



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Sistemas Agroflorestais no Semiárido Brasileiro: Uma Revisão sobre Viabilidade, Benefícios Econômicos e Ecológicos

Wagner Martins dos Santos¹, Lady Daiane Costa de Sousa Martins², Claudenilde de Jesus Pinheiro Costa³, Yasmin Caroline da Silva Matos³, Luana da Silva Medeiros⁵, Rhaiana Oliveira de Aviz⁴, Marcelo Lopes dos Anjos⁵, Vinícius Soares Viana⁵, Jonas Bezerra de Lima⁵, Welder Willian Ângelo da Silva⁵, Kaique Renan da Silva Salvador³, Alan Cezar Bezerra⁵, Evaristo Jorge Oliveira de Souza⁵

¹ Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP: 52171-900, Recife, Pernambuco, Brasil. Autor correspondente: wagnerms97@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-3584-1323>)

² Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP: 52171-900, Recife, Pernambuco, Brasil. ladydaianecsm@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-0942-4673>)

³ Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP: 52171-900, Recife, Pernambuco, Brasil. claudenildepinheiro@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-7379-6199>); matosyasmin01@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-4000-7680>); kaiquersalvador@outlook.com (<https://orcid.org/0000-0002-6119-2865>)

⁴ Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Piauí, Bairro Ininga, CEP: 64049-550, Teresina, Piauí, Brasil. rhaianaoliveiradeaviz@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-4462-4339>)

⁵ Universidade acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Gregório Ferraz Nogueira, S/N - José Tomé de Souza Ramos, 56909-535, Serra Talhada, Pernambuco, Brasil. marialuana.medeiros@ufrpe.br (<https://orcid.org/0009-0009-5014-4567>); zootecnista.m.lopes@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0006-8550-8031>); viniciussoaresv2016@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0001-3980-9240>); jonas.bezerra118@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0005-3348-2354>); welderwillian12@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0006-8766-154X>); alan.bezerra@ufrpe.br (<https://orcid.org/0000-0002-9986-9464>); evaristojorge@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-2206-414X>)

Artigo recebido em 26/01/2024 e aceito em 14/10/2024

RESUMO

O semiárido brasileiro tem passado por extensos processos de degradação ambiental, principalmente devido a impactos causados pela atividade agropecuária, desmatamentos e queimadas, apresentando como seu bioma predominante, a Caatinga, o qual possui cerca de 50% da sua paisagem original modificada. O uso de sistemas agroflorestais (SAFs) tem sido abordando na literatura destacando-se como uma forma de exploração sustentável, adotados em diversas regiões ao redor do globo, contudo no semiárido brasileiro, apesar do crescimento de áreas destinadas aos SAFs ter ocorrido no Brasil nos últimos anos, adoção desses sistemas na região semiárida ainda é pouco difundida. Considerando-se os benefícios da adoção dos SAFs onde se destacam a assimilação de carbono e nitrogênio, conservação do solo, redistribuição hidráulica, ciclagem de nutrientes e biodiversidade, e a importância da preservação de áreas do semiárido brasileiro e garantia de segurança alimentar dos produtores, e assim a abordagem econômica e ecológica dos sistemas agroflorestais, objetivou-se com essa revisão enriquecer as discussões sobre esses sistemas, seus benefícios e sua viabilidade, como forma de produção agrícola sustentável e fonte de renda a ser adotada no semiárido brasileiro.

Palavras-chave: sistemas agroflorestais; semiárido, silvopastoril; sustentabilidade; biodiversidade.

Agroforestry Systems in the Brazilian Semi-arid: A Review of Feasibility, Economic and Ecological Benefits

ABSTRACT

The Brazilian semi-arid has gone through extensive processes of environmental degradation, mainly due to impacts caused by agricultural activities, deforestation and fires, with the Caatinga as its predominant biome, which has about 50% of its original landscape modified. The use of agroforestry systems (SAFs) has been addressed in the literature, standing out as a form of sustainable exploitation, adopted in several regions around the globe, however in the Brazilian semi-arid region, despite the growth of areas destined to SAFs having occurred in Brazil in the recent years, the adoption of these systems in the semi-arid region is still not widespread. Considering the benefits of adopting SAFs where the assimilation of carbon and nitrogen, soil conservation, hydraulic redistribution, nutrient cycling and biodiversity stand out, and the importance of preserving areas in the Brazilian semi-arid region and ensuring food security for producers, and thus the economic and ecological benefits of agroforestry systems, the objective of this review was to enrich the discussions about these systems, their benefits and their viability, as a form of sustainable agricultural production and source of income to be adopted in the Brazilian semi-arid.

Santos, W. M. dos.; Martins, L. D. C. S.; Costa, C. de J. P.; Matos, Y. C. da S.; Medeiros, L. da S.; Aviz, R. O. de; Anjos, M. L. dos; Viana, V. S.; Lima, J. B. de; Silva, W. W. Â. da; Salvador, K. R. da S.; Bezerra, A. C.; Souza, E. J. O. de.

ecological approach to agroforestry systems, the aim of this review was to enrich discussions on these systems, their benefits and their viability, as a form of sustainable agricultural production and a source of income to be adopted in the Brazilian semiarid region.

Keywords: agroforestry Systems; semiarid; silvopastoral; sustainability; biodiversity.

* E-mail para correspondência: wagnerms97@gmail.com

Introdução

A crescente pressão por uma agricultura mais sustentável reflete as limitações dos sistemas convencionais baseados na monocultura intensiva, que, embora altamente produtivos a curto prazo, resultam em impactos negativos consideráveis, como a degradação do solo, a perda de biodiversidade e o aumento das emissões de gases de efeito estufa (Babu et al., 2023). Neste cenário, a ONU (organização das Nações Unidas) propôs em 2015 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecimento como prazo de serem atingidos até 2030 (Gyimah et al., 2023), como uma maneira de ajudar os países a atingir modos de vida mais sustentáveis. Por outro lado, ainda há a necessidade aumentar a produção dos sistemas de cultivos, visto que a projeção de aumento da população mundial é cerca de 9,7 bilhões de pessoas até 2050 (United Nations, 2019). Desta forma, o setor agrícola precisa encontrar soluções que permitam aumentar a produção de alimentos sem comprometer os ecossistemas naturais e, ao mesmo tempo, mitigar os impactos das mudanças climáticas.

Considerando a implementação de práticas resilientes, como o melhoramento genético, consórcio de culturas, plantio direto, sistemas eficientes de irrigação, aproveitamento de resíduos, reúso de água, agricultura de precisão, rotação de culturas e sistemas agroflorestais (SAFs) (Araújo Júnior et al., 2024; Semeraro et al., 2023). Os (SAFs) emergem como uma solução promissora para a exploração sustentável dos recursos naturais, combinando práticas agrícolas e florestais de maneira que favorece a conservação ambiental e a diversificação produtiva. Estes sistemas integram práticas de cultivo agrícola ou forrageiro com o cultivo de espécies florestais, formando três categorias principais: agrossilvicultura (espécies florestais + culturas agrícolas), silvipastoril (espécies florestais + pastagens) e agrossilvipastoril (espécies florestais + culturas agrícolas + pastagens) (Hübner et al., 2021).

A introdução de árvores em áreas agrícolas melhora a estrutura do solo, aumenta a retenção de água, promove a ciclagem de nutrientes, possibilita

uma maior assimilação de carbono e nitrogênio e contribui para um sistema maior biodiversidade. Simultaneamente, a presença de culturas agrícolas e a integração com a atividade pecuária diversificam as fontes de renda e aumentam a resiliência dos produtores frente às variações climáticas (Elbakidze et al., 2021; Fernández et al., 2020; Hafner et al., 2021; M. P. Nguyen et al., 2021; Raza et al., 2021; Ribeiro et al., 2019; Viera & Schumacher, 2011; Villarreyna et al., 2020). Neste contexto, a busca por práticas agrícolas e florestais sustentáveis é essencial.

Estudos têm destacado a importância dos SAFs, considerando seu papel crucial na manutenção do equilíbrio ecológico e na mitigação dos impactos das mudanças climáticas, (Baier et al., 2023; Gross et al., 2022; A. M. dos Santos et al., 2021; Yasin et al., 2023). Yasin et al. (2023) identificaram os SAFs como importante ferramenta no alcance das metas de mitigação de mudanças climáticas do Paquistão, com foco principal no estoque geral de carbono (C) (estoque total de C da vegetação do ecossistema + C do solo), destacando a importância de pesquisas e investimentos em SAFs. Gross et al. (2022) destacaram a importância na redução de emissão do óxido nitroso e aumento do armazenamento de carbono. Baier et al. (2023) avaliaram os SAFs como solução para segurança alimentar e impactos ambientais causados pelo cultivo intensivo do milho, identificando que, no geral, os SAFs contribuíram para o incremento mediano de rendimento do milho, respondendo positivamente a adição de podas das árvores ao solo. Santos et al. (2021) enfatizam o papel fundamental das florestas para manutenção do equilíbrio no planeta, nas mudanças significativas no ciclo hidrológico, afetando a qualidade da água e dos ambientes aquáticos, na manutenção da biodiversidade, na elevação da temperatura média a nível global e regional e intensificação de eventos climáticos extremos.

No Brasil, o interesse por SAFs tem crescido rapidamente, com destaque para a agricultura familiar, que desempenha um papel fundamental na segurança alimentar do país.

Santos, W. M. dos.; Martins, L. D. C. S.; Costa, C. de J. P.; Matos, Y. C. da S.; Medeiros, L. da S.; Aviz, R. O. de; Anjos, M. L. dos; Viana, V. S.; Lima, J. B. de; Silva, W. W. Â. da; Salvador, K. R. da S.; Bezerra, A. C.; Souza, E. J. O. de.

Segundo o Censo Agropecuário Brasileiro de 2017 (IBGE, 2019), a área destinada a sistemas agroflorestais aumentou de 8,3 milhões de hectares em 2006 para mais de 13,8 milhões de hectares em 2017, um crescimento de 67% em apenas uma década. Esta expansão é reflexo da crescente valorização dos sistemas agroflorestais, com cerca de 31% da área destinada a sistemas florestais na agricultura familiar, incluindo aproximadamente 6,03% para SAFs, e o restante entre matas plantadas e naturais. Uma das principais barreiras para a expansão mais acelerada dos SAFs são as limitações impostas, principalmente, pela ampla diversidade e complexidade dos sistemas de produção no Brasil, que variam amplamente em termos de clima, solo e disponibilidade de recursos (Gori Maia et al., 2021). Além disso, a falta de capacitação técnica e de incentivos financeiros adequados muitas vezes dificulta a implementação desses sistemas pelos pequenos produtores. No entanto, sua adoção torna-se cada vez mais essencial para garantir a segurança alimentar frente ao aumento populacional, às mudanças climáticas e à crescente escassez de recursos naturais (Balasundram et al., 2023; Dagar et al., 2023; Lu & Wang, 2023; T. T. Nguyen et al., 2023; Singh et al., 2023; Tadesse et al., 2021).

