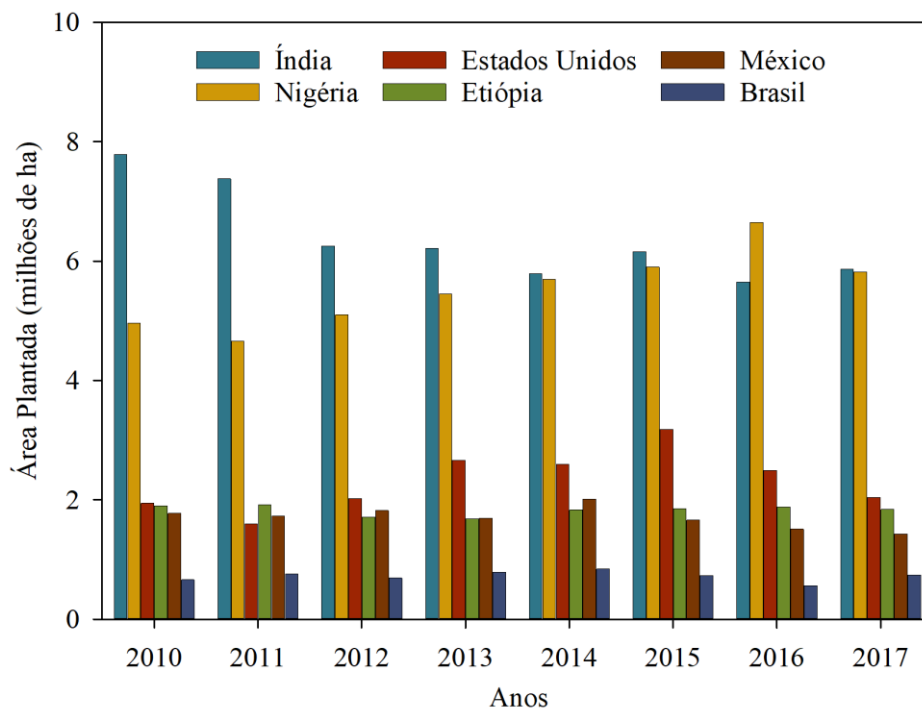


Figura 6. Área plantada de sorgo dos principais países produtores do mundo (FAOSTAT, 2019).

No Brasil, o estado de Minas Gerais é o maior produtor de sorgo. De acordo com o Acompanhamento da Safra Brasileira de 2017/18 (CONAB, 2018), esse Estado respondeu por 34,3% da produção nacional (Tabela 2). Por sua vez, a região Centro-Oeste do país foi a que mais

produziu sorgo na última safra 2017/18, com parcela de 43% da produção nacional. A região do Sudeste evidenciou a maior produtividade do País ($3,4 \text{ toneladas ha}^{-1}$) e, no Nordeste, a Bahia produziu 24,1 e 4,6% da produção regional e nacional nessa ordem.

Tabela 2. Levantamento da safra 2017/18 do sorgo no Brasil. Fonte: CONAB (2018).

Região	Área (mil ha)	Produção (mil ton)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
Norte	32,7	53,9	1.651
TO	28,6	41,6	1.456
Nordeste	224,7	407,1	1.812
PI	16,5	8,5	514
RN	1,3	1,7	1.346
PB	1,2	2,0	1.700
BA	100,1	98,2	981
Centro-Oeste	295,1	891,6	3.022
MT	51,7	126,0	2.438
MS	7,0	24,5	3.500
GO	229,2	710,5	3.100
DF	7,2	30,6	4.250
Sudeste	220,7	758,2	3.436

MG	210,4	732,8	3.483
SP	10,3	25,4	2.470
Sul	9,0	25,0	2.777
RS	9,0	25,0	2.777
Brasil	782,2	2.135,8	2.731

Milheto

O milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) é uma planta de origem tropical, da família Poaceae, subfamília Panicoideae, gênero *Pennisetum* (Bruken, 1977). Esta cultura caracteriza-se pelo ciclo precoce, alta qualidade nutritiva e elevado potencial de produção. O milheto é uma excelente alternativa de resiliência para a regiões semiáridas em períodos de escassez hídrica, podendo-se obter a colheita de grãos ou utilizá-lo como forragem suplementar (Kollet et al., 2006; Payne, 2000; Souza et al., 2019).

Esta cultura é caracterizada com uma gramínea de porte ereto, com ciclo anual entre 75 e 120 dias, variando de acordo com as condições ambientais. Normalmente, a cultura tem um rápido crescimento, com altura média de 1,5 a 3 m. A planta desenvolve panículas cilíndricas compactas

de 2 a 3 cm de largura e 15 a 60 cm de comprimento, capazes de produzir de 500 a 2.000 sementes por panícula (Dias-Martins et al., 2018; Taylor, 2016).

Geralmente, o milho apresenta colmos lisos, com diâmetro entre 1 e 2 cm, situados abaixo da panícula e que podem apresentar ramificações de segunda e terceira ordem a partir de gemas laterais dos nós. Em condições normais, o milho produz uma abundante folhagem devido ao perfilhamento frequente (Durães et al., 2003). As folhas expõem comprimento e largura de até 100 e 80 cm, respectivamente, podendo ser lisas ou de superfícies e lígolas pilosas. A nervura pode ser proeminente ou não, tombada ou para cima. Podem ser encontrados estômatos em ambos os lados da superfície foliar, com densidade variando entre 50 e 80 mm m⁻² (Figura 7) (Durães et al., 2003).

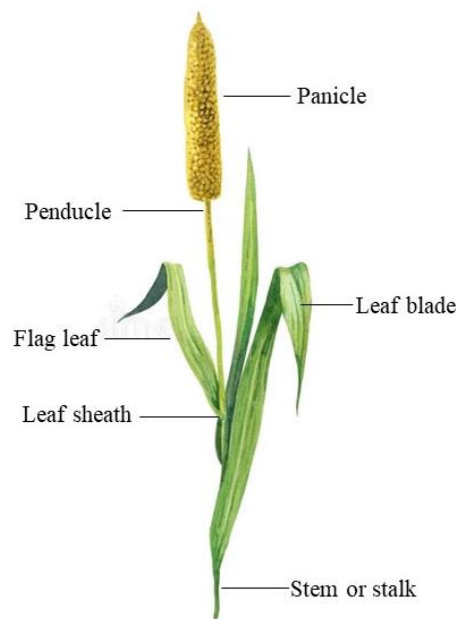


Figura 7. Características morfológicas da cultura do milheto (*Pennisetum glaucum* L.).

O surgimento das raízes ocorre nos nós inferiores da planta, sendo apenas uma raiz seminal com existência variando entre 45 e 60 dias. Já as raízes de segunda ordem se desenvolvem no primeiro nó, constituindo-se por um par de radículas (Durães et al., 2003).

Quando comparadas a culturas cereais, o milho expõe resistência ao déficit hídrico, solos com baixa fertilidade, elevada salinidade, altas temperaturas e baixo pH. Tais qualidades estão diretamente associadas ao seu extenso sistema radicular, que permite a absorção de água e

nutrientes das camadas mais profundas do solo (Devi et al., 2014).

De acordo com a FAOSTAT (2019), os cinco principais países com maiores áreas de plantações de milho no mundo são Índia, Níger, Nigéria, China e Mali (Figura 8). A Índia planta, em média, 9,9 milhões de hectares por ano, equivalente a 30% de toda área cultivada com

Milho no mundo. Todavia, no período compreendido entre os anos 2010 e 2017, percebe-se redução de 16,5% das áreas plantadas nos principais países produtores de milho (FAOSTAT, 2019) (Figura 8).

