



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no Semiárido brasileiro

Hygor Kristoph Muniz Nunes Alves¹, Alexandre Maniçoba da Rosa Ferraz Jardim², George do Nascimento Araújo Júnior³, Carlos André Alves de Souza⁴, Renan Matheus Cordeiro Leite⁵, Gabriel Italo Novaes da Silva⁶, Luciana Sandra Bastos de Souza⁷, Thieres George Freire da Silva⁸

¹ Mestre em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, hygorkristoph22@gmail.com. ² Doutorando 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. ³ Doutorando 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. ⁴ Doutorando 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. ⁵ Mestrando 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. ⁶ Mestrando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 52171-900, gabrielitalo.novaes@gmail.com. ⁷ Professora Adjunta II 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, sanddrbastos@yahoo.com.br. ⁸ Professor Associado II 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, thieres.silva@ufrpe.br.

Artigo recebido em 07/04/2021 e aceito 03/01/2022

RESUMO

A instabilidade climática, juntamente com as ações antrópicas mal coordenadas de uso indevido da terra, propiciam acentuada pressão nos sistemas de produção em regiões secas, tendo como consequência a baixa produtividade nas atividades agropecuárias nessas áreas. Assim, a utilização de técnicas agronômicas que melhore as respostas produtivas dessas áreas, afim de contribuir com a resiliência das pequenas fazendas do semiárido brasileiro é de grande relevância. Nesse sentido, objetivou-se com essa revisão, contextualizar a região semiárida do Brasil e apresentar práticas agrícolas que contribuem para a exploração racional das propriedades rurais de forma a maximizar os ganhos produtivos e melhorar a resiliência nesse meio de forma sustentável. Desta forma, conclui-se que várias pesquisas evidenciam as melhorias nos sistemas de produção a partir do manejo integrado de práticas agronômicas, tornando possível o enfrentamento aos impactos climáticos e ambientais, e assim, alterando a capacidade de resiliência das áreas deficitárias.

Palavras-chave: consórcio, irrigação, cactos, *Nopalea*, forragem, *Opuntia*.

An approach on resilient agricultural practices for sustainable maximization of production systems in the Brazilian semi-arid region

ABSTRACT

Climatic instability, together with poorly coordinated anthropic actions of improper land use, provides strong pressure on production systems in dry regions, resulting in low productivity in agricultural activities in these areas. Thus, the use of agronomic techniques that improve the productive responses of these areas, in order to contribute to the resilience of small farms in the Brazilian semi-arid region is of great relevance. In this sense, the aim of this review was to contextualize the semi-arid region of Brazil and present agricultural practices that contribute to the rational exploitation of rural properties in order to maximize productivity gains and improve resilience in this environment in a sustainable manner. Thus, it is concluded that several studies show improvements in production systems from the integrated management of agronomic practices, making it possible to face climatic and environmental impacts, and thus, changing the resilience capacity of deficit areas.

Keywords: intercropping, irrigation, cacti, *Nopalea*, forage, *Opuntia*.

* E-mail para correspondência:
thieres.silva@ufrpe.br (Silva, T. G. F.).

Introdução

As mudanças climáticas, até meados do século XXI, afetarão de forma progressiva as atividades socioeconômicas em todo o mundo, com impactos consideráveis no setor agrícola (Makate, 2019). Esses impactos comprometem significativamente os países em desenvolvimento, devido à baixa capacidade adaptativa das populações, decorrente da: 1) elevação das temperaturas do ar; 2) variabilidade dos eventos de chuvas; e 3) dinâmica dos fenômenos climáticos extremos, tais como, secas e enchentes, acarretando em diminuições quantitativas e qualitativas nas produções e produtividades das culturas e setor pecuário (Trinh et al., 2018; Costa et al., 2020; Oliveira-Júnior et al., 2021a).

Esse cenário, juntamente com as projeções para o crescimento populacional, mudanças nos hábitos alimentares e padrões de consumo das populações ascendentes dos países em desenvolvimento, tem exercido forte pressão nos sistemas agrícolas, principalmente no que concerne ao aumento da produção, para atender uma demanda progressiva por alimento (Campbell et al., 2014; Jardim et al., 2021a; Oliveira-Júnior et al., 2021b). Ao passo que, aumenta-se a demanda por alimento, eleva-se também a necessidade de ampliar a produção, acontecendo-se de duas formas: a) prolongamento das fronteiras agrícolas; e b) intensificação dos sistemas (Vanlauwe et al., 2014).

Com o propósito de atender às necessidades atuais e garantir às futuras gerações a segurança alimentar, a intensificação do uso da terra torna-se necessária (Robinson et al., 2015; Smith et al., 2017; Pinheiro et al., 2021), visto que, o aumento adicional da produção através da expansão das áreas não é mais viável em um número crescente de países (Holden, 2018). Mostrando-se como alternativa a intensificação sustentável (IS) de muitas áreas de pequenos produtores, tendo estas, grande potencial para aumentar a produtividade, acrescentando a oferta de alimento e forragem (Smith et al., 2017), como ocorre no Semiárido brasileiro (SAB).

Conceitualmente, segundo Scherer et al. (2018) a IS promove a maximização da produção em uma mesma área, sem a necessidade da abertura de novos locais de cultivo, minimizando os impactos ambientais e mantendo o funcionamento do ecossistema. A pesar de oferecer alternativas para melhoria da produção de forma eficiente e sustentável, o sucesso da IS pode variar espacialmente entre as regiões geográficas e pode ser muito diversificada, uma vez que envolve

aspectos físicos, econômicos, sociais e ambientais para garantir o seu sucesso (Thomson et al., 2019).

A IS possibilita um suporte proveitoso no que concerne a práticas de aumento da produção agrícola em ambiente com fortes ações antropogênicas, como é o caso do Semiárido brasileiro (SAB). Essa região apresenta grande número de estabelecimentos rurais de pequeno porte, os quais muitas vezes são manejados de forma ineficiente, levando ao esgotamento dos recursos e posteriormente abandono das áreas, trazendo como consequência a abertura de novas fronteiras e a inicialização dos processos de degradação, perda da biodiversidade das áreas abandonadas, e desencadeando o fenômeno da desertificação (Vieira et al., 2015).

No entanto, é de fundamental importância a utilização de estratégias de manejo adequadas para ampliar os rendimentos e a eficiência dos sistemas de produção no SAB. Essas melhorias podem ser alcançadas por meio de vários aspectos de caráter agrônomo, como a implantação de variedades adaptadas, padrões de cultivo melhorados para a região, consórcio e técnicas culturais, bem como a identificação de culturas com melhor ajuste morfofisiológico e fenológico para responder as situações locais (Santos et al., 2017; Martins et al., 2018; Jardim et al., 2020a; Salvador et al., 2021).

Assim, objetivou-se com essa revisão, contextualizar a região semiárida do Brasil e apresentar práticas agrícolas que contribuem para a exploração racional das propriedades rurais de forma a maximizar os ganhos produtivos e melhorar a resiliência nesse meio de forma sustentável.

Caracterização e singularidades do Semiárido brasileiro

As regiões enquadradas como áridas e semiáridas apresentam uma área de 59,86 milhões de km², proporcional a 40% das terras emersas do globo, envolvendo 37% da população mundial (Gutiérrez et al., 2017). Essas zonas apresentam grande variabilidade climática e ocorre em todos os continentes. No Brasil, o clima “semiárido” (termo também atribuído a uma região) se faz presente em grande parte do Nordeste e em menores proporções no Sudeste, sendo essa região densamente habitada e possuidora de grande biodiversidade (Ledru et al., 2020). O Semiárido brasileiro (SAB) estende-se por uma área de 1,12 milhão km², compreendendo um total de 1.262 municípios, os quais estão inseridos em 10 unidades federativas, sendo nove destes, pertencentes ao Nordeste, mais o estado de

Minas Gerais, pertencente a região Sudeste. Encontra-se uma população de aproximadamente 27,8 milhões de habitantes, em concordância com a nova delimitação do Ministério da Integração Nacional (2017) e censo populacional do IBGE

(2018), distribuídos conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição e área de abrangência municipal e populacional pertencentes a nova delimitação do Semiárido brasileiro (SAB).

Unidades Federação	da	Municípios no SAB		Área no SAB		População no SAB (2018)			
		Nº	%	km²	% SAB	% SAB na UF	Habitantes	% SAB	% Habitantes na UF
AL		38	3,0	125.83,0	1,1	45,19	962.641	3,45	28,97
BA		278	22,0	446.021,0	39,5	78,98	7.675.656	27,54	51,82
CE		175	13,9	146.889,0	13,0	98,65	5.827.192	20,91	64,21
MA		2	0,2	3.523,0	0,3	1,07	213.693	0,77	3,04
MG		91	7,2	121.256,0	10,7	20,67	1.492.198	5,35	7,09
PB		194	15,4	513.06,0	4,5	90,86	2.498.117	8,96	62,51
PE		123	9,7	86.341,0	7,7	88,04	3.993.975	14,33	42,06
PI		185	14,7	200.061,0	17,7	79,51	2.805.394	10,07	85,94
RN		147	11,6	49.073,0	4,3	92,92	1.922.440	6,90	55,26
SE		29	2,3	11.093,0	1,0	50,59	478.935	1,72	21,02
SAB		1.262	100	1.128.146,0	100	-	27.870.241	100	-

Fonte: Ministério da Integração Nacional (2017); IBGE (2018).

Recobrando 13,24% do território nacional, o SAB não engloba apenas municípios que apresentam o clima Semiárido e sim os que se enquadram em pelo menos um dos critérios adotados para a delimitação desta região, sendo estes: i) precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm; ii) índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50; e, iii) o porcentual diário de deficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando-se todos os dias do ano (Andrade e Nunes, 2014; Jardim et al., 2020b). Essa classificação ao longo do tempo passou por várias revisões e sua última reorganização foi no ano de 2017, onde foi acrescida de 129 municípios, com um aumento de 14,09% em sua área de abrangência quando comparada a sua última atualização no ano de 2005, correspondendo os estados da Bahia, Ceará e Piauí os que mais contribuíram para esse aumento (Figura 1) (SUDENE, 2017; IBGE, 2018).

Tal região, apresenta insolação média de 2.800 h ano⁻¹, evapotranspiração potencial (ETp) média de 2.000 mm ano⁻¹, com temperaturas médias do ar variando de 20,1 a 32,9 °C; e umidade relativa do ar em torno de 60% (Silva et al., 2014b; Alves et al., 2018). A região do SAB apresenta grande variabilidade espaço-temporal das precipitações pluviométricas (i.e., 350 a 800 mm), entre anos e dentro de um mesmo ano, concentrando-se em um curto período de tempo, não mais que três ou quatro meses (Souza et al., 2015). Essas condições aliadas a alta demanda evaporativa da atmosfera, acarreta em um balanço hídrico negativo na maior parte do ano, ocasionando a escassez hídrica e o fenômeno das secas (Cunha et al., 2015), agravando os sistemas de produções locais (Simões et al., 2010).

