**Revista em Agronegócio e Meio Ambiente - RAMA**

DOI:10.17765/2176-9168.2024v17n3e11696
e-ISSN 2176-9168

*Agronegócio*

# Agroecossistemas multifuncionais sustentáveis para produção de manga no semiárido: qualidade química e física do solo

## *Sustainable multifunctional agroecosystems for mango production in the semiaridid: chemical and physical soil quality*

**Maria Raphaela Severo Rafael [1], Alessandra Monteiro Salviano [2], Vanderlise Giongo[3], Stefeson Bezerra de Melo[4], Nelci Olszevski[5], Vitória Rodrigues de Oliveira[6]**

**RESUMO:** O objetivo do trabalho foi avaliar se o manejo do solo e o tipo de mistura de plantas de cobertura alteram a qualidade do solo em um pomar de mangueira (cv. 'Kent') irrigado em ambiente semiárido e identificar propriedades químicas e físicas com potencial para uso como indicadores de qualidade. Os dados utilizados fazem parte de um estudo de longa duração que avalia duas práticas de manejo do solo (com revolvimento e sem revolvimento) associadas a duas composições de misturas de plantas de cobertura (MP) (MP1- 75% de leguminosas + 25% de gramíneas e oleaginosas; MP2- 75% de gramíneas e oleaginosas + 25% de leguminosas) e a vegetação espontânea (VE). O experimento foi instalado em 2007 e, para esse trabalho, foram utilizados o 2º (2008) e o 9º ciclos (2017) de cultivo. Os dados foram submetidos às análises de componentes principais (ACP). O tipo de MP não altera a qualidade do solo, mas o tipo de manejo utilizado é fator preponderante. A camada 0–0,05 m no sistema sem revolvimento, apresentou melhor qualidade do solo, principalmente pelo maior acúmulo de C. Não foi possível discriminar diferenças na qualidade do solo em outras profundidades, independente do manejo ou da mistura de plantas utilizados. As variáveis identificadas como potenciais indicadores de qualidade do solo são as características químicas: H+Al, SB CTC, V, teores de C, P, Ca, Mg, K e Na; e características físicas Mi e Pt.

**Palavras-chave:** Manejo do solo; Mangifera indica L.; Coquetéis vegetais; Adubação verde.

**ABSTRACT:** The objective of the study was to evaluate whether soil management and the type of cover crop (MP) mixture, components of multifunctional agroecosystems, alter soil quality in a mango orchard (cv. 'Kent') irrigated in semi-arid environment, as well as identifying chemical and physical properties with potential for use as quality indicators. The data used is part of a long-term study that evaluates two soil management practices (tillage - T and no tillage -NT) associated with two compositions of cover crop mixtures (PM1- 75% legumes+25% of grasses and oilseeds; PM2- 75% of grasses and oilseeds+25% of legumes) and spontaneous vegetation (SV). The experiment was installed in 2007 and, for this study, the 2nd (2008) and 9th cycle (2017) of cultivation were used. The data were subjected to principal component analysis (PCA). The type of PM does not change soil quality, regardless of the management used, but the type of management used is a preponderant factor. The most superficial layer (0 – 0.05 m) in the system without disturbance showed better quality, characterized mainly by the greater accumulation of C in the soil. It was also not possible to discriminate differences in soil quality at other depths, regardless of the management or plant mix used. The variables identified as potential soil quality indicators are the chemical characteristics: H+Al, SB CTC, V, contents of C, P, Ca, Mg, K and on; and the physical characteristics Mi and Pt.

**Keywords: S**oil management; *Mangifera indica* L.; Vegetables cocktails; Green manure

**Autor correspondente:** Alessandra Monteiro Salviano
E-mail: alessandra.salviano@embrapa.br

*Recebido em: 11/04/2023*
*Aceito em: 01/04/2024*

[1] Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro (BA), Brasil.

[2] Pesquisadora da Embrapa Solos-Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento (UEP), Recife (PE), Brasil.

[3] Pesquisadora da Embrapa Trigo, Passo Fundo (RS), Brasil.

[4] Docente adjunto do Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia da Informação (DCETI) da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), Angicos (RN), Brasil.

[5] Docente permanente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (CPGEA) da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro (BA), Brasil.

[6] Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA) na Universidade de Pernambuco (UPE), Petrolina (PE), Brasil.