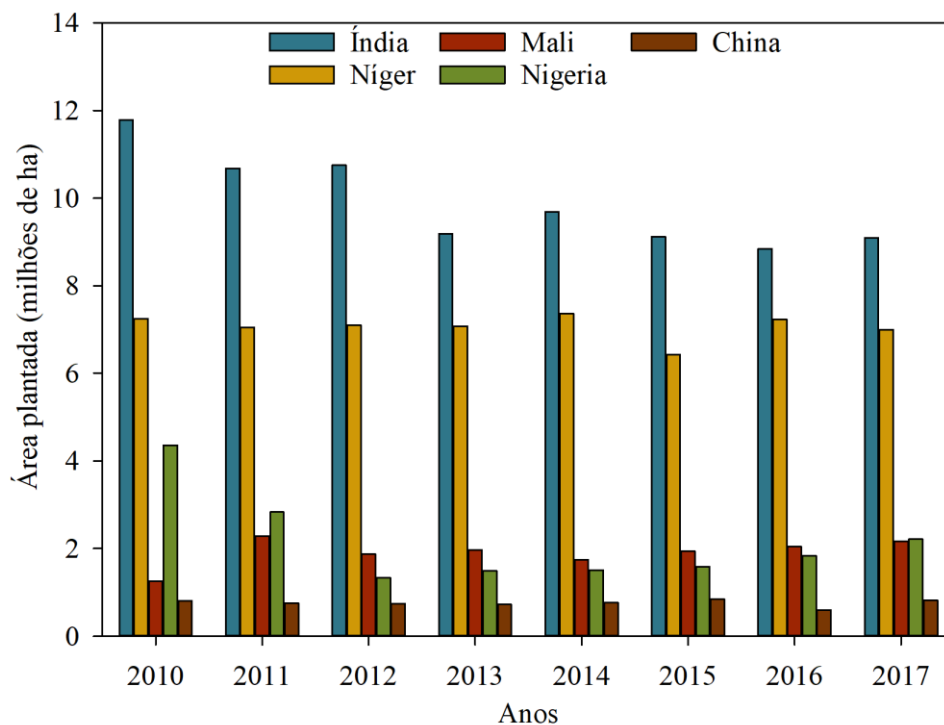


Figura 8. Área plantada de milho com os principais países produtores do mundo (FAOSTAT, 2019).

No cenário de produção agrícola mundial (Tabela 3), a Índia destaca-se como o maior produtor, responsável por aproximadamente 40,4% de toda produção de Milho no mundo, seguido

por Níger (12,1%), Nigéria (6,4%), China (6,3%), Mali (5,9%), além da soma produtivas dos outros países (28,9%) (FAOSTAT, 2019).

Tabela 3. Principais países produtores de milho no mundo.

Países	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Média
Milhões de toneladas									
Índia	13,29	12,66	10,75	10,91	11,42	11,63	10,28	11,56	11,56
Níger	3,84	2,76	3,86	2,92	3,32	3,40	3,89	3,79	3,47
Nigéria	5,17	1,27	1,28	0,91	1,40	1,49	1,55	1,50	1,82
China	1,57	1,57	1,80	1,75	2,34	1,97	1,39	2,00	1,80
Mali	1,37	1,46	1,68	1,85	1,72	1,86	1,81	1,81	1,70
Mundo	32,80	27,05	26,64	26,43	28,45	30,18	29,05	28,46	28,63

Fonte: FAOSTAT (2019)

Feijão-guandu

O feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Mill sp.) é uma leguminosa que se originou na região Norte da Índia (Khoury et al., 2015). A planta desenvolve-se bem sob as condições climáticas brasileiras, desde a região Sul até o Nordeste (Amabila et al., 2008). Possui vários nomes culturais pelo Brasil, como: guandu, guando, gandu, andu, entre outros. Em outras regiões do mundo pode ser nomeado por pigeon pea (inglês), tur e arhar (hindi), gandul (espanhol), poid

d'Angole e Poid de Congo (francês) (Pal et al., 2011; Sewsaran et al., 2019).

Morfológicamente, o feijão-guandu apresenta caule com característica lenhosa e raiz pivotante, com comprimento que superam um metro. Essa planta pode exibir raízes secundárias situadas nos primeiros 30cm do solo e nódulos com bactérias do gênero *Rhizobium* que fixam nitrogênio por meio simbiótico (Figura 9) (Seiffert e Thiago, 1983), logo, melhora a fertilidade do solo (Khoury et al., 2015).

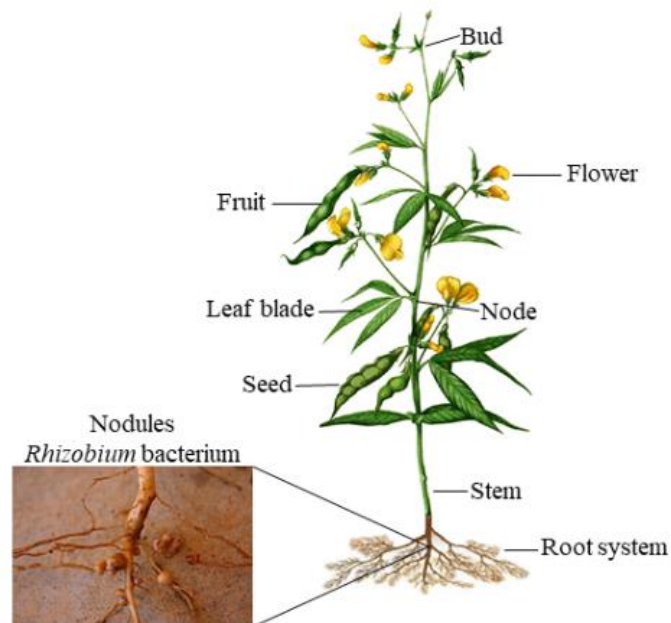


Figura 9. Características morfológicas da cultura do feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Mill sp.)

Mediante as características supracitadas, o feijão-guandu é amplamente cultivado em sistema de consórcio com outras culturas, pois minimiza a competição por nutrientes. É amplamente empregado em configurações de consórcios com cereais como, milho e sorgo. Upadhaaya et al. (2014) citam que as plantas de feijão-guandu fixam em torno de 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio, além de adicionarem matéria orgânica ao solo através da queda de folhas com quantitativo de até 3,1 ton ha⁻¹.

Normalmente, o feijão-guandu é cultivado por pequenos agricultores no início do período chuvoso, oferecendo boa adaptação a diversos sistemas produtivos, como: plantio direto, convencional e consorciada com outras culturas. É usado ainda na alimentação animal sob forma de componente de mistura de silagem, forragem verde e feno (Godoy et al., 2003; Wenwer, 1979). Subbarao et al. (2000) afirmam que o feijão-guandu é mais resistente a elevadas temperaturas e

condições hídricas do que a maioria das leguminosas, que se deve ao ajuste osmótico foliar, que mantém processos fotossintéticos ativos mesmo em condições estressantes (Subbarao et al., 2000; Lopez et al., 1987).

A maturação completa é a principal característica de seleção para esta cultura (Mligo e Craufurd, 2005). Já a maturação precoce é uma característica adaptativa e adequada a condições climáticas de baixa pluviosidade e para solos com baixa retenção de umidade. As cultivares de maturação tardia são eficientes na tolerância a condições adversas, como estresse hídrico e térmico. Summerfield e Lawn (1987) enaltecem que ciclos mais longos favorecem a recuperação dos estresses adversos, devido ao maior tempo e plasticidade fenológica da cultura.

Em termos de produção do feijão-guandu, anualmente cerca de 4,41 milhões de toneladas são colhidas no mundo. A Índia se destaca como o maior produtor, com média de 3 milhões de

toneladas anuais, representando 69% da produção mundial (Tabela 4).

Tabela 4. Principais países produtores de feijão guandu no mundo.

Países	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Média
	Milhões de toneladas								
Índia	2,46	2,86	2,65	3,02	3,17	2,81	2,56	4,87	3,05
Myanmar	0,82	0,58	0,55	0,58	0,58	0,60	0,63	0,80	0,64
Malawi	0,19	0,22	0,24	0,29	0,32	0,34	0,37	0,47	0,30
Tanzânia	0,17	0,27	0,21	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,24
Haiti	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,11	0,11	0,12	0,09
Mundo	3,79	4,08	3,80	4,30	4,48	4,19	4,01	6,60	4,41

Fonte: FAOSTAT (2019)

Girassol Forrageiro

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é uma cultura dicotiledônea anual, pertence à família Asteraceae, e tem origem na América do Norte (Sinha et al., 2017). É uma das principais oleaginosas do mundo, contribuindo com 8% no mercado mundial de oleaginosas (USDA, 2017).

O girassol contém aproximadamente 45% de óleo e 18,5% de proteína, apresentando potencial na produção de óleo comestível e ração animal (Hussain et al., 2018). É uma cultura adaptada a regiões tropicais e subtropicais, com climas árido e semiáridos, e que, geralmente, são cultivadas em condições de sequeiro ou com irrigações complementares (Robert et al., 2016)

Morfológicamente, essa cultura apresenta sistema radicular bem desenvolvido, podendo atingir até 4 metros de profundidade, com a raiz pivotante, e 50 centímetros de diâmetro, com suas raízes laterais (Figura 10), sendo que o desenvolvimento do sistema radicular é mais rápido em comparação ao desenvolvimento das folhas. Normalmente, o número de folhas é uma característica genética e é ligeiramente afetado por fatores ambientais. A inflorescência é composta por flores sésseis anexadas em um receptáculo comum em discoide e rodeada por um involúcro de brácteas, surgindo da extremidade superior do caule (Figura 10), denominado de capítulo (Alberio et al., 2015).