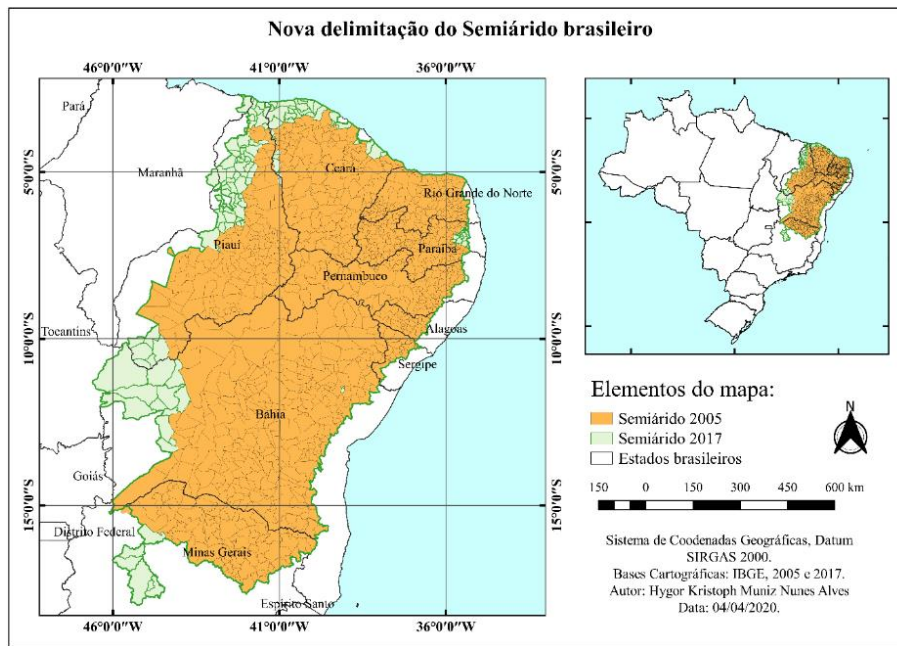


Figura 1. Expansão comparativa da modificação da área de abrangência do Semiárido brasileiro, uma região em expansão 2005 a 2017.

Além desses fatores climatológicos que afetam drasticamente a zona Semiárida do Brasil, impactando diretamente nas condições socioeconômicas das populações dessa região, os solos dessa área em sua maioria não apresentam grande aptidão agrícola do ponto de vista físico, uma vez que são solos jovens na concepção pedogenético, i.e. solos pouco intemperizados, com pouca profundidade efetiva e baixa capacidade de retenção de umidade no perfil, influenciando na composição florística local e dificultando a agricultura de subsistência (Oliveira et al., 2018a). De forma genérica, os principais solos dominantes nas divergentes paisagens do SAB são os Argissolos, Cambissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos e Planossolos (Gomes et al., 2019). Com exceção de alguns solos mais desenvolvidos a depender de seu ambiente de formação, as profundidades médias variam de < 0,50 m (i.e., solos rasos) e entre 0,50 e 1,00 m (i.e., pouco profundos). Do ponto de vista físico, encontra-se grandes quantidades de cascalhos, calhaus e matações, especialmente nos solos desenvolvidos em paisagens mais secas.

Na perspectiva química, os solos do SAB apresentam pH variando entre moderadamente ácidos a moderadamente neutros, com boa disponibilidade de nutrientes, exceto o fósforo que segundo Araújo et al. (2004) os solos dessa região apresentam baixa disponibilidade de fósforo lábil, agravando a queda de produtividade. Outra característica marcante é a propensão ao acúmulo de sais (e.g. carbonatos e cloretos), em particular

para ambientes onde apresentam restrições de drenagem, evidenciando solos salinos ou em curso de salinização (Resende et al., 2014; Batistão et al., 2020). Tendo em vista a grande extensão do SAB e sua alta variabilidade de paisagem e características dos solos, nossa abordagem apresenta uma descrição genérica, podendo encontrar mais detalhes nos estudos desenvolvidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Jacomine et al., 1973a,b; Jacomine et al., 1975; Jacomine et al., 1976; Jacomine et al., 1977; Jacomine et al., 1986; Jacomine et al., 1996).

Diante das condições edafoclimáticas do SAB, a vegetação dominante é a caatinga, englobando mais de 844,4 mil km², contendo mais de 1,5 mil espécies florísticas, das quais mais de 30% são endêmicas, composta por plantas herbáceas, arbustivas, arbóreas e cactáceas, na sua maioria xerófitas com boa adaptação ao ambiente hostil (Albuquerque et al., 2012; Nascimento et al., 2014; Milliken et al., 2018). Grande parte da vegetação perde suas folhas no período seco, como estratégia de sobrevivência, com rápida retomada do dossel e acelerado desenvolvimento na estação chuvosa, assegurando a continuidade das espécies (Santos et al., 2010; Queiroz et al., 2020). No entanto, a Caatinga sofre grande pressão antropogênica devido aos sistemas agropecuários, tendo apenas 0,28% dessa resguardadas como reserva legal (Sánchez et al., 2018).

Acredita-se que 10,5 milhões de pessoas vivam em zonas rurais no SAB, encontrando-se estritamente dependentes das atividades agropecuária, ao passo que essas contribuem para

o desenvolvimento e funcionamento socioeconômico dessas comunidades (Andrade e Nunes, 2014). De acordo com Simões et al. (2010) e Medeiros et al. (2020) o conjunto de fatores climáticos e sociais impõe forte pressão sobre o frágil ecossistema dessa região. Os sistemas de produção no SAB são formados basicamente por pequenas propriedades de agricultores familiares, os quais dependem basicamente de dois sistemas como fonte de renda, estando a pecuária em primeiro e a agricultura em segundo (Silva et al., 2018). Esse primeiro, muitas vezes praticado de maneira desordenada, com a criação de ruminantes de forma extensiva com alta intensidade, acarretando em forte pressão de pastejo, impactando negativamente sobre os solos e a vegetação local, trazendo grandes riscos à degradação ambiental (e.g., desertificação) (Aguiar et al., 2010; Alves et al., 2017).

Segundo Souza et al. (2020) a criação de gado em sistemas de pastejo extensivo em áreas de caatinga, em média, é necessário 13,3 ha animal⁻¹ para deter respostas satisfatórias, podendo variar de acordo com a produção de biomassa da vegetação de cada região, expondo a necessidade de grandes áreas de pastagens nativa para a criação desses rebanhos. Segundo os mesmos autores, muitas vezes as taxas de lotação são desrespeitadas, acarretando em forte pressão de pastejo e influenciando no processo de compactação e perda dos solos por erosão. Além desse excesso de pastejo, o ciclo vicioso continuado dos rebanhos em uma mesma área, prática habitual de muitos produtores no SAB, acarreta em degradação das pastagens, provocando atenuação na produtividade das forrageiras e sintetizando a lucratividade dos rebanhos (Tinsley et al., 2019).

Já a agricultura representa uma atividade mais instável quando comparado a pecuária, representando uma diminuta parcela do seguimento econômico das propriedades rurais do SAB, devido à grande vulnerabilidade dos sistemas produtores aos eventos climáticos, os quais frequentemente são produzidos em sequeiro, acarretando em perdas parciais ou totais da produção (Lima et al., 2016). Não longe dos impactos climáticos na agricultura, as ações antropogênicas advindas da falta de conhecimento e informação, intensificam a lacuna entre potencial produtivo e rendimento real nessa região. Esses fatores, muitas vezes utilizam-se de técnicas nocivas ao meio ambiente, como o corte e queima da caatinga para abertura de novas áreas, o plantio convencional e práticas como o monocultivo, tendo como resultante a perda da fertilidade natural e

redução de potencial produtivo, com posterior abandono da terra (Nunes et al., 2014).

Notoriamente, esse contexto, demonstra a carência de inovações tecnológicas e transferência de conhecimentos benéficos aos sistemas de produção situados no SAB, sendo de grande importância o uso de técnicas agrícolas que venham a melhorar os sistemas de produção, promovendo maiores retornos socioeconômicos. Inúmeros trabalhos mostram a melhoria dos sistemas de produção e aumento na produtividade das culturas devido à adoção de técnicas agrícolas, tais como, irrigação, práticas conservacionistas, uso de culturas adaptadas às condições locais e o consórcio entre elas, afim de um melhor aproveitamento dos recursos biofísicos (Wang et al., 2018; Nascimento et al., 2019; Zhang et al., 2019).

Estratégias agrícolas para aumento da resiliência

A resiliência está relacionada a capacidade de um sistema e/ou suas partes, em absorver e enfrentar um acontecimento, propensão ou perturbação de risco, mantendo-se funcional e amortecendo os impactos sofridos nas diversas escalas (i.e. social, econômica e ambiental) (IPPC et al., 2012; Roy et al., 2019). No entanto, os sistemas de produção agrícola nos países em desenvolvimento são muitas vezes negligenciados do ponto de vista técnico, com diminuta eficácia nos rendimentos e procedimentos que intensificam a degradação ambiental e dificultam a resiliência desses (Dile et al., 2013), como os exercidos no Semiárido brasileiro. Assim, no âmbito agrícola, as inclinações têm-se voltado para o reconhecimento de práticas logísticas e mecanismos subjacentes que auxiliam na resiliência, dando suporte aos sistemas de produção em meio às tensões ambientais (Peterson et al., 2018).

Plantas adaptadas a região

Os baixos regimes de chuva recorrentes no semiárido brasileiro (SAB) são um dos principais entraves na produção e oferta regular de forragem nativa ou cultivada em pequenas propriedades familiares, uma vez que, apresentam grande variabilidade intra e interanual, tendo mais relevância com as projeções das mudanças climáticas, visto que as estimativas são de acréscimo das temperaturas médias e aumento no déficit hídrico (Ledru et al., 2020; Costa et al., 2020). Por conseguinte, é decisivo o uso de artifícios que amortizem os riscos inerentes as exigências de água das plantas, como a utilização de plantas habituadas a essas eventualidades,

desenvolvendo a resiliência (Lobato et al., 2020; Jardim et al., 2021b).

A Caatinga, por sua vez, possui grande número de plantas com potencial forrageiro, as quais apresentam boa adaptação as condições impostas pelo ambiente, com uma grande variedade de plantas anuais, cactáceas, graminhas e leguminosas (Santos et al., 2010). Essa vegetação apresenta mecanismos peculiares de caráter fisiológicos, anatômicos e morfológicos, para o enfrentamento do déficit hídrico prolongado, desde a queda das folhas nos períodos de estiagem para redução da área transpirante até um eficiente sistema radicular que molda-se as condições do ambiente (Pinheiro et al., 2013). No entanto, mesmo com plantas bem adaptadas ao clima, a Caatinga oferece baixa capacidade de suporte, com produção média entre 1,5 e 4,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria seca, a depender do período do ano (Pereira Filho et al., 2013; Santos et al., 2021).