O Brasil, país de dimensões continentais, abriga uma vasta biodiversidade distribuída em seis biomas principais: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal. De acordo com a recente coleção do MapBiomias, o Brasil perdeu aproximadamente 33% de sua vegetação nativa entre 1985 e 2023. As reduções variam entre os biomas: na Amazônia, houve uma perda de 14% da vegetação nativa, o que corresponde a cerca de 55 milhões de hectares; na Caatinga, a redução foi de 14%, ou 8,6 milhões de hectares; no Cerrado, a perda atingiu 27%, representando 9,7 milhões de hectares; no Pampa e no Pantanal, as reduções foram de 28% cada, o equivalente a 3,3 milhões de hectares. O bioma Caatinga, exclusivamente brasileiro, é caracterizado por ser predominante na região semiárida do país, o bioma abriga uma biodiversidade rica e peculiar, repleta de espécies endêmicas que desenvolveram estratégias de sobrevivência frente as condições semiáridas (Ganem et al., 2020). O semiárido brasileiro, dito como o semiárido mais populoso do planeta, apresenta condições climáticas particularmente desafiadoras para a agricultura convencional, com precipitação média anual variando entre 300 e 800

mm, distribuída de forma irregular, longos períodos de estiagem, temperaturas elevadas e alta demanda evapotranspirativa (Alvalá et al., 2019; Alvares et al., 2013). Esses fatores limitam a produtividade agrícola e aumentam o risco de desertificação. A desertificação, intensificada pelo manejo inadequado das terras e pela exploração excessiva dos recursos naturais, é um dos maiores desafios para a sustentabilidade ambiental e econômica da região (B. F. Silva et al., 2023). Nesse cenário, os SAFs emergem como uma alternativa viável para restaurar ecossistemas degradados e aumentar a resiliência da agricultura às condições climáticas adversas do semiárido brasileiro.

Diante do exposto, os SAFs representam uma solução promissora para os desafios enfrentados pela agricultura no semiárido brasileiro, oferecendo uma alternativa sustentável, integrando árvores, cultivos e pecuária de forma a recuperar a fertilidade do solo, aumentar a resiliência às mudanças climáticas e promover a regeneração dos ecossistemas locais, contribuindo as comunidades rurais. As revisões sobre tema tem se concentrado na análise do sequestro de carbono orgânico em sistemas agro florestais (Lorenz & Lal, 2014), o efeito sobre a fauna e suas funções (Marsden et al., 2020), o desenvolvimento do sistema agroflorestal tropical (Mahmud et al., 2021), a recuperação do solo (Moraes & Cavichioli, 2022), avaliação dos indicadores de qualidade do solo (Fahad et al., 2022), a avaliação da implantação de SAFs em propriedades rurais (É. B. Silva et al., 2019) e a relação com autonomia dos produtores (Frederico & Moral, 2022). No entanto, não há revisões que contextualizem a implantação deste sistema em ambientes semiárido, assim como uma análise aprofundada dos efeitos das SAFs nas propriedades físico-químicas, conservação e produtividade nestas regiões.

Este estudo apresenta como hipótese que as SAFs permitem equilibrar das demandas produtivas e ambientais em ambientes semiáridos brasileiro. O presente estudo tem como objetivo investigar a viabilidade dos sistemas agroflorestais (SAFs) como uma estratégia para enfrentar os desafios ambientais e produtivos do semiárido brasileiro. Especificamente, busca-se analisar os impactos dos SAFs na conservação do solo, no ciclo de carbono e nitrogênio, e na melhoria da disponibilidade hídrica e do aporte de nutrientes,

verificando sua contribuição para a sustentabilidade econômica e ambiental da região.

Metodologia

Nesta revisão de literatura, o levantamento de estudos foi realizado nas principais bases de dados científicas, incluindo Scopus, Web of Science, Scielo, ScienceDirect e Google Scholar, a fim de assegurar um amplo escopo de informações e a qualidade científica dos materiais selecionados. Optou-se por concentrar a pesquisa em artigos publicados nos últimos 10 anos para capturar as abordagens e inovações mais recentes sobre o tema, sem, contudo, excluir artigos relevantes fora desse intervalo temporal.

A estratégia de busca foi elaborada com base na combinação de termos gerais e específicos relacionados aos tópicos de interesse da revisão, utilizando operadores booleanos para refinar os resultados. Sendo os termos: "agroforestry", "semiarid", "silvipastoral", "sustainability", "carbon assimilation", "nutrient cycling", "biodiversity", "water availability", "soil conservation", e "caatinga". Esses termos foram aplicados aos campos de título, resumo e palavras-chave dos artigos. A escolha desses termos visou capturar estudos que discutam a relevância dos sistemas agroflorestais (SAFs) no contexto do semiárido, especialmente em relação à conservação do solo, aporte de nutrientes, disponibilidade hídrica, e os ciclos de carbono e nitrogênio.

Semiárido brasileiro

A região semiárida do Brasil ocupa cerca de 62% da área do Nordeste, a região é caracterizada por longos períodos de secas, elevada variabilidade no regime de chuvas as quais são irregulares e mal distribuídas, com temperaturas elevadas e alta demanda evaporativa (W. M. dos Santos et al., 2017; J. L. B. da Silva et al., 2020; L. A. P. da Silva et al., 2023). Nesta região a economia

gira em torno da pecuária, com a criação de caprinos e ovinos. Contudo devido as condições limitantes a produção em biomassa das culturas e potencial forrageiro é reduzido (Queiroz et al., 2020).

Atualmente o semiárido tem se tornado ferramenta de estudo em função da perspectiva de preocupantes mudanças climáticas decorrentes da degradação da vegetação original. O uso e ocupação do solo, exploração da madeira se destacam entre as causas de elevados prejuízos a vegetação, acelerando o processo de desertificação (J. L. B. da Silva et al., 2020). (B. F. Silva et al., 2023) descrevem a alta susceptibilidade do semiárido a desertificação, aliado a problemas de degradação do solo. Associados a manejos inadequados e pela redução da capacidade de restauração ecológica, impulsionada pela seca severa que ocorreu em 2011. Além de descrever a importância social do semiárido, quanto a comunidades indígenas tradicionais.

A região apresenta como bioma característico a Caatinga é uma área ecológica que cobre 912.529 km², o que corresponde a 10% do território nacional. O termo 'Caatinga' refere-se principalmente a uma floresta tropical sazonalmente seca (FTSS) que apresenta uma variedade diversificada de fisionomias, devido as condições hídricas restritas as árvores raramente atingem alturas superiores a 20 metros, sendo constituída de pequenas árvores e arbustos. No Brasil o termo semiárido é frequentemente usado em referência a catinga, sendo importante ressaltar a distinção, uma vez que o termo Semiárido se refere a uma delimitação política baseada em parâmetros climatológicos, já a Caatinga é um bioma caracterizado por tipo de vegetação predominante (Ganem et al., 2020). Abrangendo nove estados, cobrindo a maior parte do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e a parte nordeste de Minas Gerais (Figura 1).

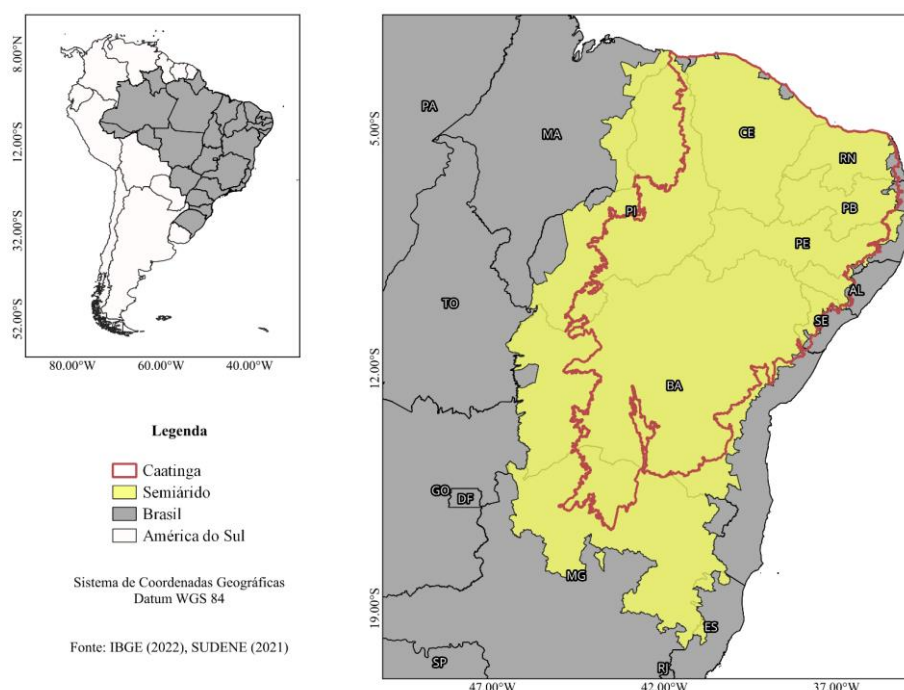


Figura 1. Mapa de delimitação dos limites da região Nordeste, do Semiárido brasileiro e do bioma Caatinga, bem como os estados que englobam.

A uma predominância de clima semiárido neste bioma, caracterizado por clima quente e seco que se caracteriza por alta radiação, altas temperaturas (23 - 27 ° C), baixa umidade relativa (60%) e baixa pluviosidade (300 - 800 mm ano-1), que resultam em elevadas taxas de evapotranspiração (2000 mm) (Alvalá et al., 2019; Alvares et al., 2013), esses fatores limitam o desenvolvimento das plantas. As espécies ocorrentes nessa região apresentam diversos mecanismos fisiológicos que as permitem se adaptarem as condições semiáridas, como o fechamento estomático diurno, folhas modificadas em espinhos, órgãos de armazenamento, perda de folhas (caducifolia), entre outros (Ganem et al., 2020).

O domínio Caatinga vem sofrendo um extenso processo de degradação ambiental, já ocupando a posição de terceiro bioma mais degradado do Brasil, logo após a floresta atlântica e o cerrado, as modificações sofridas por esse bioma já alcança patamares em torno de 50% (Oliveira et al., 2016; Queiroz et al., 2021). No entanto, ainda possui menor número de estudos quando comparado a outros biomas brasileiros (B. F. Silva et al., 2023). O processo degradativo tem

se intensificado pelo uso insustentável de seus recursos naturais, provocando uma elevação na perda da biodiversidade e no esgotamento dos recursos genéticos (Queiroz et al., 2021). Os principais impactos ambientais na vegetação nativa da caatinga ressaltam a agricultura como principal fonte de perturbação, além outras ações antrópicas como queimadas, desmatamento, pecuária, entre outros (Benfica et al., 2023; Pinheiro & Nair, 2018).

Com a alta pressão sobre os recursos naturais e a necessidade de atividades que afetem positivamente as atividades agrícolas, os sistemas agroflorestais (SAFS) surgem como um poderoso recurso gerando renda diversificada para os produtores rurais, contribuir para produção de alimentos, menor impacto ambiental promovendo a biodiversidade, melhor conservação do solo reduzindo a erosão, melhorando a fertilidade e permeabilidade, e menor exposição as mudanças climáticas (Jha et al., 2021; Ndlovu & Borrass, 2021).