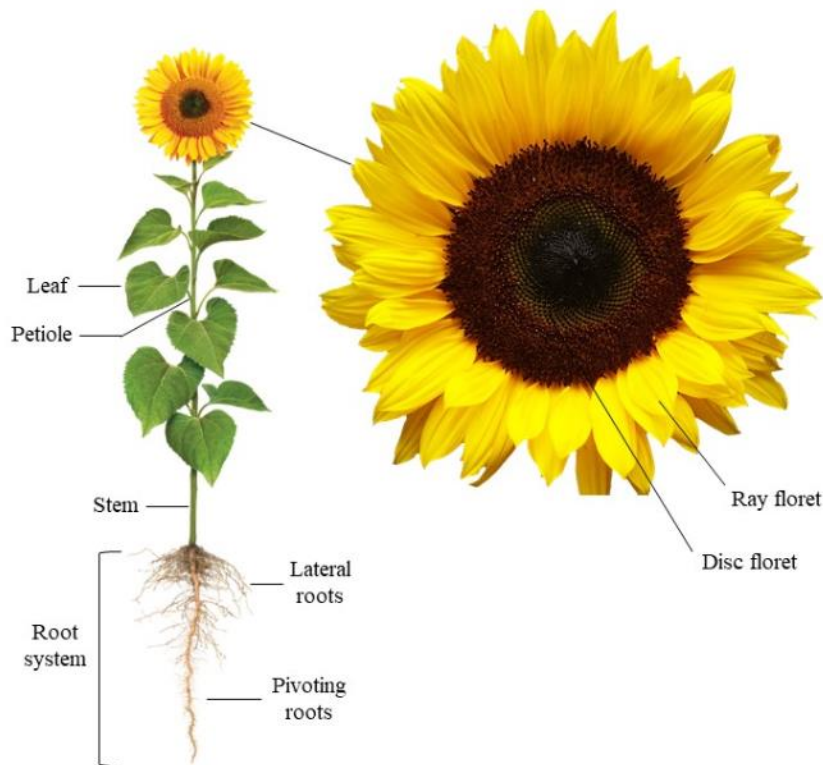


Figura 10. Características morfológicas da cultura do girassol (*Helianthus annuus* L.).

O girassol é uma cultura de metabolismo C_3 , apresentando suas folhas, os botões apicais e as inflorescências em desenvolvimento como diaheliotrópicos, ou seja, altera sua posição e que, normalmente, se volta para o sol ao longo do dia. À noite, os órgãos do girassol sofrem movimento não mediado pela luz, reorientando-se para a posição leste ao amanhecer (Vandenbrink et al., 2014).

Os maiores produtores mundiais são a Rússia, Ucrânia, União Europeia e Argentina

(USDA, 2018). O Brasil registra uma produção média anual de aproximadamente 104,1 mil toneladas, a partir de uma área média equivalente a 71,8 mil hectares por ano, obtendo produtividade média de $1,45 \text{ ton ha}^{-1}$ (Figura 11) (CONAB, 2020). Como evidenciado na Figura 11, houve pouca alteração na produção e abrangência de área cultivada com girassol ao longo do período 2000-2019, com aproximadamente 7,7 e 7,6%, respectivamente.

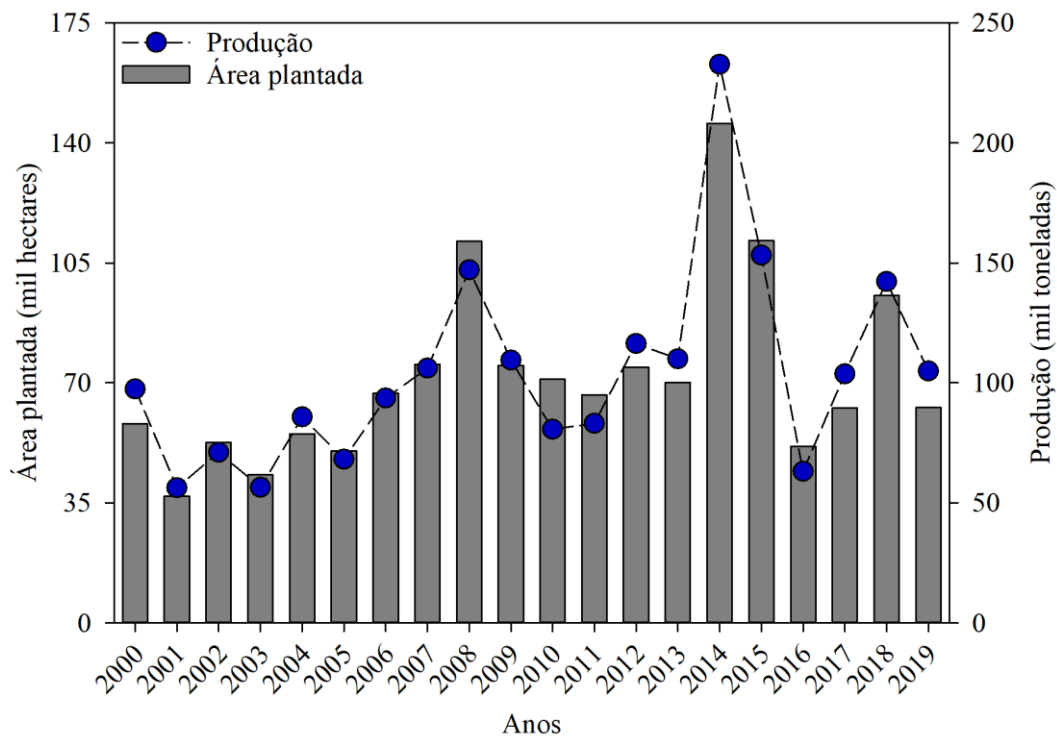


Figura 11. Média histórica da área plantada e produção do girassol no Brasil.

O Estado do Mato Grosso é o maior produtor brasileiro, com aproximadamente 50% da produção nacional e produtividade 2,2% superior à produtividade média do Brasil (CONAB, 2020).

Palma forrageira

A palma forrageira tem origem na América tropical e subtropical, pertence ao Reino: Plantae; Divisão: Embryophyta; Subdivisão: Angiospermea; Classe: Dicotyledoneae; Ordem: Opuntiales; Família: Cactaceae (Taguchi et al., 2017; Jardim et al., 2020b). No semiárido brasileiro, os clones de palma dos gêneros *Opuntia* sp. e *Nopalea* sp. são os mais cultivados. A seleção desses clones ocorre pela sua resistência à cochonilha-do-carmim (*Dactylopius opuntiae*), considerada como sua principal praga (Barbosa et al., 2018; Queiroz et al., 2015; Silva et al., 2015).

Morfológicamente, caracteriza-se como uma planta arbustiva ou arbórea, podendo atingir até 6 m de altura. Geralmente, apresenta cladódios achatados e em formato elíptico, com comprimento entre 20-50 cm e largura entre 20-30 cm, espessura com aproximadamente 2 cm, coloração verde e uma fina camada cerosa (minimizando a perda

hídrica por transpiração e aumentando a proteção contra organismos patógenos), além de aréolas localizadas entre 2-5 cm de distância (Figura 12A). A planta possui sistema radicular bem desenvolvido, atingindo profundidade máxima em torno dos 30 cm, mas podendo espalhar-se por até 8 m. Apresenta raízes de rápida absorção de água disponível, além de restrição da superfície radicular e diminuição de sua permeabilidade à água, quando não há disponibilidade hídrica no solo, afim de evitar as perdas de água para o solo seco (Taguchi et al., 2017).

Por se tratar de uma cactácea, a palma forrageira apresenta características fisiológicas que lhe permitem pleno desenvolvimento vegetativo em regiões áridas e semiáridas, devido ao metabolismo ácido das crassuláceas (MAC) (Niechayev et al., 2019; Yahia e Sáenz, 2011; Nobel, 1995). As culturas de metabolismo MAC são fotossinteticamente adaptadas a condições ambientais, cuja disponibilidade hídrica sazonal, com características que minimizam as perdas de água, como quantidade resumida de estômatos e com pequenas aberturas, grandes vacúolos e cutículas grossas (Niechayev et al., 2019; Taiz et al., 2017).