As cactáceas nativas encontram-se como alternativa na alimentação animal, devido sua boa adaptabilidade, essas possuem grande quantidade de espinhos, os quais ajudam na condensação da água e diminuição da temperatura das estruturas vegetativas, além de ser mecanismo de defesa, dificultado o consumo (Cavalcanti e Resende, 2007). Dentre as cactáceas mais usadas nos períodos prolongados de estiagem encontram-se o Mandacaru (*Cereus jamacaru* DC.) e o Xiquexique (*Pilosocereus gounellei* [A. Weber ex K. Schum.]). Segundo Silva et al. (2005), a inclusão de Xiquexique na dieta de vacas leiteiras em substituição a silagem de sorgo não apresentou alterações na composição química e na produção de leite. Já para Cavalcanti e Resende (2006), estudando dietas para caprinos a base de Mandacaru, observaram que o mesmo não atende as exigências nutricionais dos animais, acarretando em perda de peso quando em uso exclusivo.

Apesar da ampla utilização das pastagens nativas, dentre elas os cactos, são aproveitadas de forma extrativista, sem que haja o hábito de cultivo ou manejo adequado, podendo levar a eliminação dessas em paisagens naturais (Furtado et al., 2019). Uma alternativa para a preservação da flora nativa seria a utilização de espécies exóticas cultivadas e adaptadas as condições edafoclimáticas do SAB, como a palma forrageira (*Opuntia* sp. e *Nopalea* sp.) e o milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), contribuindo para estabilização dos sistemas de produção, melhorando a oferta de forragem ao longo do ano e amortizando os impactos causados pelas estiagens no âmbito socioeconômico e ambiental (Almeida et al., 2018; Moraes et al., 2019; Queiroz et al., 2020).

Palma forrageira

Os fatores climáticos no SAB, são os principais responsáveis pelo êxito ou fracasso dos sistemas de produção, definindo a disponibilidade e qualidade das pastagens, promovendo a estacionalidade das mesmas, gerando a instabilidade e os baixos índices zootécnicos. Por esse motivo, é importante o uso de plantas forrageiras adaptadas as condições dessa região e, que persistam por um período prolongado, minimizando os problemas com a falta de forragem no período de escassez hídrica (Santana Neto et al., 2015). A palma forrageira (*Opuntia* sp. e *Nopalea* sp.) apresenta satisfatória adaptação as zonas áridas e semiáridas, devido as suas características morfológicas e fisiológicas, apresentando tolerância a longos períodos de déficit hídrico, com um relevante aproveitamento do uso da água (Queiroz et al., 2015; Jardim et al., 2021c).

A palma forrageira apresenta o metabolismo ácido das crassuláceas (CAM), mas a depender das condições impostas pelo ambiente, como disponibilidade hídrica, a mesma pode alternar o metabolismo de algumas estruturas entre C3 e CAM (e.g. brotos jovens e botões florais), apresentando-se nesta condição uma espécie de metabolismo facultativo (Silva et al., 2017; Jardim et al., 2021b). Em condições de restrição hídrica prevalece a captação de CO₂ no período noturno, minimizando as perdas de água pela transpiração, devido as baixas temperaturas, ao passo que mantem os estômatos fechados durante o dia, o qual apresenta superior demanda atmosférica, assim os cactos identificam-se mais eficientes no uso da água, quando comparadas as espécies de metabolismo C3 e C4 (Flores-Hernández et al., 2004; Gusha et al., 2015).

A adaptabilidade dos cactos não está apenas no metabolismo eficiente, mas, em um conjunto de características intrínsecas, como seguimentos suculentos com elevada capacidade de acúmulo de água e fotossinteticamente ativos denominados cladódios, análogos a caules, reduzida quantidade de estômatos, cutícula espessa e um sistema radicular altamente adaptado, respondendo rapidamente as transições do ambiente (Oliveira et al., 2010; Hassan et al., 2020). O sistema radicular encontra-se em maior expressividade nos primeiros 0,30 m do solo, podendo ser classificadas em quatro tipos: estruturais, em esporão, as desenvolvidas de aréolas e as raízes absorventes ou raízes de chuva, por sua vez, essas últimas desenvolvem-se nas primeiras horas após a ocorrência da primeira chuva, posteriormente ao período de estiagem,

desaparecendo com a restrição hídrica (Drennan e Nobel, 1998; Snyman, 2006; Hassan et al., 2019).

Esses fatores adaptativos proporcionam grande capacidade de produção de fitomassa, podendo ser usada como estratégia de reserva forrageira, para mitigar os efeitos negativos da oferta de forragem nos períodos secos do ano, proporcionando melhorias na sustentabilidade da pecuária regional (Silva et al., 2014c; Moraes et al., 2019). Essa cactácea apresenta alta produção de massa seca por unidade de área, segundo Oliveira et al. (2018b) pode alcançar até 40 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, além de apresentar alto conteúdo energético. Corroborando com esses autores, Moraes et al. (2019) também citam produtividades de palma forrageira no SAB em torno de 50 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, apresentando-se bem superior a própria vegetação nativa (i.e., Caatinga) e outras culturas de uso convencional para a produção de silagem, como o milho, com produção < 5,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e 8,04 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente.

Em termos econômicos alguns estudos mostram que a produção de palma forrageira pode gerar não só a estabilidade da oferta de forragem nos sistemas de produção, mas garantir renda proveniente da venda direta da cultura, sendo essa de duas formas: a) forragem e, b) “sementes” (cladódios para plantio). A primeira, consiste na venda da planta por tonelada (média, R\$ 100,00 Mg⁻¹), exclusivamente para alimentação animal, concentrando-se valor inferior de comercialização quando comparado à “semente”, o qual apresenta maior valor de mercado (R\$ 0,15 por unidade), sendo empregado para o plantio de novas áreas (Lima et al., 2018b). Segundo Dantas et al. (2017), avaliando os aspectos econômicos da produção de palma forrageira adensada sob irrigação, o sistema proporcionou receita líquida de R\$ 22.552,20 no primeiro ano de cultivo, mostrando-se viável a implantação do projeto com produtividades acima de 70,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria fresca.

Além dos benefícios produtivos e econômicos a palma pode proporcionar benefícios ambientais, trazendo melhorias à conservação do solo, com contribuição para as propriedades físicas, recuperando a estrutura do solo, beneficiando a permeabilidade e potencializando o acúmulo de água no solo (Nefzaoui et al., 2014). Santos et al. (2011), estudando a umidade do solo no semiárido pernambucano, com distintas coberturas, constataram que o solo cultivado com palma forrageira não proporcionou escoamento superficial, além de apresentar boas condições de armazenamento de água no seu perfil. Assim, a utilização de palma forrageira pode trazer benefícios socioambientais para os sistemas de

produção no semiárido brasileiro, com a possibilidade de implantação dessa cultura em áreas marginais, com diminuta capacidade de suporte a agricultura convencional (Santos et al., 2016; Souza Filho et al., 2016).

Apesar de toda essa potencialidade, a palma forrageira é muitas vezes cultivada de forma marginal, sem a utilização de técnicas adequadas de manejo, podendo não alcançar todo o seu potencial produtivo (Santos et al., 2018). Estudos mostram que são significativos os ganhos na produção da cultura através de práticas como irrigação e nutrição mineral e/ou orgânica (Zegbe et al., 2014). Podendo ser utilizada em sistemas de consórcio, melhorando a oferta de forragem e possibilitando um melhor aproveitamento dos recursos biofísicos (Lima et al., 2018b; Jardim et al., 2020b).

Milheto

O milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), é uma gramínea anual de ciclo curto, geralmente cultivada em climas quentes, estando entre os seis cereais mais importantes, depois do trigo, arroz, milho, sorgo e cevada, com aproximadamente 31 milhões de hectares plantados no mundo (Ullah et al., 2017). É bastante utilizado em regiões áridas e semiáridas, devido sua baixa exigência hídrica, podendo ser cultivado em locais que apresentem precipitação pluviométrica inferior à 350 mm ano⁻¹, sendo considerado uma cultura tolerante a seca (Bello et al., 2019; Silva et al., 2020).

A cultura do milheto geralmente é cultivada em locais secos apresentando satisfatório desempenho em solos de baixa fertilidade, com alta salinidade e pH ácido. É amplamente utilizado na alimentação humana e animal, devido as características de fácil cultivo e nutricionais (Yadav et al., 2019). No entanto, pesquisas tem mostrado respostas favoráveis as condições de crescimento da cultura em adoção de práticas como a irrigação, nutrição mineral e tempo de corte (Shahin et al., 2013; Bello et al., 2019).

No Brasil, a utilização do milheto vem apresentando grande expansão, principalmente no Cerrado, podendo ser empregada como cultura de sucessão na formação de palhada nos sistemas de plantio direto, na produção de grãos em substituição do milho e para produção de silagem, devido seu rápido crescimento, rusticidade e sistema radicular profundo, trazendo benefícios na ciclagem de nutrientes e na descompactação do solo, apresentando baixos riscos de insucesso aos sistemas de produção (Guimarães et al., 2013; Silva et al., 2014a).

Devido sua aptidão, essa cultura apresenta versatilidade de usos, como forrageira de excelente qualidade de silagem, boa cobertura de solo e, produção de grãos com elevado valor nutritivo, com alta capacidade de rebrota e alto potencial produtivo. Surgindo-se ainda, como alternativa aos sistemas de produção animal no SAB, trazendo melhorias socioeconômicas para a agricultura familiar desta região (Moreira et al., 2015; Fátima et al., 2015).

Sistemas de consorciação na agricultura

A utilização de práticas agrícolas insustentáveis são as principais causas do processo de degradação do solo em terras agricultáveis, promovendo alterações na cobertura vegetal, perdas de solo por erosão e queda de rendimento das culturas, motivando o abandono dessas áreas (Salah et al., 2016; Jardim et al., 2017). No entanto, a utilização de práticas que melhorem o aproveitamento dos recursos biofísicos e aumente a cobertura do solo é tida como alternativa para ambientes áridos e semiárido vulneráveis as ações climáticas e antropogênicas, mitigando os processos de desertificação (Qian et al., 2018). A consorciação entre culturas pode agregar tais benefícios aos sistemas de produção. Essa prática consiste no cultivo simultâneo de duas ou mais culturas convivendo por um período de tempo na mesma área (Masvaya et al., 2017).

A consorciação traz vantagens para os sistemas que se apropriam dessa prática, visando melhorar a eficiência no uso da terra, radiação fotossinteticamente ativa, eficiência no uso da água e nutrientes, como também a complementariedade interespecífica para maximização dos rendimentos das espécies utilizadas em comparação aos seus monocultivos (Zhang et al., 2019a; Jardim et al., 2021a). É amplamente discutido o uso do consórcio para aliviar os efeitos da insegurança alimentar em muitas áreas de produção, sendo adotado como um dos meios para alcançar uma intensificação sustentável nos sistemas de produção em zonas áridas e semiáridas (Yin et al., 2020). No entanto, essa não é uma prática comumente adotada em grandes sistemas de produção, no qual fazem o emprego de elevada tecnificação, com implementos especializados aos sistemas de monocultivo, ao passo que, é comumente adotada em sistemas de produção familiar, em pequenas parcelas de terra (Brooker et al., 2015), como as encontradas no semiárido brasileiro.