Sistemas agroflorestais (SAFs)

Os (SAFs) são abordagens de uso da terra que combinam a produção agrícola e/ou pecuária com a produção florestal, envolvendo plantas perenes, herbáceas ou arbóreas em um mesmo espaço. Esses sistemas visam otimizar o uso da terra não apenas pela maximização da produtividade, mas também pela promoção da sustentabilidade. A diversificação de cultivos e o manejo integrado são componentes essenciais dos SAFs, permitindo interações benéficas entre as diferentes espécies presentes no sistema. Dessa forma, contribuem para a conservação dos recursos naturais, a melhoria da fertilidade do solo, a regulação do microclima, e a redução da vulnerabilidade a pragas e doenças, promovendo um equilíbrio ecológico e econômico, pelo fornecimento de nutrição, forragem e lenha, garantindo a subsistência local e conservação dos ecossistemas (Elbakidze et al., 2021; Litschel et al., 2023; Octavia et al., 2023).

SAFs e sua relação com a disponibilidade hídrica e conservação do solo

As árvores possuem a capacidade de manter maior umidade nas camadas superficiais nas áreas em sua proximidade, sendo pelo

escoamento que ocorre pelo tronco ou por meio da redistribuição hidráulica. A redistribuição hidráulica, que ocorre geralmente durante a noite quando as plantas não sofrem com os efeitos da transpiração, é um processo passivo pelo qual as plantas movem água de áreas de maior umidade para áreas mais secas no solo através de suas raízes, impulsionado por gradientes de potencial hídrico (Hafner et al., 2021). Isso é possível principalmente pelo sistema radicular mais desenvolvido das árvores, que absorvem água nas camadas mais profundas, e a transporta para as áreas mais superficiais, as quais comumente estão mais secas que as mais profundas, contribuindo para o desenvolvimento das culturas durante os períodos de escassez hídrica (Bogie et al., 2018) (Figura 2).

Bogie et al. (2018) com objetivo de descobrir se a redistribuição hidráulica beneficiaria culturas agrícolas, avaliaram o arbusto lenhoso, *Guiera senegalensis* JF Gmel, em um cultivo de *Pennisetum Glaucum* (milheto), em Sahel, uma zona climática de transição entre o árido deserto do Saara no Norte e a Savana no Sul. Onde obtiveram um aumento superior a 900% na biomassa de culturas sob estresse hídrico, quando cultivas em consorcio com o arbusto. O que fortalece a implementação de sistemas agroflorestais em áreas mais áridas com sérios riscos de segurança alimentar.

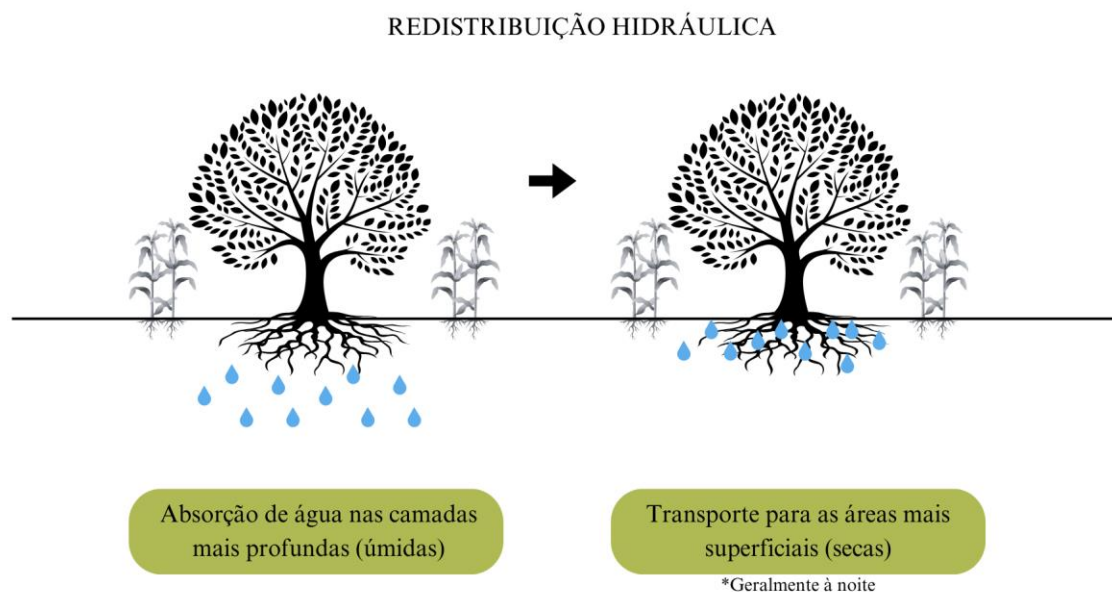


Figura 2. Efeito da adoção de sistemas agroflorestais (SAFs) na redistribuição hidráulica. Fontes: Autoral.

Além disso, os SAFs desempenham um papel crucial na mitigação da erosão do solo, que é um dos principais fatores de degradação resultante da remoção da camada superficial e da matéria orgânica (MOS) do solo (Raza et al., 2021). Esses sistemas promovem uma maior cobertura do solo e melhoram sua estrutura, resultando em uma proteção mais eficiente contra o impacto das gotas de chuva, bem como na redução da velocidade do vento e do escoamento superficial (M. P. Nguyen et al., 2021; Osuna-Ceja et al., 2019; Quandt, 2020). De toda forma, é necessário atentar-se as características como a eficiência no uso da água e profundidade do sistema radicular, já que raízes mais profundas permitem a absorção de água e nutrientes onde a cultura não exploraria, definindo os componentes referentes a silvicultura de forma adequada, para que não sejam competitivos a ponto de prejudicar a cultura agrícola (Mendes et al., 2013).

SAFs e o aporte de nutrientes

Podem possibilitar o aumento da disponibilidade de nutrientes na superfície do solo pela captação em profundidade através do seu

sistema radicular mais profundo, promovendo a ciclagem de nutrientes pela liberação de parte desses nutrientes absorvidos por meio da sua biomassa através da serrapilheira, podas, frutos e raízes mortas; adicionando assim, matéria orgânica e nutrientes abaixo e acima do solo (Carsan et al., 2014; Rayol & Alvino-Rayol, 2019; Schroth et al., 2001; Villarreyna et al., 2020).

A renovação e a decomposição de raízes mortas realizada por microrganismos, promovem o aumento de matéria orgânica e nutrientes em profundidade, além da liberação de exsudados radiculares utilizados como fonte de energia pelos microrganismos, promovendo o aumento da população microbiana e incentivando ou inibindo associações, como micorrizas, rizóbios e rizobactérias responsáveis por promover o crescimento de plantas (Badri & Vivanco, 2009; Bhagat et al., 2023; Carsan et al., 2014), os exsudados liberados da raiz possuem íons H^+ , água, oxigênio, ácidos inorgânicos e principalmente compostos a base de carbono (ligninas, carboidratos, proteínas, aminoácidos, ácidos orgânicos, flavonóis, ácidos graxos, enzimas).

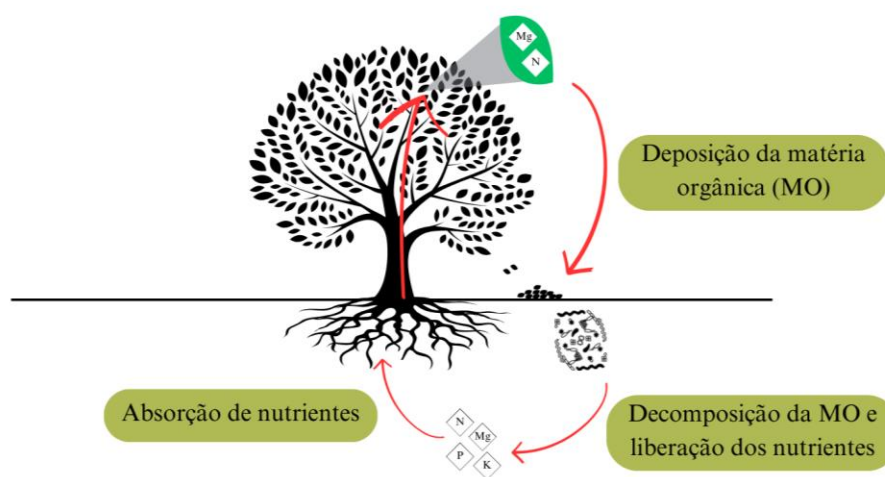


Figura 3. Efeitos dos sistemas agroflorestais (SAFs) no aumento do aporte de nutrientes na superfície do solo. Fonte: Autoral

Os SAFs têm demonstrado um potencial significativo para aumentar a disponibilidade de nutrientes na superfície do solo. Esse efeito é promovido pela captação de nutrientes em profundidade através do sistema radicular, que é mais profundo em comparação com sistemas agrícolas convencionais. A ciclagem de nutrientes é promovida pela liberação de nutrientes absorvidos pela biomassa das plantas, que são devolvidos ao solo através da serrapilheira, podas, frutos e raízes mortas (Carsan et al., 2014; Rayol & Alvino-Rayol, 2019; Schroth et al., 2001; Villarreyna et al., 2020). A captação de nutrientes em profundidade, desempenha um papel importante, reduzindo o aporte de nutrientes para corpos d'água, diminuindo o escoamento e a lixiviação, mitigando assim a perda de nutrientes para fora do sistema (Gairola et al., 2024; Kim & Isaac, 2022; Octavia et al., 2023).

Além disso, a renovação e a decomposição de raízes mortas realizada por microrganismos, promovem o aumento de matéria orgânica e nutrientes em profundidade. Aliado a liberação de exsudados radiculares, utilizados como fonte de energia pelos microrganismos. Promovendo o aumento da população microbiana e incentivando ou inibindo associações, como micorrizas, rizóbios e rizobactérias, que desempenham um papel crucial no crescimento das plantas. Os exsudados liberados da raiz possuem íons H⁺, água, oxigênio, ácidos inorgânicos e principalmente compostos a base de carbono (ligninas, carboidratos, proteínas, aminoácidos, ácidos orgânicos, flavonóis, ácidos graxos, enzimas) (Badri & Vivanco, 2009; Bhagat et al., 2023; Carsan et al., 2014).

A precipitação também exerce contribuição sobre o aporte de nutrientes, basicamente ao entrar em contato com o dossel das árvores arrastando-os da superfície das folhas, tronco e qualquer tecido vegetal que entre em contato (Perez-Marin & Menezes, 2008), além das partículas que são arrastadas da atmosfera e lixiviados de materiais vegetais e animais, dessa forma, contribuindo de forma importante para o aporte de nutrientes no solo em que alguns casos apresenta maior contribuição que a deposição de serrapilheira, como no aporte de, geralmente, mais da metade de K e mais de um terço de P e Mg, agindo inclusive sobre a serrapilheira ao entrar em contato com os nutrientes liberados pela decomposição (Scheer, 2008).