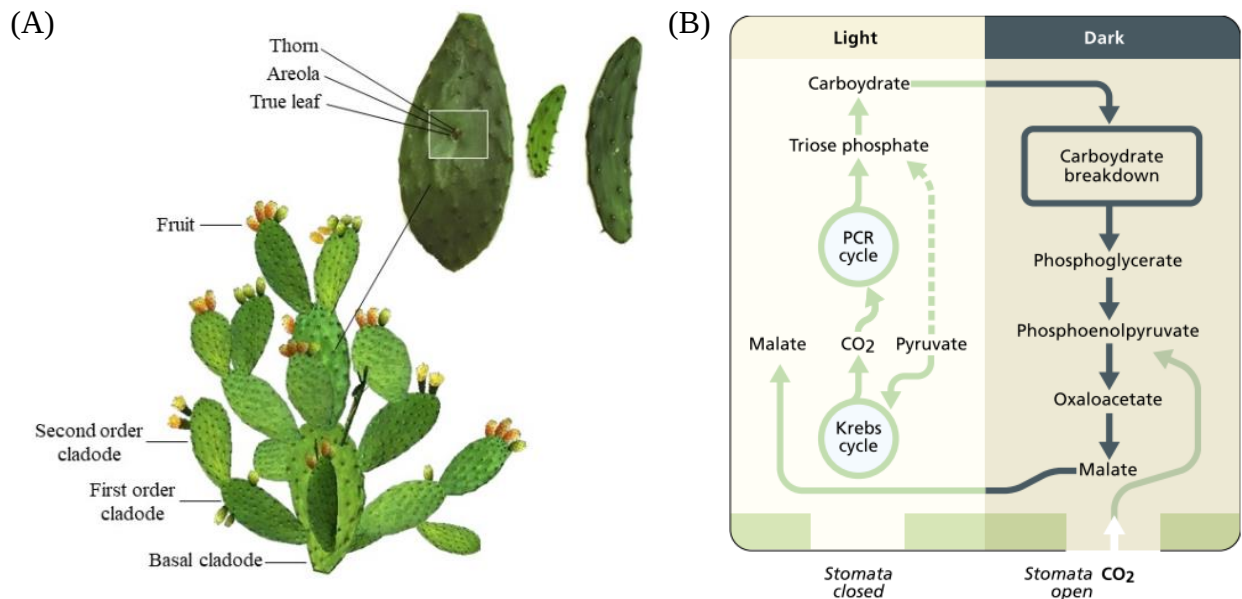


Figura 12. Características da palma forrageira, desde seus aspectos morfológicos (A), e ilustração do seu metabolismo ácido das crassuláceas (B). Adaptado de Taguchi et al. (2017).

As plantas MAC iniciam o processo de abertura dos estômatos somente à noite, quando o déficit de pressão de vapor é mais baixo, proporcionando a fixação de CO_2 atmosférico em ácidos de quatro carbonos e posterior armazenamento nos vacúolos (Figura 12B). Durante o dia os estômatos se fecham, ocorrendo a descarboxilação e conversão do malato em carboidratos (açúcares, polissacarídeos ou amido). Esse processo fisiológico proporciona maior eficiência no uso da água e minimiza as perdas por transpiração (Cushman, 2017; Taiz et al., 2017).

Tais características permitem a essa cactácea, além da adaptação a ambientes secos, maior capacidade de conversão dos recursos naturais em acúmulo de biomassa. Com eficiência

na produção cinco vezes maior que plantas com metabolismo C_3 e três vezes maior que plantas C_4 , alcançando valores entre 100 e 150 kg de água por kg de matéria seca (Cano et al., 2017; Iqbal et al., 2020; Jardim et al., 2020c).

Paiva et al. (2016) afirmam que os perfis bioativos da palma mudam de acordo com a espécie, as cultivares e as condições climáticas existentes. Quando submetidas a ambientes com condições hídricas não limitantes, a palma, assim como a maioria das plantas MAC, pode alterar seu desenvolvimento metabólico a níveis mais semelhantes às apresentadas pelas plantas com metabolismo C_3 (Figura 13), processo definido como MAC facultativa (Niechayev et al., 2019).

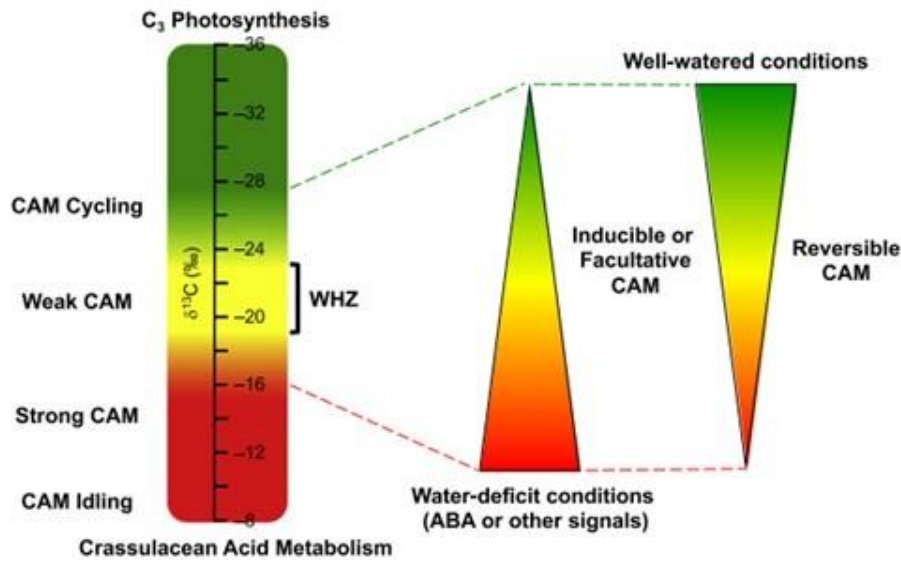


Figura 13. Distribuição da fotossíntese do metabolismo C_3 ao metabolismo ácido das crassuláceas (MAC) ao longo de um gradiente contínuo derivado de pesquisas em larga escala dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) (CUSHMAN, 2017).

Mediante essas características, o cultivo da palma no semiárido representa uma importante alternativa para aumento do rendimento de biomassa com baixos custos de produção, devido a sua alta eficiência no uso da água e nutrientes, alto conteúdo de água nos cladódios (85-90%) e rápido estabelecimento (Moraes et al., 2019; Silva et al., 2017). Essas características tornam a palma tolerante a ambientes com elevado déficit hídrico e condições climáticas irregulares (Iqbal et al., 2020).

No Brasil, a área de produção é de aproximadamente 500.000 ha, distribuídos pelos estados nordestinos da Paraíba, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Bahia, Rio Grande do Norte e Ceará. A maior parte da produção é destinada à alimentação animal, produzidos por pequenos agricultores familiares (Taguchi et al., 2017).

O manejo agrícola e as condições ambientais influenciam diretamente nas características de desenvolvimento da palma forrageira. Seus cladódios são capazes de manter uma pequena taxa de crescimento mesmo em condições hídricas muito baixas, aumentando rapidamente com a elevação da umidade do solo, evidenciando-se a importância da agricultura irrigada (Scalisi et al., 2016), com disponibilidades pluviométricas ideais entre 1048 e 1096 mm ano⁻¹ para elevadas produções (Queiroz et al., 2015). No entanto, altas produções de palma forrageira podem ser alcançadas com lâminas de irrigações de 40 a 50% da ET_0 (Castro et al., 2020).

As diferentes intensidades de corte afetam o rendimento final da palma forrageira. Os cortes com a manutenção dos cladódios primário e/ou secundários proporcionam maiores produtividades e eficiência do uso da água que os cortes preservando apenas o cladódio basal (Pereira et al., 2020). Além destes, fatores como a adubação, espaçamento entre plantas (Lédo et al., 2019; Vazquez Mendoza et al., 2019), salinidade da água de irrigação (Fonseca et al., 2019), também são citados como condicionantes do desenvolvimento da palma forrageira.

Lacunas entre níveis de produtividade "Yield Gap"

A ampliação sustentável dos sistemas agrícolas, com o propósito de aumentar a produtividade das culturas nas terras agrícolas disponíveis, tem-se caracterizado como uma das mais viáveis e eficientes formas de satisfazer à demanda futura de alimentos no mundo (Beza et al., 2017; Godfray et al., 2010; Visses et al., 2018). Diferentes conceitos e metodologias foram desenvolvidos a fim de elucidar as quebras de produtividade considerando o potencial climático e biológico das culturas, e as reais produtividades obtidas pelos agricultores (Silva et al., 2017).