Todavia a prosperidade dos sistemas de produção consorciados depende da escolha adequada das espécies que compõem os sistemas, e

a densidade que as culturas componentes se encontram, para garantir que as mesmas não exerçam antagonismo significativos sobre os rendimentos interespecíficos, acarretando em declínio de produção (Oliveira Filho et al., 2016). Nessa prática, é desejável, que as culturas afins ocupem diferentes nichos ecológicos, garantindo a maximização no uso dos recursos (Hu et al., 2016). Apesar de ser amplamente utilizado e promissor, nos últimos anos o uso de sistemas consorciados declinou em áreas com reduzida disponibilidade hídrica, uma vez que o aumento no estande de plantas acarreta em maior demanda por água, refletindo no potencial produtivo das culturas componentes (Yin et al., 2020).

No semiárido brasileiro, a consorciação entre culturas é uma prática bastante comum entre os agricultores em pequenas propriedades rurais, sendo bastante empregado o cultivo entre espécies C4 e C3 (*Zea mays* L. e *Vigna unguiculata* (L.) Walp.), respectivamente (Souza et al., 2011). Embora essas culturas sejam as mais utilizadas em sistemas consorciados na agricultura de subsistência, são fortemente afetadas pela sazonalidade das chuvas, havendo a necessidade do emprego de espécies tolerantes ao meio edafoclimático e, que apresentem efeitos compensatórios as interações interespecíficas, afim de somar ganhos aos sistemas de produção, melhorando a estabilidade e a organização socioeconômica dessas localidades (Dutra et al., 2017; Campos et al., 2017; Jardim et al., 2020b).

A utilização de consórcio entre espécies de cactos e gramíneas tem sido bastante explorado em ambientes com elevada demanda atmosférica, afim de minimizar as perdas de rendimento e fornece uma melhor estabilidade para os sistemas de produção no semiárido brasileiro, no qual, comumente são empregados a palma forrageira (*Nopalea* sp. e *Opuntia* sp.) em consórcios com o *Sorghum bicolor* (Diniz et al., 2017; Carvalho et al., 2017; Lima et al., 2018a; Jardim et al., 2021a). Outra planta bastante promissora é o *P. glaucum* (milheto), o qual apresenta grande tolerância ao deficit hídrico, com baixo consumo de água por ciclo e elevada produção de fitomassa (Herrada et al., 2017) (Figura 2). Essa cultura é bastante explorada em países da África, Ásia e Índia, em cultivos consorciados com leguminosas (Duchene et al., 2017; Nelson et al., 2018; Gong et al., 2021). No entanto, o uso do milheto no Brasil, é mais apreciado nas regiões Sudeste e Centro-Oeste (Calvo et al., 2010). Havendo grande incipiência dos estudos de sistemas consorciado com essa cultura no Semiárido brasileiro.

Manejo da irrigação em ambiente semiárido

A produção agrícola é fortemente dependente dos fatores climáticos. Em regiões áridas e semiáridas a disponibilidade de água, muitas vezes limitada aos eventos de chuva, geram grandes riscos aos sistemas agrícolas, inferindo perdas parciais e/ou totais da produção (Ndiritu, 2020; Jardim et al., 2021d). Contrariamente, as mudanças nos hábitos de consumo e crescimento populacional exercem forte

A utilização de irrigação apresenta grandes vantagens aos sistemas agropecuários, porém, a água para uso agrícola está progressivamente se transformando em um produto escasso, em especial nas regiões quentes e secas, com amplificação em decorrência das mudanças climáticas. Esse cenário, juntamente com práticas de irrigação ineficientes, limitam o desenvolvimento produtivo das fazendas (Yavuz et al., 2015; Jardim et al., 2021e). Nesse sentido, o uso sustentável da água para irrigação é uma prioridade em regiões de terras secas,

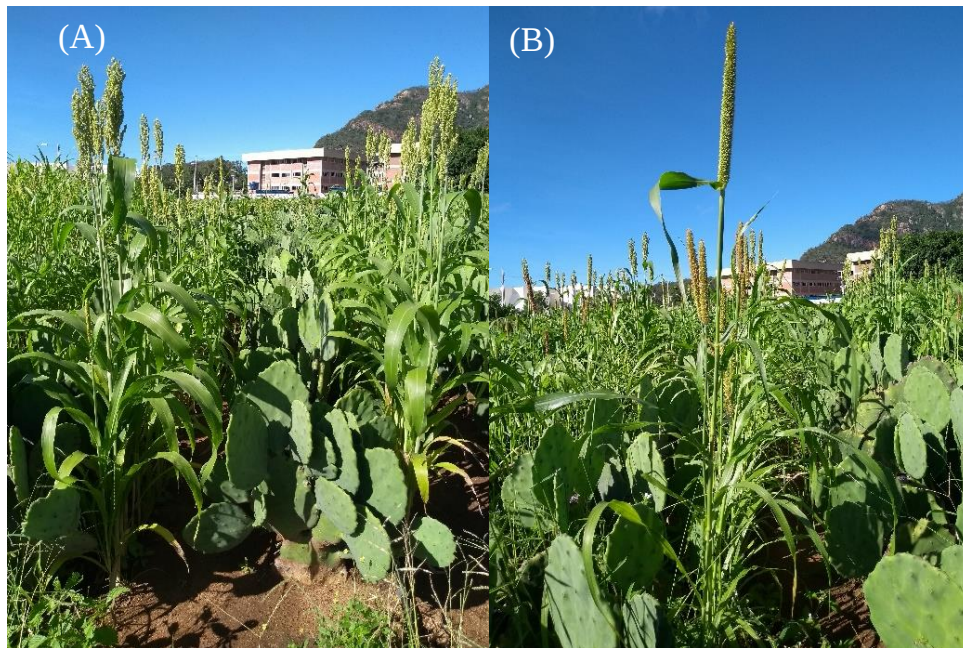


Figura 2. Padrões de consórcio típicos baseados na palma forrageira, incluindo (A) consórcio palma-sorgo e (B) palma-milheto, respectivamente.

tensão aos sistemas produtores, que por sua vez, necessitam intensificar a produção (Rowland et al., 2018). A irrigação é uma prática essencial para sustentar a produção agrícola, principalmente em períodos de escassez de chuvas (Yufeng et al., 2021; Jardim et al., 2019), contribuindo para a segurança da produção e garantindo melhor estabilidade socioeconômica. Essa prática permite o fornecimento de água às culturas, sendo essa, a principal determinante da produção de biomassa, tendo ligação direta com o turgor, a fotossíntese, dissolução e absorção de nutrientes, entre outros processos fisiológicos (Adu et al., 2018).

A agricultura irrigada realiza um papel essencial no sistema global de produção de alimentos, responsabilizando-se por mais de 40% da produção mundial em menos de 20% das terras cultivadas. Os rendimentos das culturas em sistemas de produção irrigados são cerca de 2,7 vezes maiores do que os da agricultura de sequeiro em escala mundial (Soto-García et al., 2013).

necessitando estratégias eficientes para economia hídrica, melhorando o seu aproveitamento pelo sistema, com o menor impacto ambiental (Dingre e Gorantiwar, 2020).

Em regiões áridas e semiáridas o gerenciamento correto da água de irrigação é fundamental, visto que essas áreas são propícias a problemas de salinização do solo, devido a elevada demanda atmosférica e diminuta disponibilidade de água com boa qualidade para esse fim, muitas vezes, utilizando-se de fontes subterrâneas com elevada concentração de sais. Estima-se que mais de 800 milhões de hectares de campos cultivados sejam acometidos por problemas de salinização secundária (e.g., via água de irrigação), assumindo progressões anuais (Minhas et al., 2020). Mas, para muitas regiões, as águas subterrâneas e com elevada carga de sais são a principal fonte para fins agrícolas (Bahir et al., 2020).

No Brasil, em especial na região semiárida, encontra-se extensas áreas propensas a problemas causados pela salinização secundária do solo

(Cavalcanti et al., 2018). Nesse seguimento, o manejo racional da água via irrigação pode minimizar os impactos dessa prática, bem como promover uma melhor eficiência do seu uso, garantindo melhores rendimentos das safras (Dingre e Gorantiwar, 2020). Em todo o mundo, a comunidade científica tem sugerido inúmeros métodos e manejo da irrigação para melhorar o rendimento das culturas sem que ocorra grandes impactos ambientais, dentre eles estão, o uso de sistemas de irrigação mais eficientes, como por gotejo, irrigação com base nas necessidades das culturas, irrigação deficitária e práticas conservacionistas integradas a irrigação (Yang et al., 2020; Chauhdary et al., 2020; Er-raki et al., 2021).

A utilização de irrigação deficitária é tida como a aplicação de água em quantidades reduzidas às necessidades absolutas das culturas, afim de melhorar o rendimento das safras, bem como reduzir o consumo de água, ou então, possibilitando utilizar-se da mesma quantidade de água para abastecer uma maior área cultivada (Memon et al., 2021). Mas, segundo os mesmos autores, a irrigação por deficit depende da cultura e do estágio de desenvolvimento que a mesma se encontra ou em que momento será aplicado a restrição hídrica, sendo esses fatores, o limite entre perda ou ganho de rendimento. Yufeng et al. (2021) relatam que essa prática pode aumentar em até 29% o rendimento do milho em ambiente semiárido. Queiroz et al. (2015) estudando a palma forrageira no semiárido brasileiro, observaram que a cultura irrigada obteve melhores rendimentos quando comparado ao cultivo em sequeiro.

O emprego da irrigação com práticas conservacionista como o uso de cobertura morta pode trazer grandes contribuições para os sistemas de produção em ambientes deficitários, melhorando a distribuição da água e reduzindo a perda de água do solo por evaporação. Nesse sentido, torna-se sensato, a utilização racional dessas práticas para elevar os rendimentos das culturas em ambientes secos e reduzir os impactos ambientais, estabilizando os sistemas e contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico das comunidades rurais (Paul et al., 2020).

Cobertura morta

A cobertura do solo com filmes plásticos ou com palhada de restos culturais, é uma prática agrônômica bastante promissora em ambientes secos, afim de melhorar o rendimento produtivo das culturas, ajudando na resiliência das fazendas (Zhang et al., 2019b). Essa prática consiste no recobrimento da terra arável, afim de proteger o solo contra a incidência direta de radiação solar, com melhorias na flutuação térmica, reduzindo a amplitude, proporcionando uma melhor distribuição da umidade no solo, favorecendo o maior espalhamento do sistema radicular, reduzindo as perdas de água por evaporação, ajudando no controle de ervas espontâneas e melhora os aspectos físico-químicos do solo, com a deposição de matéria orgânica e posterior mineralização (Jiménez et al., 2017). Esses benefícios podem ser observados na Figura 3.