Correlação entre os SAFs e o ciclo de carbono e nitrogênio

Os SAFs desempenham um papel crucial no ciclo do carbono devido à sua capacidade de aumentar o estoque de carbono no solo, oferecendo um potencial de sequestro superior ao das culturas agrícolas e pastagens. Como bem destaca Lorenz & Lal (2014) a inclusão de árvores, especialmente as fixadoras de nitrogênio, pode aumentar especificamente o armazenamento de sequestro de carbono do solo em sistemas agroflorestais. Esta eficácia resulta da contribuição de biomassa tanto acima do solo quanto em profundidade, através de sistemas radiculares extensos das árvores (Ma et al., 2022; Maharjan et al., 2024; Ribeiro et al., 2019). A eficiência do sequestro de carbono nesses sistemas está intimamente ligada às práticas de manejo, características do sistema implementado, uso anterior da terra, e condições edafoclimáticas, como desmatamento e aração, que podem levar a emissões significativas de CO₂ (Feng et al., 2020; Ma et al., 2022; Mattila et al., 2022; Sykes et al., 2020; Tiefenbacher et al., 2021). Em seu estudo, Ma et al. (2022) identificaram que os estoques de carbono da biomassa vegetal, do solo mineral e o estoque total de carbono foram influenciados pelos diferentes usos da terra, independentemente do tipo de SAF. O carbono orgânico do solo é um componente essencial no SAFs, constituindo cerca de 58% da matéria orgânica. Embora boa parte dessa MOS seja relativamente inerte, resultando em frações entre 5 a 20% de carbono ativo que constitua a MOS total (Stockmann et al., 2013), o seu acúmulo em superfície contribui para melhora da atividade da fauna microbiota. Essa microbiota não apenas auxilia na decomposição da MOS, mas também é crucial para processos como a respiração do solo e a ciclagem de nutrientes, melhorando sua disponibilidade para as plantas (Han et al., 2020; Potter et al., 2017; Powlson et al., 2011).

Segundo o relatório de Segurança Alimentar do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) (Mbow, C. et al., 2019) são atribuídos ao setor alimentar cerca de 21 a 37% da emissão total dos gases do efeito estufa (GEE), estimando-se que nesse faixa as atividades agrícolas/pecuárias, processos de desmatamento e degradação, e atividades da cadeia de abastecimento, representam respectivamente 9 a 14%, 5 a 14%, e 5 a 10%. O IPCC denota a importância dos Sistemas Agroflorestais no

sequestro de carbono de forma direta e indireta, como o aumento do estoque em sua biomassa acima e abaixo do solo, e redução da erosão e degradação do solo, como taxas variando entre o clima semiárido, temperado, sub-úmido e úmido, com 954, 1431, 2238 e 3670 tCO km² ano⁻¹, com um potencial técnico de 0,1 a 5,7 Gt CO₂eq ano⁻¹, representando o maior potencial entre os usos de terra analisados (agricultura celular, aquicultura, pecuária e culturas agrícolas).

Contribuindo assim de forma eficiente para a mitigação climática, por possibilitar o sequestro de carbono mais estável no solo e consequentemente menor probabilidade de decomposição do mesmo, principalmente pela interação das árvores e culturas, resultando em aumento da biomassa e acúmulo de matéria orgânica, em um sistema de uso de terra a longo prazo resultando no armazenamento do carbono por um período prolongado (Guillot et al., 2021; Hübner et al., 2021; Lorenz & Lal, 2014).

O óxido nítrico está assim como o dióxido de carbono entre os gases de efeito estufa que mais contribuem para o aquecimento global, sendo o solo assim como para o C um importante reservatório pra o Nitrogênio (N) (Zhang et al., 2021), é ainda relatado na literatura uma forte relação do N com o C (Cai et al., 2021; Huang et al., 2020; Knicker, 2011; Mudge et al., 2021; Xu et al., 2021), devido a uma influência exercida pelo N sobre a atividade dos microrganismos, que são responsáveis bióticos do processo de decomposição da matéria orgânica do solo e consequentemente sobre o armazenamento de C (Huang et al., 2020; Xu et al., 2021).

Outro aspecto influenciado pelo N é o crescimento da planta, aumentando sua área foliar e da enzima RUBISCO (ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase) elevando a assimilação de carbono na fotossíntese, acarretando dessa forma no aumento da biomassa da cultura, elevação da quantidade de serapilheira, por conseguinte o aumento do estoque de C (Huang et al., 2020; Knicker, 2011).

Como dito por Knicker (2011), o nitrogênio é um importante componente da MOS sendo um fator limitante de crescimento e desenvolvimento, intimamente relacionado com a produtividade das culturas como um importante fator na produção de massa seca, maior perfilhamento e valor nutritivo de forragens. Com isso, torna-se comum encontrar trabalhos na literatura utilizando-se leguminosas como fonte de

nitrogênio para o cultivo, inclusive nos SAFs com a utilização de espécies como *Peltophorum dubium*, *Mimosa scabrella*, *Acacia polyphylla* e *Mimosa caesalpiniaefolia* (Coelho et al., 2007; Oliveira et al., 2016).

Viabilidade de sistemas agroflorestais

A busca por métodos de produção que proporcionem bom desenvolvimento econômico com mínimo de danos ao meio ambiente tem sido alvo do interesse dos produtores rurais (Cordeiro et al., 2018). A implantação de sistemas agroflorestais apresenta maior complexidade em comparação aos sistemas de produção convencional, isso ocorre devido a complexa interação entre as culturas agrícolas e as árvores, além do alto nível de planejamento e monitoramento destes na fase inicial (Lehmann et al., 2020). Estudos vem sendo realizados em diversos países quanto a viabilidade destes sistemas (Amare & Darr, 2023; Lehmann et al., 2020; E. M. Martins et al., 2019; Schembergue et al., 2017; Sgarbossa et al., 2018).

Amare & Darr (2023) avaliaram a rentabilidade financeira de três SAFs (acácia, bambu e eucalipto) da Etiópia, utilizando dados de 327 agricultores. Empregando os métodos: valor presente líquido (VPL), análise de custo-benefício, razão custo-benefício (BCR), taxa interna de retorno (TIR) e renda anualizada equivalente (EAI). No geral, todos os sistemas de AFI demonstraram viabilidade financeira, mas sua lucratividade é influenciada pela volatilidade do mercado e instabilidade política. O estudo enfatiza a importância da implementação de sistemas agroflorestais consorciados com diferentes culturas agrícolas e forrageiras, bem como de plantas que contribuam para a fertilidade do solo, já que as áreas se concentravam em cultivos específicos nos SAFs. Além disso, os autores recomendam a realização de pesquisas adicionais sobre a demanda e a localização dos mercados, visando aprimorar as políticas de intervenção agrícola no país.

Lehmann et al. (2020) ao avaliarem a produtividade agrônômica e a viabilidade econômica em diversos sistemas agroflorestais na Europa, em diferentes contextos socioeconômicos e ambientais nos países: Dinamarca, Reino Unido, Polônia, Romênia e Itália, verificaram que ambos os sistemas, em comparação com a monocultura, apresentaram produtividade cerca de 36 a 100 %

maiores. Contudo, apenas os SAFs da Dinamarca e Reino Unido foram avaliados quando a viabilidade econômica, verificando-se maior margem de lucro para os sistemas do Reino Unido, de € 5650 ha⁻¹ ano⁻¹, associada a contribuição de todos os componentes. Enquanto na Dinamarca, observou-se menor margem de lucro com € 112 ha⁻¹ ano⁻¹, devido ao custo de produção ter sido três vezes superior a receita gerada na comercialização da lasca de madeira, produto oriundo dos componentes florestais.

Schembergue et al. (2017) ao estudarem os sistemas agroflorestais como estratégia de adaptação aos desafios das mudanças climáticas no Brasil, verificaram que os municípios que apresentavam SAFs obtiveram aumento no valor da terra, podendo gerar lucros de até 8,7%. Ao passo que os municípios que não contêm nenhuma área cultivada com SAFs podem apresentar perdas de até 19,7%, principalmente devido a estes sistemas atuarem reduzindo a vulnerabilidade das culturas às variações climáticas.

Sgarbossa et al. (2018) avaliando a influência de diferentes sistemas agroflorestais e da poda de árvores sobre a radiação solar na produtividade da soja, obtiveram maior rendimento na monocultura com valores em torno de 3000 (2013/2014) e 2700 kg ha⁻¹ (2014/2015), enquanto os sistemas agroflorestais apresentaram valores em torno de 500 (2013/2014) e 700 kg ha⁻¹ (2014/2015). Os autores atribuíram tal discrepância principalmente pela maior incidência de radiação no monocultivo, denotando a importância do manejo para melhor interação entre os componentes do sistema.

Martins et al. (2019) avaliando a fauna verificaram que na época seca o SAF apresentou maior abundância de indivíduo com valores de até 246 ± 49 ind. arm. dia⁻¹ (indivíduo armadilha/dia) junto com o pasto próximo a ele, com valores de até 125 ± 29 ind. arm. dia⁻¹, enquanto as matas apresentaram até 28 ± 7 ind. arm. dia⁻¹, ordem que se manteve na época chuvosa, comportamento que demonstra a influência do SAF não somente na área de implantação, mas também nas suas proximidades. Apesar das coletas de Fungos

micorrízicos arbusculares (FMA) poder ter influenciado o número de esporos devido a coleta pouco profunda a 5 cm de solo, o SAF teve tendência de maiores valores que as pastagens embora não tenha diferenciado estatisticamente.

Adoção de sistemas agroflorestais na região semiárida do Brasil

A implantação de sistemas agroflorestais no semiárido brasileiro (Figura 4) ainda é considerado um assunto de elevada complexidade, isso devido principalmente a grande variabilidade climática nesta região. Contudo, o número de áreas implantadas com sistemas agroflorestais no Brasil apresentou crescimento de aproximadamente 67% no período entre 2006 a 2017, passando de 8,4 para 13,9 milhões de hectares (IBGE, 2019). Sendo assim, assunto de alguns estudos na literatura (Canul-Solis et al., 2017; Ganem et al., 2020; J. C. R. Martins et al., 2013, 2015; Oliveira et al., 2016; Perez-Marin & Menezes, 2008; Sacramento et al., 2013; G. L. Silva et al., 2011).

Martins et al. (2013) ao avaliarem a produtividade de biomassa em sistemas agroflorestais e convencionais durante 4 anos, promovendo a interação entre gliricídia e maniçoba com capim buffel, palma e consórcio milho + feijão, obtiveram em 2008 valores menores para os SAFs com produtividade média de 5.047 kg ha⁻¹ de MS, enquanto os sistemas convencionais apresentaram 6.782 kg ha⁻¹ de MS, com valores de até 91 e 95% maiores para a produção de feijão + milho e 40% na produção de buffel, ao comparar com os SAFs.