O termo "Yield Gap" é mundialmente adotado, fundamentando-se nos distintos modelos ecológicos de produção, e sua estimativa pode ser obtida pela diferença entre uma medida potencial de referência e a produtividade real. Sua análise comporta uma base de dados na identificação de

magnitudes e principais fatores que influenciam na produtividade das culturas agrícolas, proporcionando valiosas informações na definição das estratégias para a segurança alimentar e energética (Lobell et al., 2009; Pourhadian et al., 2019; Sentelhas et al., 2015; Van Ittersum e Rabbinge, 1997; Van Ittersum et al., 2013; Zu et al., 2018).

Atualmente existem diversos estudos na literatura mundial sobre “Yield Gap”, no entanto, tais publicações apresentam divergências nos conceitos acerca da estimativa dos déficits de produtividades agrícolas (Fischer, 2015). Logo, diferentes conceitos sobre os níveis específicos de produtividade são adotados. Lobell et al. (2009) estabeleceram quatro níveis de produtividades, sendo considerada como potencial aquela mais alta, seguida pelas obtidas em experimentos, e as produtividades máximas e médias obtidas pelos agricultores.

Outros estudos classificam as produtividades em três níveis, sendo o maior caracterizado como a potencial, e consecutivamente, as atingíveis e reais obtidas pelos agricultores. Esses estudos analisaram a diferença entre a produtividade potencial (PP) e a

atingível (PA), caracterizadas como valores de referência, que resultam no déficit de produtividade pela insuficiência hídrica. Já com a diferença entre a PA e a produtividade real dos agricultores (PR) para condições de sequeiro é possível identificar a lacuna de produtividade mediante o manejo abaixo dos valores ideais (Battisti et al., 2018; Bhatia et al., 2008; Lobell et al., 2009; Sentelhas et al., 2015; Zu et al., 2018). Por outro lado, Li-Guo et al. (2018) limitaram em apenas dois níveis de produtividades, a atingível e a real obtida pelos agricultores.

Apesar das distinções sobre esses conceitos, é de consenso geral a ideia de que a maior produtividade é a potencial, cujo valor é teórico, observando-se as características envolvidas em condições reais de campo (Figura 14). De modo geral, a Produtividade Potencial (PP) é atingível pela cultura na ausência de fatores limitantes como hídricos, nutricionais e sem a interferência de pragas, ervas daninhas ou doenças, limitando-se a fatores climáticos (radiação solar, temperatura e fotoperíodo) juntamente com as características dos genótipos das plantas e o adensamento do cultivo (Sentelhas et al., 2015; Van Ittersum et al., 2013; Zu et al., 2018).

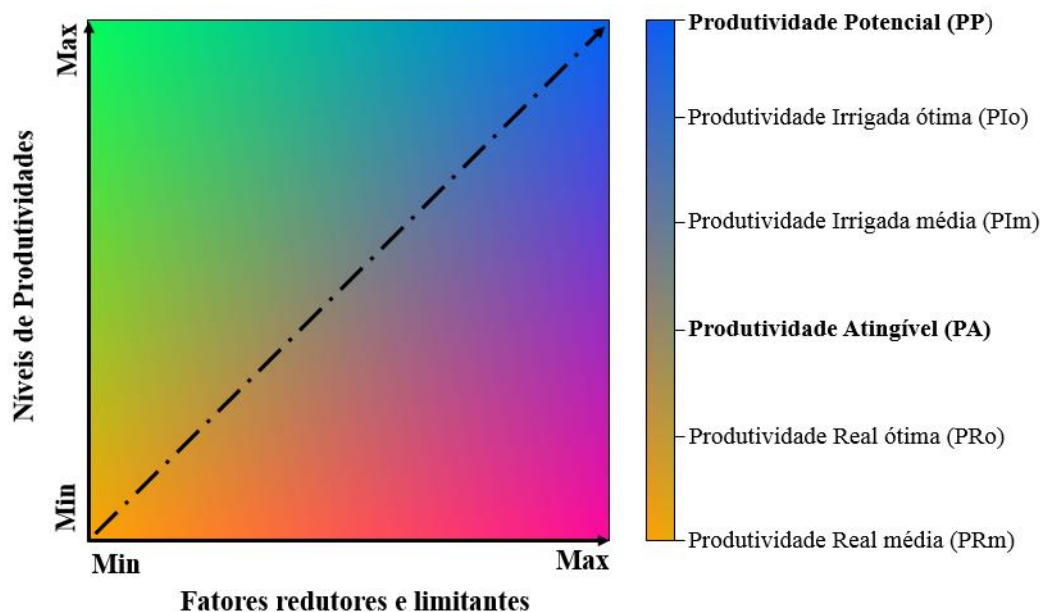


Figura 14. Níveis de produtividade agrícola mediante fatores agroclimáticos. Adaptado de Sentelhas et al. (2015); Van Ittersum et al. (2013).

A estimativa ou determinação da PP (Figura 14) pode ser realizada a partir de pesquisas experimentais em campo, cujos fatores hídricos sejam ideais e haja total controle do manejo da cultura, ou mediante uso de modelos de simulação

adequadamente calibrados, considerando-se um manejo e condições climáticas ideais para o total desenvolvimento da espécie (Lobell et al., 2009; Sentelhas et al., 2015; Van Ittersum et al., 2013; Zhang et al., 2019).

Para as culturas cujas necessidades hídricas são supridas mediante o uso de irrigação total ou complementar, obtém-se o nível de Produtividade Irrigada (PI) com nível inferior a potencial (Figura 14). A Produtividade Irrigada (PI) pode destacar-se como um nível de produtividade maior, considerado como a Produtividade Irrigada ótima (PIo), quando a lâmina de irrigação é aplicada com a máxima eficiência possível a fim de se atender as necessidades hídricas da cultura, ou um rendimento menor. Já a Produtividade Irrigada média (PIm) é verificada quando as necessidades hídricas da cultura não são supridas pelo manejo de irrigação (Sentelhas et al., 2015; Van Ittersum et al., 2013).

A Produtividade Atingível (PA) é influenciada por fatores limitantes, como déficit hídrico e nutricional. Este nível de produtividade é alcançado apenas em condições ideais de fitossanidade, ou seja, sem que fatores redutores como doenças, pragas e ervas daninhas que influenciam no crescimento e desenvolvimento da cultura ao longo de seu ciclo (Dias e Sentelhas, 2018; Zu et al., 2018).

De acordo com os diferentes níveis de produtividade expostos (Figura 14), Sentelhas et al. (2015) destacam a Produtividade Real (PR) como a de menor magnitude, sendo afetada diretamente por fatores ambientais, biológicos, de genótipos e manejo agrícola. Tal cenário é característico dos cultivos em condições de sequeiro, em que há limitações hídricas e consequentemente nutricionais. A PR divide-se em dois níveis: a Produtividade Real Ótima (PRO), onde há melhores condições de manejos agrícolas, e a Produtividade Real Média (PRm), caracterizada por apresentar a produtividade média obtida por pequenos agricultores em função das limitações tecnológicas e manejo agrícola (Sentelhas et al., 2015). Beza et al. (2017) ressaltaram que a análise de *Yield Gap* é de importância primária na identificação dos principais déficits de produtividades em diversos cenários mundiais (climáticos, biológicos, econômicos, etc.). Todavia, exige-se a aquisição, de forma eficiente, de dados com alto nível de detalhamento objetivando-se aperfeiçoar o estudo.

A análise de *Yield Gap* apresenta-se como importante ferramenta na constatação dos principais fatores limitantes dos rendimentos das colheitas (Rong et al., 2021). A partir dessa análise, alguns estudos constataram que a fertilização excessiva reduz a eficiência de absorção de nutrientes (Chen et al., 2018; Cui et al., 2014). Bai et al. (2020) constatou que o aumento da irrigação e a densidade de plantio constituem-se com

alternativas eficientes na utilização de fertilizantes de Nitrogênio. Também foi possível verificar que é possível aumentar a eficiência do uso da água com a adoção do plantio direto e cobertura morta, melhorando a estrutura do solo (Kan et al., 2020; Peng et al., 2020).

Trabalhos com a análise de *Yield Gap* para plantas forrageiras são reduzidos e com informações limitadas. Fato que proporciona imprecisão na estimativa dos níveis de produção agrícola potencial e atingível, condicionando tais resultados a aplicações locais e, consecutivamente, restringindo sua utilização. Portanto, a intensificação de estudos sobre essa análise em plantas forrageiras possibilitará o aumento da precisão e padronização nas respostas produtivas para diferentes variedades de culturas, manejo agrícola e condições climáticas, ampliando sua aplicação para escala regional de forma mais eficiente e precisa.