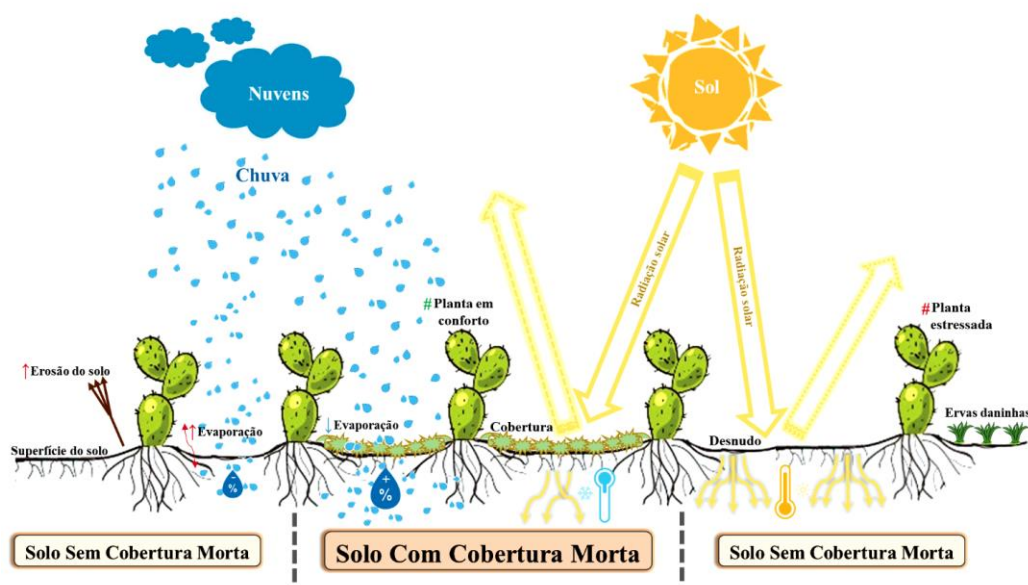


Figura 3. Benefícios do uso de cobertura morta em sistemas de cultivo (Alves et al., 2018).

A utilização de cobertura morta e filme plástico é bastante difundida em algumas regiões, tendo em vista, que o uso a curto prazo, possibilita benefícios ao cultivo, com melhoras no rendimento, mas, a longo prazo, as consequências são exacerbadas, provocando consumo excessivo da água e nutrientes do solo, impedindo a infiltração da água da chuva, deteriorando a estrutura do solo, dificultando o crescimento radicular, refletindo na diminuta produtividade das culturas, agravando os sistemas produtores, tornando-os insustentáveis (Chen et al., 2019). A cobertura de filme plástico, produz elevada quantidade de resíduo no campo, sendo raras as práticas de reciclagem no material, causando a poluição do ambiente agrícola, modificando as características físicas do solo, além de possuir uma molécula estável com elevado tempo de decomposição (Gu et al., 2020). Nesse sentido, de acordo com Chen et al. (2019), a utilização de cobertura morta com restos de palha de culturas é uma alternativa ecológica e mais sustentável.

A utilização de resíduos culturais para o recobrimento do solo promove maiores benefícios em relação ao filme plástico, por ser um material orgânico sem riscos de degradação do ambiente. A sua utilização é promissora na melhoria da eficiência do uso da água pelas culturas, aumentando as características de consumo de água pelas plantas, com reflexo na elevada produção de biomassa, uma vez que a cobertura do solo promove uma menor perda de água por evaporação, disponibilizando e/ou direcionando a água remanescente no solo para a transpiração das plantas, aumentando os processos metabólicos, com reflexos positivos nos rendimentos (Souza et al., 2019; Zhang et al., 2020).

Os benefícios da utilização de cobertura morta sobre o solo, podem ser empregadas em regiões como o semiárido brasileiro, minimizando os impactos causados pela sazonalidade das chuvas, por meio da conservação da umidade do solo, e mitigando as ações antropogênicas, minimizando os processos erosivos, com contribuição para a preservação dos solos e elevação na produtividade das safras (Borges et al., 2014; Silva et al., 2019). Vários relatos demonstram a elevação dos rendimentos das plantas e maior retorno econômico em cultivo com uso de cobertura morta de palha (Gao et al., 2019; Akhtar et al., 2020). Amorim et al. (2017) estudando plantas forrageiras no semiárido brasileiro em cultivo com cobertura morta de palha, tiveram incremento de até 62% no rendimento de matéria

seca, em relação ao cultivo controle (sem cobertura).

Diante de tais fatos, o uso de cobertura morta de palha sobre o solo, auxilia na melhoria dos sistemas de produção em terras secas, contribuindo para o aumento produtivo das culturas, influenciando na estabilidade socioeconômica-ambiental das fazendas. Ademais, é uma prática que pode ser implementada à baixos custos, apresentando forte influência na capacidade de recuperação e/ou amortização dos impactos, garantindo a resiliência dos sistemas de produção.

Conclusões

Nesta revisão de literatura apresentou-se as principais características do Semiárido brasileiro, bem como, o manejo ineficiente na produção agropecuária e suas limitações frente as mudanças climáticas, dificultando a estabilidade socioeconômica e ambiental da região. Entretanto, várias pesquisas evidenciam as melhorias nos sistemas de produção a partir do manejo integrado de práticas agronômicas, tornando possível o enfrentamento aos impactos climáticos e ambientais, e assim, alterando a capacidade de resiliência dessas áreas.

Desse modo, mais pesquisas são encorajadas com a utilização de sistemas consorciados em ambiente semiárido com a palma forrageira e gramíneas, integradas a práticas agronômicas, visando uma melhoria nos sistemas e, favorecendo uma estabilidade de forragem e retorno econômico para os produtores, seja na venda da matéria prima, ou pela performance produtiva dos animais.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código de Financiamento 001), Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE - APQ-0215-5.01/10 e FACEPE - APQ-1159-1.07/14), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - 475279/2010-7, 476372/2012-7, 305286/2015-3, 309421/2018-7, e 152251/2018-9) pelo apoio financeiro e concessão das bolsas dos autores.

Referências

Adu, M. O., Yawson, D. O., Armah, F. A., Asare, P. A., Frimpong, K. A. (2018). Meta-analysis of

- crop yields of full, deficit, and partial root-zone drying irrigation. *Agricultural Water Management*, 197, 79–90
- Aguiar, M. I., Maia, S. M. F., Xavier, F. A. da S., de Sá Mendonça, E., Filho, J. A. A., de Oliveira, T. S. (2010). Sediment, nutrient and water losses by water erosion under agroforestry systems in the semi-arid region in northeastern Brazil. *Agroforestry Systems*, 79(3), 277–289
- Akhtar, K., Wang, W., Ren, G., Khan, A., Enguang, N., Khan, A., Feng, Y., Yang, G., Wang, H. (2020). Science of the Total Environment Straw mulching with inorganic nitrogen fertilizer reduces soil CO₂ and N₂O emissions and improves wheat yield. *Science of the Total Environment*, 741, 140488
- Albuquerque, U. P., De Lima Araújo, E., El-Deir, A. C. A., De Lima, A. L. A., Souto, A., Bezerra, B. M., Ferraz, E. M. N., Maria Xavier Freire, E., Sampaio, E. V. de S. B., Las-Casas, F. M. G., De Moura, G. J. B., Pereira, G. A., De Melo, J. G., Alves Ramos, M., Rodal, M. J. N., Schiel, N., De Lyra-Neves, R. M., Alves, R. R. N., Azevedo, S. M., ... Severi, W. (2012). Caatinga revisited: Ecology and conservation of an important seasonal dry forest. In *The Scientific World Journal* (Vol. 2012, pp. 01–18). Hindawi Limited
- Almeida, M. C. R., Leite, M. L. de M. V., Sá Júnior, E. H. de, Cruz, M. G. da, Moura, G. A. de, Moura, E. A. de, Sá, G. A. dos S., Lucena, L. R. R. de. (2018). Crescimento vegetativo de cultivares de milho sob diferentes disponibilidades hídricas. *Magistra*, 29(2), 161–171
- 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
- Alves, T. L. B., Azevedo, P. V. de., Cândido, G. A., Alves, T. L. B., Azevedo, P. V., Cândido, G. A. (2017). Socioeconomic indicators and desertification in the upper course of the Paraíba river watershed. *Ambiente & Sociedade*, 20(2), 19–38
- Amorim, D. M., Freire Da Silva, T. G., De, P., Pereira, C., Bastos De Souza, L. S., Minuzzi, R. B. (2017). Phenophases and cutting time of forage cactus under irrigation and cropping systems. *Agropec. Trop*, 47(1), 62–71
- Andrade, J. A., Nunes, M. A. (2014). Acesso à água no Semiárido Brasileiro: uma análise das políticas públicas implementadas na região. *Revista Espinhaço*, 3(2), 28–39
- Araújo, M. S. B., Schaefer, C. E. R., Sampaio, E. V. S. B. (2004). Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latosols and Luvisols in northeastern Brazil. *Geoderma*, 119(3–4), 309–321
- Bahir, M., Ouhamdouch, S., Ouazar, D., El Moçayd, N. (2020). Climate change effect on groundwater characteristics within semi-arid zones from western Morocco. *Groundwater for Sustainable Development*, 11(February), 100380
- Batistão, A. C., Holthusen, D., Reichert, J. M., Portela, J. C. (2020). Soil solution composition affects microstructure of tropical saline alluvial soils in semi-arid environment. *Soil and Tillage Research*, 203(November 2019), 104662
- Bello, Z. A., Walker, S., Tesfuhoney, W. (2019). Water relations and productivity of two lines of pearl millet grown on lysimeter with two different soil types. *Agricultural Water Management*, 221, 528–537
- Borges, T. K. de S., Montenegro, A. A. de A., Santos, T. E. M. dos, Silva, D. D. da., Silva Junior, V. de P. e. (2014). Influência de práticas conservacionistas na umidade do solo e no cultivo do milho (*Zea mays* L.) em semiárido nordestino. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 38(1), 1862–1873
- 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., ... White, P. J. (2015). Improving intercropping: A synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*, 206(1), 107–117
- Calvo, C. L., Foloni, J. S. S., Brancalião, S. R. (2010). Produtividade de fitomassa e relação C/N de monocultivos e consórcios de guandu-anão, milho e sorgo em três épocas de corte. *Bragantia*, 69(1), 77–86
- Campbell, B. M., Thornton, P., Zougmore, R., van Asten, P., Lipper, L. (2014). Sustainable intensification: What is its role in climate smart agriculture? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, 39–43
- Campos, F. S., Gois, G. C., Vicente, S. L. A., Macedo, A. de., Matias, A. G. da S. (2017). Alternativa de forragem para caprinos e ovinos criados no semiárido. *Nutritime Revista Eletrônica*, 14(2), 5004–5013
- Carvalho, A. A. De, Silva, T. G. F., Souza, L. S. B. De, Moura, M. S. B. De, Araújo, 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
- Cavalcanti, N. D. B., Resende, G. M. (2006). Consumo de mandacaru (*Cereus jamacaru* P. DC.) por caprinos na época seca no semi-árido de Pernambuco. *Revista Caatinga*, 19(4), 402–408
- Cavalcanti, N. de B. & Resende, G. M. (2007). Efeito de diferentes substratos no desenvolvimento de mandacaru (*Cereus jamacaru* P. DC.), facheiro (*Pilosocereus pachycladus* RITTER), Xiquexique (*Pilosocereus gounellei* (A. WEBWR EX K. SCHUM.) BLY. EX ROWL.) e Coroa-de-frade (*Melocactus bahiensis* BRITTON. *Revista Caatinga*, 20(1), 28–35
- Cavalcanti, N. de S., Rolim, M. M., Santos Júnior, J. A., Barros, M. de F. C., Pedrosa, E. M. R. (2018). Resíduo de gesso na recuperação de solo salino-sódico proveniente de perímetro irrigado do semiárido brasileiro. *Irriga*, 25(3), 505–517
- Chauhdary, J. N., Bakhsh, A., Ragab, R., Khaliq, A., Enge, B. A., Rizwan, M., Shahid, M. A., Nawaz, Q. (2020). Modeling corn growth and root zone salinity dynamics to improve irrigation and fertigation management under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 230(November 2019), 105952
- Chen, Y., Chai, S., Tian, H., Chai, Y., Li, Y., Chang, L., Cheng, H. (2019). Straw strips mulch on furrows improves water use efficiency and yield of potato in a rainfed semiarid area. *Agricultural Water Management*, 211(July 2018), 142–151
- 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. L., Macedo de Mello Baptista, G., Gomes, H. B., Daniel dos Santos Silva, F., Lins da Rocha Júnior, R., de Araújo Salvador, M., Herdies, D. L. (2020). Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. *Weather and Climate Extremes*, 28, 100254
- Cunha, A. P. M., Alvalá, R. C., Nobre, C. A., Carvalho, M. A. (2015). Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214–215, 494–505
- Cunha, T. J. F., Petreire, V. G., Silva, D. J., Mendes, A. M. S., Melo, R. F., Oliveira Neto, M. B., ... Alvarez, I. A. (2010). Principais solos do semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE)
- Dantas, S. F. de A., Lima, G. F. da C., Mota, E. P. da. (2017). Economic feasibility of irrigated forage cactus in narrow rows in the Potiguar semiarid. *Revista IPecege*, 3(1), 59–74
- Dile, Y. T., Karlberg, L., Temesgen, M., Rockström, J. (2013). The role of water harvesting to achieve sustainable agricultural intensification and resilience against water related shocks in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 181(2013), 69–79
- Dingre, S. K., Gorantiwar, S. D. (2020). Soil moisture based deficit irrigation management for sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in semiarid environment. *Agricultural Water Management*, 0(February), 106549
- Diniz, W. J. da S., da Silva, T. G. F., Ferreira, J. M. da S., Santos, D. C., de Moura, M. S. B., de Araújo, G. G. L., Zolnier, S. (2017). Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(9), 724–733
- Drennan, P. M., Nobel, P. S. (1998). Root growth dependence on soil temperature for *Opuntia ficus-indica*: Influences of air temperature and a doubled CO₂ concentration. *Functional Ecology*, 12(6), 959–964
- Duchene, O., Vian, J. F., Celette, F. (2017). Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 240, 148–161
- Dutra, W. F., De Melo, A. S., Dutra, A. F., Brito, M. E. B., Filgueiras, L. M. B., Meneses, C. H. S. G. (2017). Photosynthetic efficiency, gas exchange and yield of castor bean intercropped with peanut in semiarid Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(2), 106–110
- Er-raki, S., Ezzahar, J., Merlin, O., Amazirh, A., Hssaine, B. A., Kharrou, M. H. (2021). Performance of the HYDRUS-1D model for water balance components assessment of irrigated winter wheat under different water managements in semi-arid region of Morocco. *Agricultural Water Management*, 244(September 2020), 106546