Porém, quando verificado os coeficientes de variação na produtividade da biomassa ao longo dos 4 anos, observaram-se menores valores para os SAFs, com milho + feijão, buffel e palma com 16; 42 e 12%, e o sistema convencional com 91 e 70% para milho + feijão e buffel, fator atribuído principalmente a disponibilidade hídrica. Quanto a biomassa, embora menor quando comparado os cultivos, foram verificados aumentos de 7, 16, 1,5 e 2 vezes na produtividade da biomassa ao se comparar em conjunto com as arbóreas.

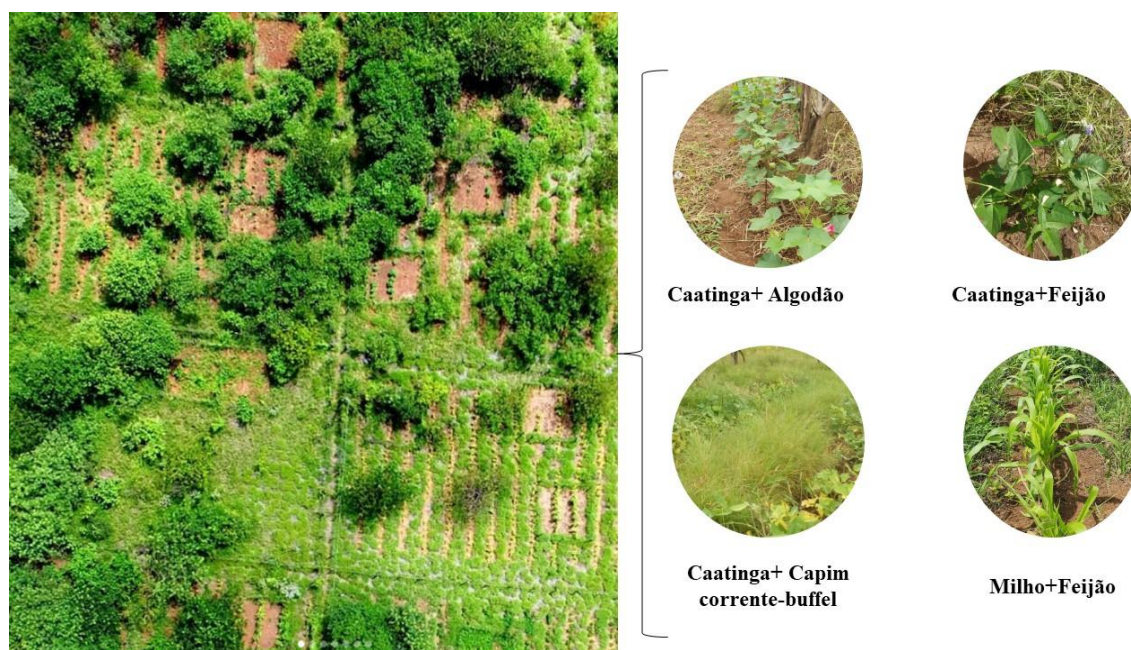


Figura 4. Sistemas Agroflorestal (SAFs) experimental implementado no semiárido brasileiro no bioma Caatinga. Fonte Autoral.

Martins et al. (2015) ao estudaram a fixação biológica de nitrogênio em sistemas agroflorestais e convencionais no semiárido nordestino, analisando a interação entre as culturas gliricidia e maniçoba com capim buffel, palma e consorcio milho + feijão, verificou que a quantidade de nitrogênio fixada pelo feijão no sistema tradicional foi de 30 kg ha⁻¹, já no sistema agroflorestal foi de 2,7 kg ha⁻¹. Isso ocorreu, segundo os autores, devido a gliricídia não ter contribuído na quantidade de nitrogênio fixada no sistema milho com feijão caupí, além da leguminosa ter apresentado baixa produção de biomassa. Contudo, no sistema de associação de palma com capim-buffel as folhas das árvores adicionaram cerca de 40kg ha⁻¹ de nitrogênio, apresentando assim potencial para reduzir de forma significativa o custo de fertilizantes.

Perez-Marin; Menezes (2008) ao avaliarem a proporção da água de chuva que escoar através da copa das árvores, pelo tronco, ou interceptada pela copa; e as entradas de N, P e K contidos na água escoada, bem como na água de chuva em áreas sem árvores, obtiveram que do total da precipitação pluvial, 67% escoaram através da copa, 0,74 % escoaram pelo tronco e 32 % foram interceptadas pela copa das árvores.

As concentrações de N e P nas amostras de água escoadas através da copa e do tronco foram

cerca de 300% maiores que a da água da chuva, já as concentrações de K da água escoada pelo tronco foi cerca de 600% maior que a água escoada através da copa e da chuva, além disso, a quantidade de N, P e K incorporado no solo foi respectivamente 5, 1 e 24 kg ha⁻¹ na água de chuva; 9, 2 e 62 kg ha⁻¹ na água escoada através da copa; e 0,12, 0,02 e 1 kg ha⁻¹ na água escoada pelo tronco.

Sacramento et al. (2013) ao avaliarem a influência sobre estoques de C e N do solo de sistemas agroflorestais (agrossilvipastoril e silvipastoril) e sistemas agrícolas tradicionais (derrubada e queima seguida de cultivo por dois a três anos), em comparação com sistemas de vegetação natural de Caatinga após 13 anos de cultivo no semiárido cearense.

Verificaram valores de estoque de carbono no solo de 134,65; 97,59; 71,64 e 68,16 Mg ha⁻¹ para vegetação natural, silvipastoril, agrossilvipastoril e sistema tradicional, respectivamente, representando um aumento de cerca de 7,68% para a vegetação natural e uma redução de 19,65; 6,68 e 46,34% para os sistemas, silvipastoril, agrossilvipastoril e sistema tradicional, quando comparado o início e final do banco de dados avaliados. Quanto ao estoque de nitrogênio no solo, os valores encontrados foram 5,65; 5,23; 4,09 e 3,59 Mg ha⁻¹ para vegetação natural, silvipastoril, agrossilvipastoril e sistema

tradicional, respectivamente, representando uma redução de cerca de 44,33; 50,47; 52,05 e 72,72% para a vegetação natural, silvipastoril, agrossilvopastoril e sistema tradicional.

Demonstrando dessa forma, menores reduções para os sistemas com presença de componentes florestais, principalmente quanto ao sistema agrossilvopastoril quando comparado com o silvipastoril e o sistema tradicional, na promoção do sequestro de C e N do solo na região semiárida brasileira.

Silva et al. (2011) ao avaliarem a qualidade física do solo em sistemas agroflorestais, de vegetação natural Caatinga e cultivo convencional no semiárido nordestino, verificaram que os sistemas agroflorestais (silvipastoril, agrossilvopastoril) mantiveram as propriedades do solo em níveis semelhantes ao qualidade do solo sob vegetação natural, além disso nos cultivos convencionais as propriedades do solo foram drasticamente afetadas de modo que o tempo de pousio após cultivo não foi suficiente para recuperação das propriedades físicas do solo.

Oliveira et al. (2016) avaliando a redução de custos de implantação de sistemas agroflorestais projetados para a Caatinga pela inclusão de culturas agrícolas, verificaram que o consorcio de gliricídia com milho reduziu para a produção de milho verde e de grãos, cerca de R\$ 4.380,16 e R\$ 92,95, respectivamente, já para o consorcio do sábia com milho, constatarem uma redução de R\$ 3.866,88 para produção de milho verde e R\$ 334,37 para a produção de grão, onde evidenciaram, que o consorcio com milho não só contribui para redução dos custos de implantação como também gerou lucro para os sistemas agroflorestais.

Canul-Solis et al. (2017) avaliando a produção de forragem, a porcentagem de componentes da forragem e a qualidade nutricional da biomassa de *Cynodon nlemfuensis*, *Tithonia diversifolia* e *Gliricidia sepium* em um sistema agroflorestal com as três espécies, comparando com suas respectivas produções em monocultura, obtendo-se maior produção total para os SAFs para *T. diversifolia* no SAF, com *C. nlemfuensis* sendo a mais afetada, possivelmente pela menor disponibilidade de radiação e competição por recursos, e embora não tenha afetado a produção dos componentes de forragem observou-se que em ambos sistemas a maior disponibilidade de material comestível de *T. diversifolia* e *Gliricidia*

sepium foi maior, a avaliação da qualidade nutricional não afetou as espécies, de modo que os maiores teores de FDN foram encontradas para *C. nlemfuensis*, e os de proteína bruta para *T. diversifolia* e *Gliricidia sepium*, em ambos cultivos.

Sistemas agroflorestais na atividade agropecuária

Os sistemas agroflorestais possuem diversas finalidades a partir do sistema abordado, entre tais, os que em conjunto das culturas utilizadas empregam a utilização de animais (Figura 5), seja pelo pastejo direto ou pelo fornecimento de forragem, sendo a atividade pecuária muito importante, inclusive na região semiárida. Dessa forma, vários trabalhos abordaram o desempenho dos SAFs em relação a produção agropecuária (Cleef et al., 2019; Costa et al., 2015; Magalhães et al., 2020; Paciullo et al., 2011).

Cleef et al. (2019) avaliando os efeitos dos sistemas agroflorestais no consumo de ração, desempenho de crescimento, características de carne e carcaça de cordeiros terminados em confinamento por 30 dias, utilizando 24 cordeiros machos mestiços (Santa Inês × Dorper) em três sistemas, capim massai solteiro, capim massai com eucalipto de 12 m x 2 m, e com eucalipto de 6 m x 2 m, sendo que os animais não se alimentaram do componente arbóreo; verificaram que os sistemas agroflorestais empregados não diferiram do convencional em peso de carcaça, na eficiência alimentar, temperatura e pH da carcaça. Mostrando que mesmo não melhorando, a utilização do sistema agroflorestal também não prejudicou as características avaliadas.

Paciullo et al. (2011) Avaliando em três anos as características de pastagem e o desempenho de novilhas (vacas não lactantes Holandês × Zebu) em sistema silvipastoril (SP) e de monocultura (MC), com *Brachiaria decumbens* em ambos, e *Acacia mangium*, *A. Angustissima*, *Mimosa artemisiana* e *Eucalyptus grandis* no SP, encontrando matéria seca de forragem maior para o MC em 202 kg MS/ha/ciclo de pastejo no segundo ano na estação chuvosa e maior para o SP em 214 kg MS ha⁻¹ ciclo⁻¹ de pastejo no terceiro ano na estação seca, as taxas de lotação variaram entre 0,8 e 1,6 UA ha⁻¹ diferindo somente segundo ano na estação chuvosa e no terceiro ano na estação

seca, com maiores valores para MC e SP, respectivamente.

O teor de proteína bruta variou durante a estação chuvosa, com 8,8% para o SP e 7,8% para o MC, o SP também apresentou maior ganho médio de peso corporal por animal (512 g dia^{-1}) do que no

MC (452 g dia^{-1}), ou seja, uma diferença de 60 g dia^{-1} , demonstrando maior eficiência do SP para a criação de novilhas leiteiras, mostrando que nesse caso não ocorreu influência do sombreamento que correspondeu a 29% e que possivelmente as leguminosas arbóreas beneficiaram o sistema.