Considerações finais

Nesta revisão estudamos as características ambientais do semiárido e de espécies forrageira resilientes. Além de abordarmos conceitos importantes na análise das lacunas de produção de espécies vegetais. Estas informações podem ser úteis na ampliação da disponibilidade de forragem ao longo do ano, logo que, o uso de espécies resilientes representa uma estratégia importante para contornar a variação sazonal de forragem nestas áreas, permitindo uma maior estabilidade de produção. Nossos achados demonstram ainda que, a análise de *Yield Gap* para culturas forrageiras é incipiente e deve ser encorajada com vistas a subsidiar melhorias no planejamento e potencialização da disponibilidade de forragem em ambientes semiáridos.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEPE (processos: APQ-0215-5.01/10 e FACEPE - APQ-1159-1.07/14). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (processos: 475279/2010-7, 476372/2012-7, 305286 / 2015-3, 309421/2018-7 e 152251/2018-9). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES (Código Financeiro 001) pela bolsa de pesquisa e estudo.

Referências

Alberio, C., Izquierdo, N. G., & Aguirrezábal, L.

- A. N. (2015). Sunflower Crop Physiology and Agronomy. In *Sunflower* (Issue 1981, pp. 53–91).
- Althoff, T. D., Menezes, R. S. C., Carvalho André de, L., Pinto, A. de S., Santiago, G. A. C. F., Ometto, J. P. H. B., Randow, C. Von, Valadares, E., & Sampaio, E. V. de S. B. (2016). Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. *Forest Ecology and Management*, 360, 367–375.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., De Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728.
- Alves, M., Alejandro, F., Souza, A. De, & Sergio, C. (2015). Dendrochronologia Influence of regional rainfall and Atlantic sea surface temperature on tree-ring growth of *Poincianella pyramidalis*, semiarid forest from Brazil. *Dendrochronologia*, 35, 14–23.
- Alves, H. K. M. N., Jardim, A. M. R. F., Souza, L. S. B., & Silva, T. G. F. (2018). The application of agrometeorological techniques contributes to the agricultural resilience of forage cactus: A review. *Amazonian Journal of Plant Research*, 2(3), 207–220.
- Bai, Y., Zha, T., Bourque, C. P. A., Jia, X., Ma, J., Liu, P., Yang, R., Li, C., Du, T., & Wu, Y. (2020). Variation in ecosystem water use efficiency along a southwest-to-northeast aridity gradient in China. *Ecological Indicators*, 110, 1–10.
- Barbosa, M. L., Silva, T. G. F. da, Zolnier, S., Silva, S. M. S., & Steidle Neto, A. J. (2018). The Influence of cladode morphology on the canopy formation of forage cactus plants. *Revista Caatinga*, 31(1), 180–190.
- Battisti, R., Sentelhas, P. C., Pascoalino, J. A. L., Sako, H., de Sá Dantas, J. P., & Moraes, M. F. (2018). Soybean Yield Gap in the Areas of Yield Contest in Brazil. *International Journal of Plant Production*, 12(3), 159–168.
- Bell, L. W., Moore, A. D., & Thomas, D. T. (2018). Integrating diverse forage sources reduces feed gaps on mixed crop-livestock farms. *Animal*, 12(9), 1967–1980.
- Beza, E., Silva, J. V., Kooistra, L., & Reidsma, P. (2017). Review of yield gap explaining factors and opportunities for alternative data collection approaches. *European Journal of Agronomy*, 82, 206–222.
- Bhat, B. V. (2019). Breeding Forage Sorghum. In *Breeding Sorghum for Diverse End Uses* (Issue 1992, pp. 175–191).
- Bhatia, V. S., Singh, P., Wani, S. P., Chauhan, G. S., Rao, A. V. R. K., Mishra, A. K., & Srinivas, K. (2008). Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(8–9), 1252–1265.
- Cano, M. P., Gómez-Maqueo, A., García-Cayuela, T., & Welte-Chanes, J. (2017). Characterization of carotenoid profile of Spanish Sanguinos and Verdal prickly pear (*Opuntia ficus-indica*, spp.) tissues. *Food Chemistry*, 237, 612–622.
- Cardoso, D. B., Carvalho, F. F. R. de, Medeiros, G. R. de, Guim, A., Cabral, A. M. D., Vêras, R. M. L., Santos, K. C. dos, Dantas, L. C. N., & Nascimento, A. G. de O. (2019). Levels of inclusion of spineless cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck) in the diet of lambs. *Animal Feed Science and Technology*, 247, 23–31.
- Carvalho, A. A. de, Silva, T. G. F. da, Souza, L. S. B. de, Moura, M. S. B. de, Araujo, G. G. L. de, & Tolêdo, M. P. S. (2017). Soil moisture in forage cactus plantations with improvement practices for their resilience. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(7), 481–487.
- Castro, I. N. De, Santos, S. R. Dos, Kondo, M. K., Maia, V. M., & Santos, C. C. R. Dos. (2020). Agronomic performance and water use efficiency of irrigated cactus pear cultivars. *Revista Caatinga*, 33(2), 529–540.
- Chen, G., Cao, H., Liang, J., Ma, W., Guo, L., Zhang, S., Jiang, R., Zhang, H., Goulding, K. W. T., & Zhang, F. (2018). Factors affecting nitrogen use efficiency and grain yield of summer maize on smallholder farms in the North China Plain. *Sustainability (Switzerland)*, 10(2), 1–18.
- Costa, M. S., Oliveira-Júnior, J. F., Santos, P. J., Correia Filho, W. L. F., Gois, G., Blanco, C. J. C., Teodoro, P. E., Silva Junior, C. A., Santiago, B. D., Souza, E. O., & Jardim, A. M. R. F. (2021). Rainfall extremes and drought in Northeast Brazil and its relationship with El Niño–Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 41, E2111–E2135.
- Costa, R. G., Filho, E. M. B., Medeiros, A. N. de, Givisiez, P. E. N., Queiroga, R. de C. R. do E., & Melo, A. A. S. (2009). Effects of increasing levels of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) in the diet of dairy goats and its contribution as a source of water. *Small*

- Ruminant Research*, 82(1), 62–65.
- Cui, Z., Wang, G., Yue, S., Wu, L., Zhang, W., Zhang, F., & Chen, X. (2014). *Closing the N-Use Efficiency Gap to Achieve Food and Environmental Security*.
- Cushman, J. (2017). CAM Plants. In *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* (Vol. 1, pp. 60–77).
- de Almeida, C. L., de Carvalho, T. R. A., & de Araújo, J. C. (2019). Leaf area index of Caatinga biome and its relationship with hydrological and spectral variables. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279(March), 107705.
- de Souza Medeiros, A., Malta Ferreira Maia, S., dos Santos, T. C., & de Araújo Gomes, T. C. (2020). Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use change in the Brazilian semi-arid region. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 287(December 2018), 106690.
- Degu, A., Melaku, S., & Berhane, G. (2009). Supplementation of isonitrogenous oil seed cakes in cactus (*Opuntia ficus-indica*)-tef straw (*Eragrostis tef*) based feeding of Tigray Highland sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 148(2–4), 214–226.
- Devi, P. B., Vijayabharathi, R., Sathyabama, S., Malleshi, N. G., & Priyadarisini, V. B. (2014). Health benefits of finger millet (*Eleusine coracana* L.) polyphenols and dietary fiber: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(6), 1021–1040.
- Dias-Martins, A. M., Pessanha, K. L. F., Pacheco, S., Rodrigues, J. A. S., & Carvalho, C. W. P. (2018). Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food security, processing, health benefits and nutritional products. *Food Research International*, 109, 175–186.
- Dias, H. B., & Sentelhas, P. C. (2018). Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. *Science of the Total Environment*, 637–638, 1127–1136.
- Diniz, W. J. da S., Silva, T. G. F. da, Ferreira, J. M. da S., Santos, D. C. dos, Moura, M. S. B. de, Araújo, G. G. L. de, & Zolnier, S. (2017). Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(9), 724–733.
- Durães, F. O. M., Magalhães, P. C., & Santos, F. G. dos. (2003). *Fisiologia da Planta de Milheto* 28. 1–16. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infotec/a/bitstream/doc/487540/1/Circ28.pdf>
- Fischer, R. A. (2015). Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Research*, 182, 9–18.
- Fonseca, V. A., Santos, M. R. dos, Silva, J. A. da, Donato, S. L. R., Santos Rodrigues, C., & Brito, C. F. B. (2019). Morpho-physiology, yield, and water-use efficiency of *Opuntia ficus-indica* irrigated with saline water. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 41(1), 42631.
- Garcia-Franco, N., Hobley, E., Hübner, R., & Wiesmeier, M. (2018). Climate-Smart Soil Management in Semiarid Regions. In *Soil Management and Climate Change* (pp. 349–368).
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science (New York, N.Y.)*, 327(5967), 812–818.
- Godoy, R., Batista, L. A. R., Souza, F. H. D., & Primavesi, A. C. (2003). Caracterização de Linhagens Puras Seleccionadas de Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) (1) Description of Selected Pigeon-pea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) Pure Lines. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 32(1), 546–555.
- Gusha, J., Halimani, T. E., Katsande, S., & Zvinorova, P. I. (2015). The effect of *Opuntia ficus indica* and forage legumes based diets on goat productivity in smallholder sector in Zimbabwe. *Small Ruminant Research*, 125, 21–25.
- Hussain, M., Farooq, S., Hasan, W., Ul-Allah, S., Tanveer, M., Farooq, M., & Nawaz, A. (2018). Drought stress in sunflower: Physiological effects and its management through breeding and agronomic alternatives. *Agricultural Water Management*, 201, 152–166.
- Iqbal, M. A., Hamid, A., Imtiaz, H., Rizwan, M., Imran, M., Sheikh, U. A. A., & Saira, I. (2020). Cactus Pear: a Weed of Dry-Lands for Supplementing Food Security Under Changing Climate. *Planta Daninha*, 38.
- Jahanzad, E., Jorat, M., Moghadam, H., Sadeghpour, A., Chaichi, M.-R., & Dashtaki, M. (2013). Response of a new and a commonly grown forage sorghum cultivar to limited irrigation and planting density. *Agricultural Water Management*, 117, 62–69.
- Jardim, A. M. R. F., Santos, H. R. B., Alves, H. K. M. N., Ferreira-Silva, S. L., Souza, L. S. B., Araújo Júnior, G. N., Souza, M. S., Araújo, G.