- Fátima, A. De, Vital, M., Santos, D. (2015). Características agrônômicas do milho adubado com diferentes fontes orgânicas. *Agrotec*, 36(1), 303–309
- Flores-Hernández, A., Orona-Castillo, I., Murillo-Amador, B., Garcia-Hernandez, J. L., Troyo-Diequez, E. (2004). Yield and physiological traits of prickly pear cactus “nopal” (*Opuntia* spp.) cultivars under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 70(2), 97–107
- Furtado, R. N., Moreira Filho, E. C., Carneiro, M. S. de S., Pereira, E. S., Rogério, M. C. P., Pinto, A. P. (2019). *Pilosocereus gounellei* in the water supply for finishing sheep in regions of climatic vulnerability. *Small Ruminant Research*, 173(February), 88–93
- Gao, H., Yan, C., Liu, Q., Li, Z., Yang, X., Qi, R. (2019). Exploring optimal soil mulching to enhance yield and water use efficiency in maize cropping in China: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 225(August), 105741
- Gomes, L. C., Faria, R. M., de Souza, E., Veloso, G. V., Schaefer, C. E. G. R., Filho, E. I. F. (2019). Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. *Geoderma*, 340(November 2018), 337–350
- Gong, X., Dang, K., Liu, L., Zhao, G., Lv, S., Tian, L., Jin, F., Feng, Y., Zhao, Y., Feng, B. (2021). Intercropping combined with nitrogen input promotes proso millet (*Panicum miliaceum* L.) growth and resource use efficiency to increase grain yield on the Loess plateau of China. *Agricultural Water Management*, 243(May 2020), 106434
- Gu, X., Cai, H., Fang, H., Chen, P., Li, Y., Li, Y. (2020). Soil hydro-thermal characteristics, maize yield and water use efficiency as affected by different biodegradable film mulching patterns in a rain-fed semi-arid area of China. *Agricultural Water Management*, February, 106560
- Guimarães, C. V., De Assis, R. L., Simon, G. A., Pires, F. R., Ferreira, R. L., Santos, D. C. (2013). Desempenho de cultivares e híbridos de milho em solo submetido a compactação 1. In *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v (Vol. 17, Issue 11)
- Gusha, J., Halimani, T. E., Ngongoni, N. T., Ncube, S. (2015). Effect of feeding cactus-legume silages on nitrogen retention, digestibility and microbial protein synthesis in goats. *Animal Feed Science and Technology*, 206, 1–7
- Gutiérrez, M., Biagioni, R. N., Alarcón-Herrera, M. T., Rivas-Lucero, B. A. (2017). An overview of nitrate sources and operating processes in arid and semiarid aquifer systems
- 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. *European Journal of Agronomy*, 105(April 2018), 104–110
- Hassan, S., Liguori, G., Inglese, P., Louhaichi, M., Sortino, G. (2020). The effect of soil volume availability on *Opuntia ficus-indica* canopy and root growth. *Agronomy*, 10(5), 02–17
- Herrada, M. R., Leandro, W. M., Ferreira, E. P. D. B. (2017). Leguminosas isoladas e consorciadas com milho em diferentes sistemas de manejo do solo no feijão orgânico. *Revista Terra Latinoamericana*, 35(4), 293
- Holden, S. T. (2018). Fertilizer and sustainable intensification in Sub-Saharan Africa. *Global Food Security*, 18, 20–26
- Hu, F., Gan, Y., Chai, Q., Feng, F., Zhao, C., Yu, A., Mu, Y., Zhang, Y. (2016). Boosting system productivity through the improved coordination of interspecific competition in maize/pea strip intercropping. *Field Crops Research*, 198, 50–60
- IBGE. Panorama 2018: características da população e dos domicílios - resultados do universo. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>> Acesso em: 19/04/2019
- IPPC, Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Dahe, Q., Dokken, D. J., Ebi, K. L., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Plattner, G.-K., Allen, S. K., Tingnor, M., Nidgley, P. M. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change ... - Intergovernmental Panel on Climate Change - Google Livros
- Jacomine, P. K. T. Solos sob Caatinga: características e uso agrícola. In: Alvarez, V. H., Fontes, L. E. F., Fontes, M. P. F. (1996). O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, MG: SBCS, p. 95-133
- Jacomine, P. K. T., Almeida, J. C., Medeiros, L. A. R. (1973b). Levantamento exploratório reconhecimento de solos do Estado do Ceará. Recife. 301 p. (DNPEA-DPP. Boletim Técnico, 28. SUDENE-DRN. Série Pedologia, 16)
- Jacomine, P. K. T., Cavalcante, A. C., Pessoa, S. C. P. (1975). Levantamento exploratório reconhecimento de solos do Estado de Alagoas. Recife. 532 p. (EMBRAPA-CPP. Boletim Técnico, 35 –SUDENE-DRN. Série Recurso de Solos, 16)

- Jacomine, P. K. T., Cavalcante, A. C., Pessoa, S. C. P. (1986). Levantamento exploratório reconhecimento dos solos do Estado do Piauí. Rio de Janeiro. v. 1. (EMBRAPA-SNLCS-SUDENE-DRN. Boletim Técnico, 36)
- Jacomine, P. K. T., Cavalcante, A. C., Ribeiro, M. R. (1976). Levantamento exploratório reconhecimento da margem esquerda do Rio São Francisco, Estado da Bahia. Recife. 404 p. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim Técnico, 38. SUDENE-DRN. Série Recurso de Solos, 7)
- Jacomine, P. K. T., Cavalcante, A. C., Silva, F. B. R. (1977). Levantamento exploratório reconhecimento da margem direita do Rio São Francisco, Estado da Bahia. Recife. 404 p. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim Técnico, 52. SUDENE/DRN. Série Recurso de Solos, 10)
- Jacomine, P. K. T., Cavalcanti, A. C., Burgos, N., Pessoa, S. C. P., Silveira, C. O. da. (1973a). Levantamento exploratório reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco. Recife: DNPEA: SUDENE-DRN. 713 p. (Boletim Técnico, 26)
- Jardim, A. M. R. F., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Alves, H. K. M. N., Araújo, J. F. N., Silva, G. I. N., Silva, J. O. N. (2019). Dinâmica da água no solo com cultivo de palma forrageira sob quatro sistemas de plantio. *Agrometeoros*, 27, 357-365
- Jardim, A. M. R. F., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Souza, M. S., Morais, J. E. F., Araújo Júnior, G. N. (2020a). Multivariate analysis in the morpho-yield evaluation of forage cactus intercropped with sorghum. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24, 756-761
- 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(1), 69–87
- 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. (2021a). 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., 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. (2021b). 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., Souza, L. S. B., Alves, C. P., Araújo, J. F. N., Souza, C. A. A., Pinheiro, A. G., Araújo, G. G. L., Campos, F. S., Tabosa, J. N., Silva, T. G. F. (2021c). Intercropping forage cactus with sorghum affects the morphophysiology and phenology of forage cactus. *African Journal of Range and Forage Science*, 38, 1-12. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.1949749>
- 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., (2021d). Spatiotemporal climatic analysis in Pernambuco State, Northeast Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 105733. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105733>
- Jardim, A. M. R. F., Silva, J. R. I., Silva, M. V., Souza, L. S. B., Araújo Júnior, G. N., Alves, H. K. M. N., Mesquita, M., Souza, P. J. O. P., Teixeira, A. H. C., Silva, T. G. F., (2021e). Modelling the Darcy–Weisbach friction factor and the energy gradient of the lateral line. *Irrigation and Drainage*, 1-12. <https://doi.org/10.1002/ird.2658>
- Jardim, A. M. R. F., Araújo Júnior, G. N., Silva, M. J., Morais, J. E. F., Silva, T. G. F. (2017). Estimativas de perda de solo por erosão hídrica para o município de Serra Talhada, PE. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 2, 186- 193
- Jiménez, M. N., Pinto, J. R., Ripoll, M. A., Sánchez-Miranda, A., Navarro, F. B. (2017). Impact of straw and rock-fragment mulches on soil moisture and early growth of holm oaks in a semiarid area. *Catena*, 152, 198–206
- Ledru, M.-P., Jeske-Pieruschka, V., Bremond, L., Develle, A.-L., Sabatier, P., Martins, E. S. P. R., Freitas Filho, M. R. de, Fontenele, D. P., Arnaud, F., Favier, C., Barroso, F. R. G., Araújo, F. S. (2020). When archives are missing, deciphering the effects of public policies and climate variability on the Brazilian semi-arid region using sediment core studies. *Science of the Total Environment*, 723(1), 01–16
- Lima, Lucivania R, Da Silva, T. G. F., Da, A. M., Jardim, R. F., De Souza, C. A. A., De Queiroz, M. G., Tabosa, J. N. (2018). Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. 2, 113–118