Figura 5. Integração lavora pecuária em sistemas agroflorestais (SAFs) experimentais implementado no semiárido brasileiro no bioma Caatinga. Fonte Autoral.

Magalhães et al. (2020) avaliando o bem-estar animal entre um sistema de monocultura com capim-braquiária (MC) e dois sistemas agroflorestais (ILFt - capim-braquiária + fila tripa de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* clone H13) e ILFs - capim-braquiária + fila simples de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* clone H13), verificam diversos índices, onde o valor médio para o THI (índice de temperatura-umidade) foi menor no ILFt (76,8) do que os encontrados no ILFs (77) e MC (77,2), com limites em torno de 79-83, essa ordem também seguiu para BGHI (índice de temperatura-umidade do globo negro) (83, 83,8, 85,4) com limites em torno de 85-87, e para RTL (carga de radiação térmica, W m^{-2}) (616,8, 631,7, 672,2) com limites em torno de 700 W m^{-2} .

Avaliando as áreas que apresentaram níveis críticos para os animais, os autores

obtiveram reduções variando de 20 até 100% ao comparar os sistemas agroflorestais com a monocultura. Demonstrando a importância desses sistemas no conforto animal, reduzindo o estresse por calor, como uma importante estratégia para às crescentes temperatura advindas das mudanças climáticas.

Costa et al. (2015) estudando a massa de forragem e o comportamento ingestivo de caprinos em sistema silvipastoril (SP) com leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de wit.) e um estrato herbáceo (EH) composto pelas gramíneas: capim-andropógon (*Andropogon gayanus kunth*), capim-colonião (*Panicum maximum* Jacq vr. Colonião), capim-tifton 85 (*Cynodon spp*), e capim-marmelada (*Brachiaria plantaginea* (Link) Hitchc), leguminosas: estilosantes nativo (*Stylosanthes spp*) e a malícia (*Mimosa pudica* L).

Obtendo-se uma produção média de 1063,15 kg MS ha⁻¹ (quilo de matéria seca por hectare) para a leucena; para o estrato herbáceo verificaram 4.215 kg MS em massa de forragem, estimando-se para essa produção uma lotação em torno de 43 animais/ha com peso vivo médio de 25kg, para 5 dias de pastagem e 30 de descanso.

Quanto ao pastejo dos animais, observaram que dedicaram cerca de 6 h para o estrato e 1 h para a leucena, atribuído pela alta disponibilidade de forragem, e tempo de ócio entre 0,2 e 0,7 h, sendo ambos maiores e menores, respectivamente, quando comparadas com valores da literatura de 5,9 h e 5,0 h para o pastejo e 2,6 e 4,0 h para o ócio, indicando que o conforto térmico junto com a diversificação na fonte de alimento, contribuíram para maior atividade de pastejo. Além disso, taxa de ingestão de 0,10 g MS Min⁻¹ kg PV⁻¹ e consumo diário de 43,3 g MS kg⁻¹ PV dia⁻¹.

Considerações Finais

Este estudo evidenciou a relevância dos Sistemas Agroflorestais (SAFs) como uma solução viável e sustentável para os desafios enfrentados pela agricultura no semiárido brasileiro. Ao longo da pesquisa, foi possível observar que a implementação de SAFs não apenas contribui para a conservação do solo e a ciclagem de nutrientes, mas também desempenha um papel crucial na promoção da biodiversidade e na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Os dados analisados demonstraram que a introdução de árvores em áreas agrícolas resulta em um aumento significativo na retenção de água e na qualidade do solo, fatores essenciais para a sustentabilidade da produção agrícola em uma região caracterizada por sua vulnerabilidade hídrica.

Além disso, os resultados indicaram que os SAFs podem aumentar a produtividade das culturas em comparação com sistemas convencionais quando bem manejados, proporcionando uma alternativa econômica viável para os agricultores familiares. Essa diversificação das fontes de renda não apenas melhora a segurança alimentar, mas também fortalece a resiliência dos produtores frente às variações climáticas, um aspecto cada vez mais relevante em um cenário de incertezas ambientais. Sendo crucial a implementação de políticas públicas que incentivem a adoção dos SAFs. A falta de conhecimento e de recursos financeiros são

barreiras significativas que precisam ser superadas. Portanto, é fundamental que programas de capacitação e financiamento sejam implementados, visando não apenas a disseminação das práticas agroflorestais, mas também a promoção de uma cultura de sustentabilidade entre os agricultores.

Em síntese, os Sistemas Agroflorestais se apresentam como uma estratégia eficaz e necessária para a promoção de uma agricultura sustentável no semiárido brasileiro. A adoção desses sistemas não só contribui para a preservação dos ecossistemas locais, mas também assegura a viabilidade econômica e a segurança alimentar das comunidades rurais. Assim, a continuidade das pesquisas e o investimento em SAFs são essenciais para garantir um futuro mais sustentável e resiliente para a agricultura na região.

Agradecimentos

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE (IBPG-1035-5.01/21); ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (88887.824767/2023-00) pela bolsa de pesquisa e estudo dos autores.

Referências

- Alvalá, R. C. D. S., Cunha, A. P. M. A., Brito, S. S. B., Seluchi, M. E., Marengo, J. A., Moraes, O. L. L., & Carvalho, M. A. (2019). Drought monitoring in the Brazilian semiarid region. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 91, 91. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>
- 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. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Amare, D., & Darr, D. (2023). Profitability of Smallholder Agroforestry Woodlot Innovations. *Human Ecology*, 51(5), 1009–1019. <https://doi.org/10.1007/S10745-023-00446-5/TABLES/6>
- Araújo Júnior, G. do N., Leite, R. M. C., Morais, J. E. F. de, Alves, C. P., Souza, C. A. A. de,

- Almeida, A. C. dos S., Jardim, A. M. da R. F., Souza, L. S. B. de, Eugenio, D. da S., & Silva, T. G. F. da. (2024). Growth Dynamic, Productivity, Evapotranspiration, and Water-Economic Indices of Forage Cactus under Different Irrigation Depths. *Agronomy*, 14(4), 691. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14040691/S1>
- Babu, S., Singh, R., Avasthe, R., Rathore, S. S., Kumar, S., Das, A., Layek, J., Sharma, V., Wani, O. A., & Singh, V. K. (2023). Conservation tillage and diversified cropping enhance system productivity and eco-efficiency and reduce greenhouse gas intensity in organic farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1114617. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2023.1114617/BIBTEX>
- Badri, D. V., & Vivanco, J. M. (2009). Regulation and function of root exudates. *Plant Cell and Environment*, 32(6), 666–681. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.01926.x>
- Baier, C., Gross, A., Thevs, N., & Glaser, B. (2023). Effects of agroforestry on grain yield of maize (*Zea mays* L.)—A global meta-analysis. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1167686. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2023.1167686/BIBTEX>
- Balasundram, S. K., Shamshiri, R. R., Sridhara, S., & Rizan, N. (2023). The Role of Digital Agriculture in Mitigating Climate Change and Ensuring Food Security: An Overview. *Sustainability 2023, Vol. 15, Page 5325*, 15(6), 5325. <https://doi.org/10.3390/SU15065325>
- Benfica, N. S., Da Silva Gomes, A., Iwai Drumond, C. E., & Zanchi, F. B. (2023). The Relation Between Net Primary Productivity And Human Activities For Three Biomes In Bahia State, Brazil. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*, 15(4), 6–16. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-021>
- Bhagat, S., Shete, P., & Jain, A. (2023). Plant health: Feedback effect of root exudates and rhizobiome interactions. *Rhizobiome: Ecology, Management and Application*, 345–375. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16030-1.00007-9>
- Bogie, N. A., Bayala, R., Diedhiou, I., Conklin, M. H., Fogel, M. L., Dick, R. P., & Ghezzehei, T. A. (2018). Hydraulic redistribution by native sahelian shrubs: Bioirrigation to resist in-season drought. *Frontiers in Environmental Science*, 6(SEP), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00098>
- Cai, Z., Xie, T., & Xu, J. (2021). Source–sink manipulations differentially affect carbon and nitrogen dynamics, fruit metabolites and yield of Sacha Inchi plants. *BMC Plant Biology*, 21(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-02931-9>
- Canul-Solis, J. R., Castillo-Sánchez, L. E., Escobedo-Mex, J. G., López Herrera, M. A., & Lara Lara, P. E. (2017). Rendimiento y calidad forrajera de *Gliricidia sepium*, *Tithonia diversifolia* Y *Cynodon nlemfuensis* en monocultivo y sistema agroforestal. *Agrociencia*, 52(6), 853–862.
- Carsan, S., Stroebel, A., Dawson, I., Kindt, R., Mbow, C., Mowo, J., & Jamnadass, R. (2014). Can agroforestry option values improve the functioning of drivers of agricultural intensification in Africa? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6(1), 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.007>
- Cleef, F. O. S. van, Cleef, E. H. C. B. van, Longhini, V. Z., Nascimento, T. S., Ezequiel, J. M. B., & Ruggieri, A. C. (2019). Feedlot performance, carcass characteristics, and meat characteristics of lambs grown under silvopastoral systems. *Canadian Journal of Animal Science*, 100(2), 385–388. <https://doi.org/10.1139/CJAS-2019-0057>
- Coelho, S. R. D. F., Gonçalves, J. L. D. M., Mello, S. L. D. M., Moreira, R. M., Da Silva, E. V., & Laclau, J. P. (2007). Growth, nutrition and biological fixation of nitrogen in mixed-species plantations of eucalypt with leguminous trees. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 42(6), 759–768. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2007000600001>
- Cordeiro, S. A., da Silva, M. L., Neto, S. N. de O., & Oliveira, T. M. (2018). Simulação da variação do espaçamento na viabilidade econômica de um sistema agroflorestal. *Floresta e Ambiente*, 25(1), 34613. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.034613>
- Costa, J. V., Oliveira, M. E., da Silva Moura, R. M.