- G. L., Souza, C. A. A., & Silva, T. G. F. (2021a). Genotypic differences relative photochemical activity, inorganic and organic solutes and yield performance in clones of the forage cactus under semi-arid environment. *Plant Physiology and Biochemistry*, 162, 421-430.
- Jardim, A. M. R. F., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Araújo Júnior, G. N., Alves, H. K. M. N., Souza, M. S., Araújo, G. G. L., & Moura, M. S. B. (2021b). Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. *Journal of Arid Environments*, 188, 104464.
- Jardim, A. M. R. F., Silva, M. V., Silva, A. R., dos Santos, A., Pandorfi, H., Oliveira-Júnior, J. F., de Lima, J. L. M. P., Souza, L. S. B., Araújo Júnior, G. N., Lopes, P. M. O., Moura, G. B. A., & Silva, T. G. F. (2021c). Spatiotemporal climatic analysis in Pernambuco State, Northeast Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 105733.
- Jardim, A. M. R. F., Queiroz, M. G., Araújo Júnior, G. N., Silva, M. J., & Silva, T. G. F. (2019). Estudos climáticos do número de dias de precipitação pluvial para o município de Serra Talhada-PE. *Revista Engenharia na Agricultura*, 27, 330-337.
- Jardim, A. M. R. F., Silva, G. I. N., Biesdorf, E. M., Pinheiro, A. G., Silva, M. V., Araújo Júnior, G. N., Santos, A., Alves, H. K. M. N., Souza, M. S., Morais, J. E. F., Alves, C. P., & Silva, T. G. F. (2020a). Production potential of Sorghum bicolor (L.) Moench crop in the Brazilian semiarid: review. *PUBVET*, 14, 1-13.
- Jardim, A. M. da R. F., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., & Souza, M. de S. (2020b). Interaction of agroecosystem intercropped with forage cactus-sorghum in the semi-arid environment: a review. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 5, 69-87.
- Jardim, A. M. R. F., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Souza, M. S., Morais, J. E. F., & Araújo Júnior, G. N. (2020c). Multivariate analysis in the morpho-yield evaluation of forage cactus intercropped with sorghum. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24, 756-761.
- Kan, Z. R., Liu, Q. Y., He, C., Jing, Z. H., Virk, A. L., Qi, J. Y., Zhao, X., & Zhang, H. L. (2020). Responses of grain yield and water use efficiency of winter wheat to tillage in the North China Plain. *Field Crops Research*, 249.
- Khoury, C. K., Castañeda-Alvarez, N. P., Achicanoy, H. A., Sosa, C. C., Bernau, V., Kassa, T., Norton, S. L., Jos, L., Van Der Maesen, G., Upadhyaya, H. D., Ramírez-Villegas, J., Jarvis, A., & Struik, P. C. (2015). Crop wild relatives of pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.]: Distributions, ex situ conservation status, and potential genetic resources for abiotic stress tolerance. *Biological Conservation*, 184, 259-270.
- Kollet, J. L., Mauro, J., & Leite, G. G. (2006). Rendimento forrageiro e composição bromatológica de variedades de milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. BR.) 1 Forage yield and chemical composition of pearl millet varieties (*Pennisetum glaucum* (L.) R. BR.). *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 35, 1308-1315.
- Lal, R. (2004). Carbon Sequestration in Dryland Ecosystems. *Environmental Management*, 33(4), 528-544.
- Lédo, A. A., Donato, S. L. R., Aspiazú, I., Silva, J. A. da, Donato, P. E. R., & Carvalho, A. J. de. (2019). Yield and water use efficiency of cactus pear under arrangements, spacings and fertilizations. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(6), 413-418.
- Li-guo, J. I. A., Yang, C., Yong-lin, Q. I. N., Rui-fang, L., Shi-xin, C. U. I., Zhong, M. A., & Ming-shou, F. A. N. (2018). Potato yield gaps across the rainfed Yin-mountain Hilly Area of China. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(11), 2418-2425.
- Lima, L. R., Silva, T. G. F. da, Jardim, A. M. da R. F., Souza, C. A. A. de, Queiroz, M. G. de, & Tabosa, J. N. (2018). Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(2), 113-118.
- Lobell, D. B., Cassman, K. G., & Field, C. B. (2009). Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34(1), 179-204.
- Marengo, J. A., Alves, L. M., Beserra, E. A., & Lacerda, F. F. (2011). Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*.
- Medeiros, E. V. de, Notaro, K. de A., Barros, J. A. de, Moraes, W. da S., Silva, A. O., & Moreira, K. A. (2015). Absolute and specific enzymatic activities of sandy entisol from tropical dry forest, monoculture and intercropping areas. *Soil and Tillage Research*, 145, 208-215.
- Mligo, J. K., & Craufurd, P. Q. (2005). Adaptation