- Lima, Lucivania Rodrigues, Silva, T. G. F. da, Pereira, P. C., Morais, J. E. F. de., Assis, M. C. S. de. (2018). Productive-economic benefit of forage cactus-sorghum intercropping systems irrigated with saline water. *Revista Caatinga*, 31(1), 191–201
- Lima, P. V. P. S., Mendes, C. M., Rocha, L. A., Oliveira, M. R. R. (2016). No rastro da vulnerabilidade às secas: uma análise da produção de grãos no semiárido brasileiro. *Revista Eletrônica* 19, 19(1), 183–196
- Lobato, S. M. da S., Santos, L. R. dos, Silva, B. R. S. da, Paniz, F. P., Batista, B. L., Silva Lobato, A. K. (2020). Root-differential modulation enhances nutritional status and leaf anatomy in pigeonpea plants under water deficit. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 262, 151519
- Makate, C. (2019). Effective scaling of climate smart agriculture innovations in African smallholder agriculture: A review of approaches, policy and institutional strategy needs. *Environmental Science & Policy*, 96(1), 37–51
- Martins, M. A., Tomasella, J., Rodriguez, D. A., Alvalá, R. C. S., Giarolla, A., Garofolo, L. L., Siqueira Júnior, J. L., Paolicchi, L. T. I. C., Pinto, G. L. N. (2018). Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. *Agricultural Systems*, 160, 21–30
- Masvaya, E. N., Nyamangara, J., Descheemaeker, K., Giller, K. E. (2017). Is maize-cowpea intercropping a viable option for smallholder farms in the risky environments of semi-arid southern Africa? *Field Crops Research*, 209(May), 73–87
- Medeiros, A. S. de, Maia, S. M. F., Santos, T. C. dos., Gomes, T. C. de A. (2020). Agriculture, Ecosystems and Environment Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use change in the Brazilian semi-arid region. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 287(1), 01–09
- Memon, S. A., Sheikh, I. A., Talpur, M. A., Mangrio, M. A. (2021). Impact of deficit irrigation strategies on winter wheat in semi-arid climate of sindh. *Agricultural Water Management*, 243(February 2020), 106389
- Milliken, W., Gasson, P., Pareyn, F., Sampaio, E. V. S. B., Lee, M., Baracat, A., de Lima Araújo, E., Cutler, D. (2018). Impact of management regime and frequency on the survival and productivity of four native tree species used for fuelwood and charcoal in the caatinga of northeast Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 116(November 2017), 18–25
- Minhas, P. S., Ramos, T. B., Ben-Gal, A., Pereira, L. S. (2020). Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues. *Agricultural Water Management*, 227(October 2019), 105832
- MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Nova delimitação do Semiárido Brasileiro. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.integracao.gov.br/semi-arido-brasileiro>>. Acesso em: 17/01/2018
- 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
- Moreira, E. D. S., Fernandes, L. A., Colen, F., Cruz, Leandro R. (2015). Características agrônômicas e produtivas de milho e milheto para silagem adubados com biofertilizante suíno sob irrigação. *B. Industr. Anim*, 72(3), 185–192
- Nascimento, A., Schwartz, R. C., Lima, F., López-Mata, E., Domínguez, A., Izquier, A., Tarjuelo, J., Martínez-Romero, A. (2019). Effects of irrigation uniformity on yield response and production economics of maize in a semiarid zone. *Agricultural Water Management*, 211, 178–189
- Nascimento, C. E. de S., Tabarelli, M., Silva, C. A. D., Leal, I. R., Tavares, W. de S., Serrão, J. E., Zanuncio, J. C. (2014). The introduced tree Prosopis juliflora is a serious threat to native species of the Brazilian Caatinga vegetation. *Science of the Total Environment*, 481(1), 108–113
- Ndiritu, S. W. (2020). Beef value chain analysis and climate change adaptation and investment options in the semi-arid lands of northern Kenya. *Journal of Arid Environments*, 181(May), 104216
- Nefzaoui, A., Louhaichi, M., Salem, H. Ben. (2014). Cactus as a Tool to Mitigate Drought and to Combat Desertification. *Journal of Arid Land Studies*, 24(1), 121–124
- Nelson, W. C. D., Hoffmann, M. P., Vadez, V., Roetter, R. P., Whitbread, A. M. (2018). Testing pearl millet and cowpea intercropping systems under high temperatures. *Field Crops Research*, 217(August 2017), 150–166
- Nunes, B., Bennett, D., Marques, S. (2014). Sustainable agricultural production: An investigation in Brazilian semi-arid livestock

- farms. *Journal of Cleaner Production*, 64, 414–425
- Oliveira Filho, A. F., Coelho Bezerra, F. T., Pitombeira, J. B., Dutra, A. S., Barros, G. L. (2016). Agronomic and biological efficiency in the castor bean intercropped with cowpea or maize. *Revista Ciencia Agronomica*, 47(4), 729–736
- Oliveira, D. P., Sartor, L. R., Souza Júnior, V. S., Corrêa, M. M., Romero, R. E., Andrade, G. R. P. & Ferreira, T. O. (2018). Weathering and clay formation in semi-arid calcareous soils from Northeastern Brazil. *Catena*, 162, 325–332
- Oliveira, F. T. de, Souto, J. S., Silva, R. P. da, Filho, F. C. de A., Júnior, E. B. P. (2010). Palma Forrageira: Adaptação E Importância Para Os Ecossistemas Áridos E Semiáridos. *Revista Verde*, 5(4), 27–37
- Oliveira, J. P. F. de, Ferreira, M. de A., Alves, A. M. S. V., Melo, A. C. C. de, Andrade, I. B. de, Urbano, S. A., Suassuna, J. M. A., Barros, L. J. A. de., Melo, T. T. de B. (2018). Carcass characteristics of lambs fed spineless cactus as a replacement for sugarcane. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31(4), 529–536
- Oliveira-Júnior, J. F., de Gois, G., de Lima Silva, I. J., de Oliveira Souza, E., Jardim, A. M. R. F., Silva, M. V., & Jamjareegulgarn, P. (2021a). Wet and dry periods in the state of Alagoas (Northeast Brazil) via Standardized Precipitation Index. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 224, 105746. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105746>
- Oliveira-Júnior, J. F., Mendes, D., Correia Filho, W. L. F., da Silva Junior, C. A., de Gois, G., Jardim, A. M. R. F., Silva, M. V., Lyra, G. B., Teodoro, P. E., Pimentel, L. C. G., Lima, M., Santiago, D. B., Rogério, J. P., Marinho, A. A. R. (2021b). Fire foci in South America: Impact and causes, fire hazard and future scenarios. *Journal of South American Earth Sciences*, 103623. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103623>
- Paul, P. L. C., Bell, R. W., Barrett-Lennard, E. G., Kabir, E. (2020). Straw mulch and irrigation affect solute potential and sunflower yield in a heavy textured soil in the Ganges Delta. *Agricultural Water Management*, 239(December 2019), 106211
- Pereira Filho, J. M., Silva, A. M. de A., César, M. F. (2013). Management of the caatinga for the production of goats and sheep. *Revista Brasileira de Saude e Producao Animal*, 14(1), 77–90
- Peterson, C. A., Eviner, V. T., Gaudin, A. C. M. (2018). Ways forward for resilience research in agroecosystems. *Agricultural Systems*, 162(November 2017), 19–27
- Pinheiro, E. A. R., Costa, C. A. G., Araújo, J. C. de. (2013). Effective root depth of the Caatinga biome. *Journal of Arid Environments*, 89, 1–4
- Pinheiro, A. G., Souza, L. S. B., Jardim, A. M. R. F., Araújo Júnior, G. N., Alves, C. P., Souza, C. A. A., Leite, R. M. C., Silva, T. G. F. (2021). Lacunas de produtividades e estratégias de cultivo na melhoria da produção de forragem para a região semiárida brasileira - Revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14, 2403-2426
- Qian, X., Zang, H., Xu, H., Hu, Y., Ren, C., Guo, L., Wang, C., Zeng, Z. (2018). Relay strip intercropping of oat with maize, sunflower and mung bean in semi-arid regions of Northeast China: Yield advantages and economic benefits. *Field Crops Research*, 223(April), 33–40
- 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
- Queiroz, Maria Gabriela, Silva, T. G. F., Zolnier, S., Jardim, A. M. da R. F., de Souza, C. A. A., Araújo Júnior, G. do N., de Moraes, J. E. F., Souza, L. S. B. (2020). Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil. *Catena*, 188(August 2018), 104457
- Resende, R. S., Amorim, J. R. A., Cruz, M. A. S., Meneses, T. N. (2014). Distribuição espacial e lixiviação natural de sais em solos do Perímetro Irrigado Califórnia, em Sergipe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(suppl), 46–52
- Robinson, L. W., Ericksen, P. J., Chesterman, S., Worden, J. S. (2015). Sustainable intensification in drylands: What resilience and vulnerability can tell us. *Agricultural Systems*, 135(1), 133–140
- Rowland, L. S., Smith, H. K., Taylor, G. (2018). The potential to improve culinary herb crop quality with deficit irrigation. *Scientia Horticulturae*, 242(May), 44–50
- Roy, R., Gain, A. K., Samat, N., Hurlbert, M., Tan, M. L., Chan, N. W. (2019). Resilience of coastal agricultural systems in Bangladesh: Assessment for agroecosystem stewardship strategies. *Ecological Indicators*, 106(July 2018), 105525