- de A., da Costa Júnior, M. de J. N., & Rodrigues, M. M. (2015). Comportamento em pastejo e ingestivo de caprinos em sistema silvipastoril. *Revista Ciência Agronômica*, 46(4), 865–872. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150075>
- Dagar, J. C., Gupta, S. R., & Sileshi, G. W. (2023). *Urban and Peri-Urban Agroforestry to Sustain Livelihood and Food Security in the Face of Global Environmental Change and Epidemic Threats*. 89–118. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4602-8_4
- Elbakidze, M., Surová, D., Muñoz-Rojas, J., Persson, J. O., Dawson, L., Plieninger, T., & Pinto-Correia, T. (2021). Perceived benefits from agroforestry landscapes across North-Eastern Europe: What matters and for whom? *Landscape and Urban Planning*, 209, 104044. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104044>
- Fahad, S., Chavan, S. B., Chichaghare, A. R., Uthappa, A. R., Kumar, M., Kakade, V., Pradhan, A., Jinger, D., Rawale, G., Yadav, D. K., Kumar, V., Farooq, T. H., Ali, B., Sawant, A. V., Saud, S., Chen, S., & Pocza, P. (2022). Agroforestry Systems for Soil Health Improvement and Maintenance. *Sustainability*, 14(22), 14877. <https://doi.org/10.3390/SU142214877>
- Feng, Q., An, C., Chen, Z., & Wang, Z. (2020). Can deep tillage enhance carbon sequestration in soils? A meta-analysis towards GHG mitigation and sustainable agricultural management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110293. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110293>
- Fernández, M., Alaejos, J., Andivia, E., Madejón, P., Díaz, M. J., & Tapias, R. (2020). Short rotation coppice of leguminous tree *Leucaena* spp. improves soil fertility while producing high biomass yields in Mediterranean environment. *Industrial Crops and Products*, 157, 112911. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112911>
- Frederico, S., & Moral, Y. P. (2022). Sistema agroflorestal e autonomia: uma revisão sistemática. *REVISTA NERA*, 25(63), 190–209. <https://doi.org/10.47946/RNERA.V25I63.89>
- Gairola, A., Kumar, V., & Nithinkumar, K. (2024). Functions of Agroforestry in Maintaining Nutrient and Biological Cycles. In *Agroforestry Solutions for Climate Change and Environmental Restoration* (pp. 463–486). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5004-7_21
- Ganem, K. A., Dutra, A. C., de Oliveira, M. T., de Freitas, R. M., Grecchi, R. C., da Silva Pinto Vieira, R. M., Arai, E., Silva, F. B., Sampaio, C. B. V., Duarte, V., & Shimabukuro, Y. E. (2020). Mapping Caatinga vegetation using optical earth observation data – Opportunities and challenges. *Revista Brasileira de Cartografia*, 72, 829–854. <https://doi.org/10.14393/RBCV72NESPECI AL50ANOS-56543>
- Gori Maia, A., Eusebio, G. dos S., Fasiaben, M. do C. R., Moraes, A. S., Assad, E. D., & Pugliero, V. S. (2021). The economic impacts of the diffusion of agroforestry in Brazil. *Land Use Policy*, 108, 105489. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105489>
- Gross, C. D., Bork, E. W., Carlyle, C. N., & Chang, S. X. (2022). Agroforestry perennials reduce nitrous oxide emissions and their live and dead trees increase ecosystem carbon storage. *Global Change Biology*, 28(20), 5956–5972. <https://doi.org/10.1111/GCB.16322>
- Guillot, E., Bertrand, I., Rumpel, C., Gomez, C., Arnal, D., Abadie, J., & Hinsinger, P. (2021). Spatial heterogeneity of soil quality within a Mediterranean alley cropping agroforestry system: Comparison with a monocropping system. *European Journal of Soil Biology*, 105, 103330. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2021.103330>
- Gyimah, P., Appiah, K. O., & Appiagyeyi, K. (2023). Seven years of United Nations’ sustainable development goals in Africa: A bibliometric and systematic methodological review. *Journal of Cleaner Production*, 395, 136422. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.136422>
- Hafner, B. D., Hesse, B. D., & Grams, T. E. E. (2021). Friendly neighbours: Hydraulic redistribution accounts for one quarter of water used by neighbouring drought stressed

- tree saplings. *Plant Cell and Environment*, 44(4), 1243–1256. <https://doi.org/10.1111/pce.13852>
- Han, X., Li, Y. Y., Du, X., Li, Y. Y., Wang, Z., Jiang, S., & Li, Q. (2020). Effect of grassland degradation on soil quality and soil biotic community in a semi-arid temperate steppe. *Ecological Processes*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00256-3>
- Huang, X., Terror, C., Dijkstra, F. A., Hungate, B. A., Zhang, W., & van Groenigen, K. J. (2020). New soil carbon sequestration with nitrogen enrichment: a meta-analysis. *Plant and Soil*, 454(1–2), 299–310. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04617-x>
- Hübner, R., Kühnel, A., Lu, J., Dettmann, H., Wang, W. W., & Wiesmeier, M. (2021). Soil carbon sequestration by agroforestry systems in China: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 315, 107437. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107437>
- IBGE. (2019). *Censo agropecuário 2017: resultados definitivos*. 8, 93. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/24/65644?ano=2017>
- Jha, S., Kaechele, H., & Sieber, S. (2021). Factors influencing the adoption of agroforestry by smallholder farmer households in Tanzania: Case studies from Morogoro and Dodoma. *Land Use Policy*, 103, 105308. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105308>
- Kim, D. G., & Isaac, M. E. (2022). Nitrogen dynamics in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 2022 42:4, 42(4), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S13593-022-00791-7>
- Knicker, H. (2011). Soil organic N - An underrated player for C sequestration in soils? *Soil Biology & Biochemistry*, 43(6), 1118–1129. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.02.020>
- Lehmann, L. M., Smith, J., Westaway, S., Pisanelli, A., Russo, G., Borek, R., Sandor, M., Gliga, A., Smith, L., & Ghaley, B. B. (2020). Productivity and Economic Evaluation of Agroforestry Systems for Sustainable Production of Food and Non-Food Products. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 5429, 12(13), 5429. <https://doi.org/10.3390/SU12135429>
- Litschel, J., Berendt, F., Wagner, H., Heidenreich, S., Bauer, D., Welp, M., & Cremer, T. (2023). Key Actors' Perspectives on Agroforestry's Potential in North Eastern Germany. *Land*, 12(2), 458. <https://doi.org/10.3390/LAND12020458>
- Lorenz, K., & Lal, R. (2014). Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 443–454. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0212-y>
- Lu, C., & Wang, K. (2023). Natural resource conservation outpaces and climate change: Roles of reforestation, mineral extraction, and natural resources depletion. *Resources Policy*, 86, 104159. <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2023.104159>
- Ma, Z., Bork, E. W., Carlyle, C. N., Tieu, J., Gross, C. D., & Chang, S. X. (2022). Carbon stocks differ among land-uses in agroforestry systems in western Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 313, 108756. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2021.108756>
- Magalhães, C. A. S., Zolin, C. A., Lulu, J., Lopes, L. B., Furtini, I. V., Vendrusculo, L. G., Zaiatz, A. P. S. R., Pedreira, B. C., & Pezzopane, J. R. M. (2020). Improvement of thermal comfort indices in agroforestry systems in the southern Brazilian Amazon. *Journal of Thermal Biology*, 91, 102636. <https://doi.org/10.1016/J.JTHERBIO.2020.102636>
- Maharjan, M., Ayer, S., Timilsina, S., Ghimire, P., Bhatta, S., Thapa, N., Timilsina, Y. P., Lama, S., Yadav, V. K., & Okolo, C. C. (2024). Impact of agroforestry intervention on carbon stock and soil quality in mid-hills of Nepal. *Soil Security*, 16, 100164. <https://doi.org/10.1016/J.SOISEC.2024.100164>
- Mahmud, A. A., Raj, A., & Jhariya, M. K. (2021). Agroforestry systems in the tropics: A critical review. *Agricultural and Biological Research*, 37(1), 83–87. <https://doi.org/10.35248/0970-1907.21.37.83-87>
- Marsden, C., Martin-Chave, A., Cortet, J., Hedde, M., & Capowiez, Y. (2020). How agroforestry systems influence soil fauna and their functions - a review. *Plant and Soil*, 453(1–2), 29–44. <https://doi.org/10.1007/S11104-019-04322->

4/TABLES/3

- Martins, E. M., Da Silva, E. R., Campello, E. F. C., De Lima, S. S., Nobre, C. P., Correia, M. E. F., & De Resende, A. S. (2019). O uso de sistemas agroflorestais diversificados na restauração florestal na Mata Atlântica. *Ciência Florestal*, 29(2), 632–648. <https://doi.org/10.5902/1980509829050>
- Martins, J. C. R., de Freitas, A. D. S., Menezes, R. S. C., & Sampaio, E. V. de S. B. (2015). Nitrogen symbiotically fixed by cowpea and gliricidia in traditional and agroforestry systems under semiarid conditions. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50(2), 178–184. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000200010>
- Martins, J. C. R., Menezes, R. S. C., Sampaio, E. V. S. B., dos Santos, A. F., & Nagai, M. A. (2013). Produtividade de biomassa em sistemas agroflorestais e tradicionais no Cariri Paraibano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(6), 581–587. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000600002>
- Mattila, T. J., Hagelberg, E., Söderlund, S., & Joona, J. (2022). How farmers approach soil carbon sequestration? Lessons learned from 105 carbon-farming plans. *Soil and Tillage Research*, 215, 105204. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2021.105204>
- Mbow, C., C., Rosenzweig, L. ., Barioni, T. G., Benton, M., Herrero, M., Krishnapillai, & E. Liwenga, P Pradhan, M.G. Rivera-Ferre, T. Sapkota, F.N. Tubiello, Y. X. (2019). Food Security, chapter 5. In: *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*, 437–550. <https://burundi-food-securityhealthywealthywise.weebly.com/food-security.html>
- Mendes, M. M. de S., de Lacerda, C. F., Cavalcante, A. C. R., Fernandes, F. É. P., & de Oliveira, T. S. (2013). Desenvolvimento do milho sob influência de árvores de pau-branco em sistema agrossilvipastoril. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48(10), 1342–1350. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013001000005>
- Moraes, J. A. T., & Cavichioli, F. A. (2022). Recuperação de solo com o sistema agrofloresta. *Revista Interface Tecnológica*, 19(2), 597–607. <https://doi.org/10.31510/inf.v19i2.1458>
- Mudge, P. L., Millar, J., Pronger, J., Roulston, A., Penny, V., Fraser, S., Eger, A., Caspari, T., Robertson, B., Mason, N. W. H., & Schipper, L. A. (2021). Impacts of irrigation on soil C and N stocks in grazed grasslands depends on aridity and irrigation duration. *Geoderma*, 399, 115109. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115109>
- Ndlovu, N. P., & Borrass, L. (2021). Promises and potentials do not grow trees and crops. A review of institutional and policy research in agroforestry for the Southern African region. *Land Use Policy*, 103, 105298. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105298>
- Nguyen, M. P., Pagella, T., Catacutan, D. C., Nguyen, T. Q., & Sinclair, F. (2021). Adoption of Agroforestry in Northwest Viet Nam: What Roles Do Social and Cultural Norms Play? *Forests*, 12(4), 493. <https://doi.org/10.3390/f12040493>
- Nguyen, T. T., Grote, U., Neubacher, F., Rahut, D. B., Do, M. H., & Paudel, G. P. (2023). Security risks from climate change and environmental degradation: implications for sustainable land use transformation in the Global South. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 63, 101322. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2023.101322>
- Octavia, D., Murniati, Suharti, S., Hani, A., Mindawati, N., Suratman, Swestiani, D., Junaedi, A., Undaharta, N. K. E., Santosa, P. B., Wahyuningtyas, R. S., & Faubiany, V. (2023). Smart agroforestry for sustaining soil fertility and community livelihood. *Forest Science and Technology*, 19(4), 315–328. <https://doi.org/10.1080/21580103.2023.2269970>
- Oliveira, V. R., e Silva, P. S. L., de Paiva, H. N., Pontes, F. S. T., & Antonio, R. P. (2016). Growth of arboreal leguminous plants and maize yield in agroforestry systems. *Revista Arvore*, 40(4), 679–688. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400011>