- and yield of pigeonpea in different environments in Tanzania. *Field Crops Research*, 94, 43–53.
- Moraes, G. S. de O., Guim, A., Tabosa, J. N., Chagas, J. C. C., Almeida, M. de P., & Ferreira, M. de A. (2019). Cactus [Opuntia stricta (Haw.) Haw] cladodes and corn silage: How do we maximize the performance of lactating dairy cows reared in semiarid regions? *Livestock Science*, 221, 133–138.
- Morugán-Coronado, A., Linares, C., Gómez-López, M. D., Faz, Á., & Zornoza, R. (2020). The impact of intercropping, tillage and fertilizer type on soil and crop yield in fruit orchards under Mediterranean conditions: A meta-analysis of field studies. *Agricultural Systems*, 178(November 2019), 102736.
- Niechayev, N. A., Pereira, P. N., & Cushman, J. C. (2019). Understanding trait diversity associated with crassulacean acid metabolism (CAM). *Current Opinion in Plant Biology*, 49, 74–85.
- Nunes, A. T., Cabral, D. L. V., Amorim, E. L. C., Santos, M. V. F. dos, & Albuquerque, U. P. (2016). Plants used to feed ruminants in semi-arid Brazil: A study of nutritional composition guided by local ecological knowledge. *Journal of Arid Environments*, 135, 96–103.
- Paiva, P., Souza, I., Costa, M., Santos, A., & Coelho, L. (2016). Opuntia sp. Cactus: Biological Characteristics, Cultivation and Applications. *Advances in Research*, 7(3), 1–14.
- Pal, D., Sachan, N., Ghosh, A., & Mishra, P. (2011). Biological activities and medicinal properties of Cajanus cajan (L) Millsp. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 2(4), 207.
- Payne, W. A. (2000). Optimizing Crop Water Use in Sparse Stands of Pearl Millet. *Agronomy Journal*, 92(5), 808.
- Peng, Z., Wang, L., Xie, J., Li, L., Coulter, J. A., Zhang, R., Luo, Z., Cai, L., Carberry, P., & Whitbread, A. (2020). Conservation tillage increases yield and precipitation use efficiency of wheat on the semi-arid Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 231.
- Pereira, J. de S., Cavalcante, A. B., Nogueira, G. H. M. de S. M. F., Campos, F. S., Araújo, G. G. L. de, Simões, W. L., & Voltolini, T. V. (2020). Morphological and yield responses of spineless cactus Orelha de Elefante Mexicana under different cutting intensities. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, 21, 1–10.
- Pino, F., & Heinrichs, A. J. (2017). Sorghum forage in precision-fed dairy heifer diets. *Journal of Dairy Science*, 100(1), 224–235.
- Pourhadian, H., Kamkar, B., Soltani, A., & Mokhtarpour, H. (2019). Evaluation of forage maize yield gap using an integrated crop simulation model-satellite imagery method (Case study: four watershed basins in Golestan Province). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(2), 253–268.
- Queiroz, M. G., Silva, T. G. F. D., Souza, C. A. A., Jardim, A. M. R. F., Araújo Júnior, G. N., Souza, L. S. B., Moura, M. S. B. (2021). Composition of Caatinga Species Under Anthropogenic Disturbance and Its Correlation With Rainfall Partitioning. *Floresta e Ambiente*, 28, e20190044.
- Queiroz, Maria Gabriela, da Silva, T. G. F., Zolnier, S., de Souza, C. A. A., de Souza, L. S. B., Steidle Neto, A. J., de Araújo, G. G. L., & Ferreira, W. P. M. (2019). Seasonal patterns of deposition litterfall in a seasonal dry tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279(September 2018), 107712.
- Queiroz, M. G., Silva, T. G. F. da, Zolnier, S., Silva, S. M. S. e, Souza, C. A. A. de, & Carvalho, H. F. de S. (2018). Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente Semiárido. *IRRIGA*, 1(01), 141.
- Queiroz, Maria G de, Silva, T. G. F. da, Zolnier, S., Silva, S. M. S. e, Lima, L. R., & Alves, J. de O. (2015). Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(10), 931–938.
- Reboita, M. S., Alonso Gan, M., Porfírio, R., Rocha, D. A., & Ambrizzi, E. T. (2010). Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(2), 185–204.
- Robert, G., Rajasekar, M., & Manivannan, P. (2016). Triazole-induced drought stress amelioration on growth, yield, and pigments composition of Helianthus annuus L.(sunflower). *International Multidisciplinary Research Journal*, 5, 6–15.
- Rong, L., Gong, K., Duan, F., Li, S., Zhao, M., He, J., Zhou, W., & Yu, Q. (2021). Yield gap and resource utilization efficiency of three major food crops in the world – A review. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(2), 349–362.
- Scalisi, A., Morandi, B., Inglese, P., & Lo Bianco, R. (2016). Cladode growth dynamics in Opuntia ficus-indica under drought. *Environmental and Experimental Botany*, 122, 158–167.
- Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M. S.,

- Farias, J. R. B., Hampf, A. C., & Nendel, C. (2015). The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *The Journal of Agricultural Science*, 153(08), 1394–1411.
- Sentelhas, P. C., Battisti, R., Monteiro, L. A., & Duarte, Y. (2016). *Yield Gap - Conceitos, definições e exemplos. January*.
- Sewrsaran, R., Khan, A., Stone, R., & John, K. (2019). Resistance screening of 14 *Cajanus cajan* (L.) Millsp. cultivars to *Callosobruchus maculatus* (F.) (Coleoptera:Bruchidae). *Journal of Stored Products Research*, 82, 67–72.
- Seiffert, N. F., & Thiago, L. R. L. (1983). Legumineira: cultura forrageira para produção de proteína. Campo Grande: Embrapa-CNPQC, 52p. (Circular Técnica, 13).
- Silva, J. M. C., & Lacher, T. E. (2020). Caatinga—South America. In *Encyclopedia of the World's Biomes* (pp. 554–561).
- Silva, T. G. F. da, Araújo, G. G. L. de, Moura, M. S. B. de, & Souza, L. S. B. de. (2017). Agrometeorological research on forage cactus and its advances in Brazil. *Amazonian Journal of Plant Research*, 1(2), 45–68.
- Silva, T. G. F. da, Primo, J. T. A., Moura, M. S. B. de, Silva, S. M. S. e., Morais, J. E. F. de, Pereira, P. de C., & Souza, C. A. A. de. (2015). Soil water dynamics and evapotranspiration of forage cactus clones under rainfed conditions. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50(7), 515–525.
- Silva, J. V., Reidsma, P., Laborte, A. G., & van Ittersum, M. K. (2017). Explaining rice yields and yield gaps in Central Luzon, Philippines: An application of stochastic frontier analysis and crop modelling. *European Journal of Agronomy*, 82, 223–241.
- Silva, T. G. F., Araújo Primo, J. T., Morais, J. E. F., Diniz, W. J. S., Souza, C. A. A., & Silva, M. C. (2015). Crescimento e produtividade de clones de falma forrageira. *Revista Caatinga*, 28(2), 10–18.
- Sinha, I., Buttar, G. S., & Brar, A. S. (2017). Drip irrigation and fertigation improve economics, water and energy productivity of spring sunflower (*Helianthus annuus* L.) in Indian Punjab. *Agricultural Water Management*, 185, 58–64.
- Siqueira, M. C. B., Ferreira, M. de A., Monnerat, J. P. I. do S., Silva, J. de L., Costa, C. T. F., da Conceição, M. G., de Andrade, R. de P. X., Barros, L. J. A., & Melo, T. T. d. B. (2017). Optimizing the use of spineless cactus in the diets of cattle: Total and partial digestibility, fiber dynamics and ruminal parameters. *Animal Feed Science and Technology*, 226, 56–64.
- Souza, B. I., Menezes, R., & Câmara Artigas, R. (2015). *Efeitos da desertificação na composição de espécies do bioma Caatinga, Paraíba/Brasil*. 88, 45–59.
- Souza, M. S., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Jardim, A. M. R. F., Araújo Júnior, G. N., & Alves, H. K. M. N. (2019). Practices for the improvement of the agricultural resilience of the forage production in semiarid environment: a review. *Amazonian Journal of Plant Research*, 3, 417–430.
- Summerfield, R. J., & Lawn, R. J. (1987). Tropical grain legume crops: a commentary. *Outlook on Agriculture*, 16, 189–197.
- Taguchi, M., Harinder Makkar, F., Mounir Louhaichi, F., Duffy, R., & Moretti, D. (2017). *Crop ecology, cultivation and uses of cactus pear Editorial support Book design and layout*. www.fao.org/
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). Fisiologia e desenvolvimento vegetal, 6ª Edição. In *Porto Alegre: Artmed: Vol. 6 ed.* (Clic Editio).
- Van Ittersum, M. K., & Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52(3), 197–208.
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance-A review. *Field Crops Research*, 143, 4–17.
- Vandenbrink, J. P., Brown, E. A., Harmer, S. L., & Blackman, B. K. (2014). Turning heads: The biology of solar tracking in sunflower. *Plant Science*, 224, 20–26.
- Vazquez Mendoza, P., Carvalho de Sousa, T., Ferreira Dos Santos, M. V., Vazquez Mendoza, O. V., Batista Dubeux Junior, J. C., & De Andrade Lira, M. (2019). Morfología de nopal forrajero cv Miúda (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck) en sistemas de cultivo del agreste de Pernambuco, Brasil. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 10(3), 756–766.
- Veloso, G. A., Ferreira, M. E., Ferreira Júnior, L. G., & Barbosa da Silva, B. (2020). Modelling gross primary productivity in tropical savanna pasturelands for livestock intensification in Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 100288.
- Vieira, I. R., de Araújo, F. S., & Zandavalli, R. B. (2013). Shrubs promote nucleation in the

- Brazilian semi-arid region. *Journal of Arid Environments*, 92, 42–45.
- Visser, F. D. A., Sentelhas, P. C., & Pereira, A. B. (2018). Yield gap of cassava crop as a measure of food security - an example for the main Brazilian producing regions. *Food Security*, 10(5), 1191–1202.
- Yahia, E. M., & Sáenz, C. (2011). Cactus pear (*Opuntia* species). In *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits* (pp. 290-331e). Elsevier.
- Zhang, H., Tao, F., & Zhou, G. (2019). Potential yields, yield gaps, and optimal agronomic management practices for rice production systems in different regions of China. *Agricultural Systems*.
- Zu, Q., Mi, C., Liu, D. L., He, L., Kuang, Z., Fang, Q., Ramp, D., Li, L., Wang, B., Chen, Y., Li, J., Jin, N., & Yu, Q. (2018). Spatio-temporal distribution of sugarcane potential yields and yield gaps in Southern China. *European Journal of Agronomy*, 92(September 2017), 72–83.