- Salah, A. M. A., Prasse, R., Marschner, B. (2016). Intercropping with native perennial plants protects soil of arable fields in semi-arid lands. *Journal of Arid Environments*, 130, 1–13
- Salvador, K. R. S., Jardim, A. M. R. F., Araújo Júnior, G. N., Alves, C. P., Pinheiro, A. G., Pereira, R. C. G., Souza, L. S. B., Silva, T. G. F. (2021). Intensificação de sistemas de produção de palma forrageira por meio de consorciação rotativa com gramíneas, leguminosas e oleaginosas: uma revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(04), 2322-2343. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2322-2343>
- Sánchez, A. S., Almeida, M. B., Torres, E. A., Kalid, R. A., Cohim, E., Gasparatos, A. (2018). Alternative biodiesel feedstock systems in the Semi-arid region of Brazil: Implications for ecosystem services. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(1), 2744–2758
- Santana Neto, A., Oliveira, S., Valen, L. (2015). Leguminosas adaptadas como alternativa alimentar para ovinos no semiárido – revisão. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 14(2), 191–200
- Santos, A. F., Perez-Marin, A. M., Sarmiento, M. I. A. (2018). Produtividade da palma forrageira em aleias com *Gliricídia sepium* sob adubação orgânica em diferentes espaçamentos no Semiárido. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 13(3), 276–281
- Santos, M. V. F., Lira, M. D. A., Dubeux Junior, J. C. B., Guim, A., Mello, A. C. L., Cunha, M. V. Da. (2010). Potential of Caatinga forage plants in ruminant feeding. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39(SUPPL. 1), 204–215
- Santos, R., Neves, A. L., Pereira, L. G., Verneque, R., Costa, C. T., Tabosa, J., Scherer, C., Gonçalves, L. (2017). Divergence in agronomic traits and performance of pearl millet cultivars in Brazilian semiarid region. *Grassland Science*, 63(2), 118–127
- Santos, T. do N., Dutra, E. D., Gomes do Prado, A., Leite, F. C. B., de Souza, R. de F. R., dos Santos, D. C., Moraes de Abreu, C. A., Simões, D. A., de Moraes, M. A., Menezes, R. S. C. (2016). Potential for biofuels from the biomass of prickly pear cladodes: Challenges for bioethanol and biogas production in dry areas. *Biomass and Bioenergy*, 85, 215–222
- Santos, W. R., Souza, L. S. B., Pacheco, A. N., Jardim, A. M. R. F., Silva, T. G. F. (2021). Eficiência do Uso da Água para Espécies da Caatinga: uma Revisão Para o Período de 2009-2019. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(05), 2573-2591
- Santos, T. E. M. dos, Montenegro, A. A. A., Silva, D. D. (2011). Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(7), 670–679
- Scherer, L. A., Verburg, P. H., Schulp, C. J. E. (2018). Opportunities for sustainable intensification in European agriculture. *Global Environmental Change*, 48, 43–55
- Shahin, M. G., Abdrabou, R. T., Abdelmoemn, W. R., Hamada, M. M. (2013). Response of growth and forage yield of pearl millet (*Pennisetum galucum*) to nitrogen fertilization rates and cutting height. *Annals of Agricultural Sciences*, 58(2), 153–162
- Silva, A. H. G., Restle, J., Regis, M. L., Ubirajara, Bilego, O., Juliano, J., Fernandes, R., Leonardo, P., Rezende, P., Medeiros Da Silva, R., Luzia, M., Pereira, R., Fabíola, Lino, A. (2014). Milheto em substituição ao milho na dieta de novilhos confinados Millet as a replacement for corn in feedlot steers diets. *Ciências Agrárias*, 35(4), 2077–2094
- Silva, F. F., Souza, T. E. M. S., Souza, E. R. De, Correa, M. M., Rolim, M. M. (2019). Surface sealing and water erosion of soils with mulching in the semi-arid region of Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(4), 277–284
- Silva, J. G. M., Silva, D. S., Andrade Ferreira, M., Costa Lima, G. F., Melo, A. A. S., Nóbrega Montenegro Diniz, M. C. (2005). *Xiquexique (Pilosocereus gounellei (A. Weber ex K. Schum.) Bly. ex Rowl.)* em substituição à silagem de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) na alimentação de vacas leiteiras. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 34(4), 1408–1417
- Silva, L. M. da, Fagundes, J. L., Viegas, P. A. A., Muniz, E. N., Rangel, J. H. de A., Moreira, A. L., Backes, A. A., Silva, L. M. da, Fagundes, J. L., Viegas, P. A. A., Muniz, E. N., Rangel, J. H. de A., Moreira, A. L., Backes, A. A. (2014a). Produtividade da palma forrageira cultivada em diferentes densidades de plantio. *Ciência Rural*, 44(11), 2064–2071
- Silva, L. M. da, Fagundes, J. L., Viegas, P. A. A., Muniz, E. N., Rangel, J. H. de A., Moreira, A. L., Backes, A. A., Silva, L. M. da, Fagundes, J. L., Viegas, P. A. A., Muniz, E. N., Rangel, J. H. de A., Moreira, A. L., Backes, A. A. (2014b). Produtividade da palma forrageira cultivada em diferentes densidades de plantio. *Ciência Rural*, 44(11), 2064–2071
- Silva, T. G. F., Araújo, G. G. L., Moura, M. S. B., Souza, L. S. B. (2017). Agrometeorological

- research on forage cactus and its advances in Brazil. *Amazonian Journal of Plant Research*, 2(1), 45–68
- Silva, Y. L., Gamarra-Rojas, G., Fernandes, F. É. P., Farias, J. L. de S., Fernandes, C. de S. (2018). A produção animal na economia da agricultura familiar: estudo de caso no Semiárido brasileiro. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, 35(1), 53–74
- Simões, A. F., Kligerman, D. C., Rovere, E. L. La, Maroun, M. R., Barata, M., Obermaier, M. (2010). Enhancing adaptive capacity to climate change: The case of smallholder farmers in the Brazilian semi-arid region. *Environmental Science & Policy*, 13(8), 801–808
- Smith, A., Snapp, S., Chikowo, R., Thorne, P., Bekunda, M., Glover, J. (2017). Measuring sustainable intensification in smallholder agroecosystems: A review. *Global Food Security*, 12, 127–138
- Snyman, H. A. (2006). A greenhouse study on root dynamics of cactus pears, *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta*. *Journal of Arid Environments*, 65(4), 529–542
- Soto-García, M., Martin-Gorriz, B., García-Bastida, P. A., Alcon, F., Martínez-Alvarez, V. (2013). Energy consumption for crop irrigation in a semiarid climate (south-eastern Spain). *Energy*, 55(1), 1084–1093
- Souza Filho, P. F., Ribeiro, V. T., Santos, E. S. dos., Macedo, G. R. de. (2016). Simultaneous saccharification and fermentation of cactus pear biomass-evaluation of using different pretreatments. *Industrial Crops and Products*, 89, 425–433
- Souza, L. S. B. de, Moura, M. S. B. de, Sediya, G. C., Silva, T. G. F. da. (2011). Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupi sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro. *Bragantia*, 70(3), 715–721
- Souza, L. S. B. de, Moura, M. S. B. de, Sediya, G. C., Silva, T. G. F. da. (2015). Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. *Pesq. Agropec. Bras*, 50(8), 627–636
- Souza, R., Hartzell, S., Feng, X., Dantas Antonino, A. C., de Souza, E. S., Cezar Menezes, R. S., Porporato, A. (2020). Optimal management of cattle grazing in a seasonally dry tropical forest ecosystem under rainfall fluctuations. *Journal of Hydrology*, 588, 125102
- 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
- SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE – SUDENE, 2017. Disponível em: <http://sudene.gov.br>. Acessado em 03 de Janeiro de 2020
- Thomson, A. M., Ellis, E. C., Grau, Hé. R., Kuemmerle, T., Meyfroidt, P., Ramankutty, N., Zeleke, G. (2019). Sustainable intensification in land systems: trade-offs, scales, and contexts. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 38, 37–43
- Tinsley, T. L., Chumbley, S., Mathis, C., Machen, R., Turner, B. L. (2019). Managing cow herd dynamics in environments of limited forage productivity and livestock marketing channels: An application to semi-arid Pacific island beef production using system dynamics. *Agricultural Systems*, 173, 78–93
- Trinh, T. Q., Rañola, R. F., Camacho, L. D., Simelton, E. (2018). Determinants of farmers' adaptation to climate change in agricultural production in the central region of Vietnam. *Land Use Policy*, 70, 224–231
- Ullah, A., Ahmad, A., Khaliq, T., Akhtar, J. (2017). Recognizing production options for pearl millet in Pakistan under changing climate scenarios. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(4), 762–773
- Vanlauwe, B., Coyne, D., Gockowski, J., Hauser, S., Huising, J., Masso, C., Nziguheba, G., Schut, M., Van Asten, P. (2014). Sustainable intensification and the African smallholder farmer. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, 15–22
- Vieira, R. M. S. P., Tomasella, J., Alvalá, R. C. S., Sestini, M. F., Affonso, A. G., Rodriguez, D. A., Barbosa, A. A., Cunha, A. P. M. A., Valles, G. F., Crepani, E., De Oliveira, S. B. P., De Souza, B., Calil, P. M., De Carvalho, M. A., Valeriano, D. M., Campello, F. C. B., Santana, M. O. (2015). Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. *Solid Earth*, 6, 347–360
- Wang, D., Feng, H., Liu, X., Li, Y., Zhou, L., Zhang, A., Dyck, M. (2018). Effects of gravel mulching on yield and multilevel water use efficiency of wheat-maize cropping system in semi-arid region of Northwest China. *Field Crops Research*, 218, 201–212
- Yadav, M., Rengasamy, R. S., Gupta, D. (2019). Characterization of Pearl Millet (*Pennisetum*

- glaucum) waste. Carbohydrate Polymers, 212, 160–168.
- Yang, G., Li, F., Tian, L., He, X., Gao, Y., Wang, Z. (2020). Soil physicochemical properties and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under brackish water mulched drip irrigation. Soil & Tillage Research, 199(February), 104592
- Yavuz, D., Yavuz, N., Seymen, M., Türkmen, Ö. (2015). Evapotranspiration, crop coefficient and seed yield of drip irrigated pumpkin under semi-arid conditions. Scientia Horticulturae, 197(1), 33–40
- Yin, W., Chai, Q., Zhao, C., Yu, A., Fan, Z., Hu, F., Fan, H., Guo, Y., Coulter, J. A. (2020). Water utilization in intercropping: A review. Agricultural Water Management, 241(June), 1–13
- Yufeng, Z., Saddique, Q., Ali, A., Xu, J., Khan, M. I., Qing, M., Azmat, M., Cai, H., Siddique, K. H. M. (2021). Deficit irrigation improves maize yield and water use efficiency in a semi-arid environment. Agricultural Water Management, 243(August 2020), 106483
- Zegbe, J. A., Serna-Pérez, A., Mena-Covarrubias, J. (2014). Mineral nutrition enhances yield and affects fruit quality of ‘Cristalina’ cactus pear. Scientia Horticulturae, 167(1), 63–70
- Zhang, P., Wei, T., Han, Q., Ren, X., Jia, Z. (2020). Effects of different film mulching methods on soil water productivity and maize yield in a semiarid area of China. Agricultural Water Management, 241(July 2019), 106382
- Zhang, Y., Duan, Y., Nie, J., Yang, J., Ren, J., van der Werf, W., Evers, J. B., Zhang, J., Su, Z., Zhang, L. (2019). A lack of complementarity for water acquisition limits yield advantage of oats/vetch intercropping in a semi-arid condition. Agricultural Water Management, 225(April), 105778
- Zhang, Y., Duan, Y., Nie, J., Yang, J., Ren, J., Werf, W. Van Der. (2019). A lack of complementarity for water acquisition limits yield advantage of oats / vetch intercropping in a semi-arid condition. Agricultural Water Management, 225(April), 105778
- Zhang, Z., Yu, K., Siddique, K. H. M., Nan, Z. (2019). Phenology and sowing time affect water use in four warm-season annual grasses under a semi-arid environment. Agricultural and Forest Meteorology, 257–269