- Osuna-Ceja, E. S., Figueroa-Sandoval, B., Martínez-Gamiño, M. Á., & Pimentel-López, J. (2019). Un sistema agroforestal de secano para el altiplano semiárido de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 22, 89–103. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V0I22.1861>
- Paciullo, D. S. C., de Castro, C. R. T., Gomide, C. A. de M., Maurício, R. M., Pires, M. de F. Á., Müller, M. D., & Xavier, D. F. (2011). Performance of dairy heifers in a silvopastoral system. *Livestock Science*, 141(2–3), 166–172. <https://doi.org/10.1016/J.LIVSCI.2011.05.012>
- Perez-Marin, A. M., & Menezes, R. S. C. (2008). Ciclagem de nutrientes via precipitação pluvial total, interna e escoamento pelo tronco em sistema agroflorestal com *Gliricidia sepium*. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 32(6), 2573–2579. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600034>
- Pinheiro, F. M., & Nair, P. K. R. (2018). Silvopasture in the caatinga biome of Brazil: A review of its ecology, management, and development opportunities. *Forest Systems*, 27(1), 1–16. <https://doi.org/10.5424/fs/2018271-12267>
- Potter, C., Freeman, C., Golyshin, P. N., Ackermann, G., Fenner, N., McDonald, J. E., Ehbair, A., Jones, T. G., Murphy, L. M., & Creer, S. (2017). Subtle shifts in microbial communities occur alongside the release of carbon induced by drought and rewetting in contrasting peatland ecosystems. *Scientific Reports*, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11546-w>
- Powlson, D. S., Gregory, P. J., Whalley, W. R., Quinton, J. N., Hopkins, D. W., Whitmore, A. P., Hirsch, P. R., & Goulding, K. W. T. (2011). Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. *Food Policy*, 36(SUPPL. 1), S72–S87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.025>
- Quandt, A. (2020). Contribution of agroforestry trees for climate change adaptation: narratives from smallholder farmers in Isiolo, Kenya. *Agroforestry Systems*, 94(6), 2125–2136. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00535-0>
- Queiroz, M. G. de, 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., & de 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, 104457. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2020.104457>
- Queiroz, M. G., da Silva, T. G. F., de Souza, C. A. A., da Rosa Ferraz Jardim, A. M., do Nascimento Araújo, G., de Souza, L. S. B., & de Moura, M. S. B. (2021). Composition of caatinga species under anthropic disturbance and its correlation with rainfall partitioning. *Floresta e Ambiente*, 28(1). <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2019-0044>
- Rayol, B. P., & Alvino-Rayol, F. de O. (2019). Desenvolvimento inicial de espécies arbóreas em sistemas agroflorestais no Baixo Amazonas, Pará, Brasil. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 18(1), 59–64. <https://doi.org/10.5965/223811711812019059>
- Raza, A., Ahrends, H., Habib-Ur-rahman, M., & Gaiser, T. (2021). Modeling approaches to assess soil erosion by water at the field scale with special emphasis on heterogeneity of soils and crops. *Land*, 10(4), 422. <https://doi.org/10.3390/land10040422>
- Ribeiro, J. M., Almeida, L., Ii, F., Henrique, P., Cardoso, S., Loureiro, A., Oliveira, G., Frazão, L. A., Cardoso, P. H. S., Oliveira, A. L. G., Sampaio, R. A., & Fernandes, L. A. (2019). Fertilidade do solo e estoques de carbono e nitrogênio sob sistemas agroflorestais no Cerrado Mineiro. *Ciência Florestal*, 29(2), 913–923. <https://doi.org/10.5902/1980509825310>
- Sacramento, J. A. A. S. do, Araújo, A. C. de M., Escobar, M. E. O., Xavier, F. A. da S., Cavalcante, A. C. R., & Oliveira, T. S. de. (2013). Soil carbon and nitrogen stocks in traditional agricultural and agroforestry systems in the semiarid region of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 37(3), 784–795. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300025>
- Santos, A. M. dos, Silva, C. F. A. da, Almeida

- Junior, P. M. de, Rudke, A. P., & Melo, S. N. de. (2021). Deforestation drivers in the Brazilian Amazon: assessing new spatial predictors. *Journal of Environmental Management*, 294, 113020.
- Santos, W. M. dos, Souza, R. M. S., Souza, E. S. de, Almeida, A. Q. de, & Antonino, A. C. D. (2017). Variabilidade espacial da sazonalidade da chuva no semiárido brasileiro. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 2(4), 368–376. <https://doi.org/10.24221/JEAP.2.4.2017.146>
- Scheer, M. B. (2008). Fluxo de nutrientes pela precipitação pluviométrica em dois trechos de floresta ombrófila densa em Guaraqueçaba, Paraná. *Floresta*, 39(1), 117–130. <https://doi.org/10.5380/rf.v39i1.13732>
- Schembergue, A., da Cunha, D. A., de Matos Carlos, S., Pires, M. V., & Faria, R. M. (2017). Sistemas Agroflorestais como Estratégia de Adaptação aos Desafios das Mudanças Climáticas no Brasil 2. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 55(1), 9–30. <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790550101>
- Schroth, G., Lehmann, J., Rodrigues, M. R. L., Barros, E., & Macêdo, J. L. V. (2001). Plant-soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems*, 53(2), 85–102. <https://doi.org/10.1023/A:1013360000633>
- Semeraro, T., Scarano, A., Leggieri, A., Calisi, A., & De Caroli, M. (2023). Impact of Climate Change on Agroecosystems and Potential Adaptation Strategies. *Land*, 12(6), 1117. <https://doi.org/10.3390/LAND12061117>
- Sgarbossa, J., Schwerz, F., Elli, E. F., Tibolla, L. B., Schmidt, D., & Caron, B. O. (2018). Agroforestry systems and their effects on the dynamics of solar radiation and soybean yield. *Comunicata Scientiae*, 9(3), 492–502. <https://doi.org/10.14295/CS.V9I3.2765>
- Silva, B. F., dos Santos Rodrigues, R. Z., Heiskanen, J., Abera, T. A., Gasparetto, S. C., Biase, A. G., Ballester, M. V. R., de Moura, Y. M., de Stefano Piedade, S. M., de Oliveira Silva, A. K., & de Camargo, P. B. (2023). Evaluating the temporal patterns of land use and precipitation under desertification in the semi-arid region of Brazil. *Ecological Informatics*, 77, 102192. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2023.102192>
- Silva, J. L. B. da, Moura, G. B. de A., Silva, M. V. da, Lopes, P. M. O., Guedes, R. V. de S., Silva, Ê. F. de F. e., Ortiz, P. F. S., & Rodrigues, J. A. de M. (2020). Changes in the water resources, soil use and spatial dynamics of Caatinga vegetation cover over semiarid region of the Brazilian Northeast. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100372.
- Silva, L. A. P. da, Silva, C. R. da, Souza, C. M. P. de, Bolfe, É. L., Souza, J. P. S., & Leite, M. E. (2023). Mapeamento da aridez e suas conexões com classes do clima e desertificação climática em cenários futuros - Semiárido Brasileiro. *Sociedade & Natureza*, 35(1), e67666. <https://doi.org/10.14393/SN-V35-2023-67666>
- Silva, É. B., Silva, W. C. da, Sousa, E. D. V. de, & Gato, A. P. da C. (2019). Sistemas agroflorestais como alternativa agroecológica: Revisão. *Pubvet*, 13(02). <https://doi.org/10.31533/PUBVET.V13N01A265.1-6>
- Silva, G. L., Lima, H. V., Campanha, M. M., Gilkes, R. J., & Oliveira, T. S. (2011). Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma*, 167–168, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.09.009>
- Singh, B. K., Delgado-Baquerizo, M., Egidi, E., Guirado, E., Leach, J. E., Liu, H., & Trivedi, P. (2023). Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nature Reviews Microbiology* 2023 21:10, 21(10), 640–656. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>
- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A. B., Courcelles, V. de R. de, Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D. A., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P. C., Chenu, C., Jastrow, J. D., Lal, R., ... Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80–99.

- <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2012.10.001>
 Sykes, A. J., Macleod, M., Eory, V., Rees, R. M., Payen, F., Myrghiotis, V., Williams, M., Sohi, S., Hillier, J., Moran, D., Manning, D. A. C., Goglio, P., Seghetta, M., Williams, A., Harris, J., Dondini, M., Walton, J., House, J., & Smith, P. (2020). Characterising the biophysical, economic and social impacts of soil carbon sequestration as a greenhouse gas removal technology. *Global Change Biology*, 26(3), 1085–1108. <https://doi.org/10.1111/GCB.14844>
- Tadesse, S., Gebretsadik, W., Muthuri, C., Derero, A., Hadgu, K., Said, H., & Dilla, A. (2021). Crop productivity and tree growth in intercropped agroforestry systems in semi-arid and sub-humid regions of Ethiopia. *Agroforestry Systems*, 95(3), 487–498. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00596-9>
- Tiefenbacher, A., Sandén, T., Haslmayr, H. P., Miloczki, J., Wenzel, W., & Spiegel, H. (2021). Optimizing carbon sequestration in croplands: A synthesis. *Agronomy*, 11(5), 882. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11050882/S1>
- United Nations. (2019). *Growing at a slower pace, world population is expected to reach 9.7 billion in 2050 and could peak at nearly 11 billion around 2100 | UN DESA | United Nations Department of Economic and Social Affairs*. <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2019.html>
- Viera, M., & Schumacher, M. V. (2011). Biomassa em povoamentos monoespecíficos e mistos de eucalipto e acácia-negra e do milho em sistema agrossilvicultural. *CERNE*, 17(2), 259–265. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000200014>
- Villarreyna, R., Avelino, J., & Cerda, R. (2020). Ecosystem-based adaptation: Effect of shade trees on ecosystem services in coffee plantations. *Agronomy Mesoamerican*, 31(2), 499–516. <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.37591>
- Xu, M., Cardenas, L. M., Horrocks, C., López-Aizpún, M., Zhang, J., Zhang, F., & Dungait, J. A. J. (2021). The effect of tillage management on microbial functions in a maize crop at different slope positions. *Geoderma*, 401. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115171>
- Yasin, G., Nawaz, M. F., Zubair, M., Azhar, M. F., Mohsin Gilani, M., Ashraf, M. N., Qin, A., & Ur Rahman, S. (2023). Role of Traditional Agroforestry Systems in Climate Change Mitigation through Carbon Sequestration: An Investigation from the Semi-Arid Region of Pakistan. *Land*, 12(2), 513. <https://doi.org/10.3390/LAND12020513>
- Zhang, G., Huang, Q., Song, K., Yu, H., Ma, J., & Xu, H. (2021). Responses of greenhouse gas emissions and soil carbon and nitrogen sequestration to field management in the winter season: A 6-year measurement in a Chinese double-rice field. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 318, 107506. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107506>