## INTRODUÇÃO

A mangueira (*Mangifera indica* L.) é uma das principais espécies frutíferas cultivadas no Brasil, especificamente no Vale do Submédio São Francisco, semiárido brasileiro. A região é responsável pelo maior volume de produção e exportação do país (IBGE, 2024). Segundo Embrapa (2024), em 2022, o valor das exportações de manga do Brasil foi de US$ 314,47 milhões de reais, sendo que mais da metade desse total é proveniente da comercialização da produção no Vale do São Francisco ( VSF). Essa arrecadação é um novo recorde, superando o valor de 2021 (US$ 248,74 milhões) em, aproximadamente, 26% e alcançando a exportação de 266,10 mil toneladas de manga.

No entanto, o manejo agrícola em zonas áridas e semiáridas enfrenta grandes desafios na busca por elevadas produtividades das culturas, sem perdas de qualidade química e física dos solos, e consequentemente com o alcance da sustentabilidade dos ecossistemas. REN *et al.* (2024) observaram que o uso de adubação verde com leguminosas, em longo prazo, melhora a diversidade da mesofauna e, consequentemente a fertilidade do solo, permitindo o desenvolvimento de uma agricultura sustentável em regiões semiáridas. De acordo com os pesquisadores, a mesofauna pode ser utilizada como indicador da fertilidade do solo.

A ACP se mostrou uma ferramenta efetiva para a escolha das propriedades do solo que apresentam maior influência na sua qualidade. No entanto, ainda é necessário desenvolver pesquisas com intuito de integrar propriedades químicas, físicas e biológicas em modelos para avaliação da qualidade do solo em ambientes semiáridos, utilizando IQS sensíveis aos diferentes agroecossistemas adotados. Igualmente importante é classificar os IQS em faixas de adequabilidade, relacionando-as com as produtividades alcançadas para auxiliar o produtor na escolha adequada das práticas de manejo que melhorem a qualidade do solo e a sustentabilidade dos sistemas de produção de manga no semiárido.

Uma das técnicas utilizadas com esse objetivo é a manutenção da cobertura do solo pelo cultivo de espécies de adubos verdes, em sistema de consórcio ou cultivo solteiro, em sistema intercalar, em cultivos permanentes, ou em sucessão às culturas principais, em cultivos anuais. No VSF, com objetivo de adicionar carbono ao solo e promover a ciclagem de nutrientes em agroecossistemas irrigados, vêm sendo conduzido experimentos de longa duração com o cultivo simultâneo de diferentes proporções de espécies gramíneas, leguminosas e oleaginosas associadas a duas práticas de manejo da fitomassa (FREITAS *et al.*, 2019; PEREIRA FILHO *et al.*, 2019; GIONGO *et al.*, 2020; GIONGO *et al.*, 2022a; GIONGO *et al.*, 2022b) adaptados para produção de espécies frutícolas e olerícolas.

Nos últimos anos, têm sido publicados diversos estudos sobre efeitos de práticas de manejo agrícolas, de longo prazo, na qualidade do solo (REN *et al.*, 2024; NORRIS *et al.*, 2023; NORRIS *et al.*, 2020) e nos estoques de C e N do solo (SANTANA *et al.*, 2020; GIONGO *et al.*, 2020) intensificando-se a discussão acadêmica sobre a necessidade de selecionar propriedades do solo sensíveis às alterações causadas pelo manejo, buscando-se relacioná-las com a saúde do solo, o fornecimento de serviços ecossistêmicos, as funções do solo e a produtividade das culturas (ZHANG *et al.*, 2024; SERE *et al.*, 2024; BAGNALL *et al.*, 2023; NUNES *et al.*, 2021). Alguns pesquisadores consideram a análise multivariada como uma ferramenta adequada para seleção desses indicadores (ZHANG *et al.*, 2024; NGUEMEZI *et al.*, 2020).

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar se, após 8 anos de implantação, os agroecossistemas multifuncionais sustentáveis propostos para produção de mangueira no semiárido (GIONGO *et al.*, 2022a) permitiram a melhoria da qualidade do solo, bem como identificar propriedades químicas e físicas do solo com potencial para uso como indicadores, por meio do uso de técnicas de análise multivariada.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O banco de dados foi obtido a partir de experimento de longa duração em um pomar de mangueira (*Mangifera indica* L. cv. 'Kent') iniciado em 2009, com ciclos anuais de cultivo das plantas de cobertura. A semeadura das plantas de cobertura dos três primeiros ciclos foi realizada em dezembro, e após o terceiro ciclo, ocorreu em março de cada ano. O experimento é conduzido no campo experimental de Bebedouro, situado na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido), Petrolina (PE), Brasil, (09° 09' S, 40° 22' W, altitude 366 m) (Figura 1.).

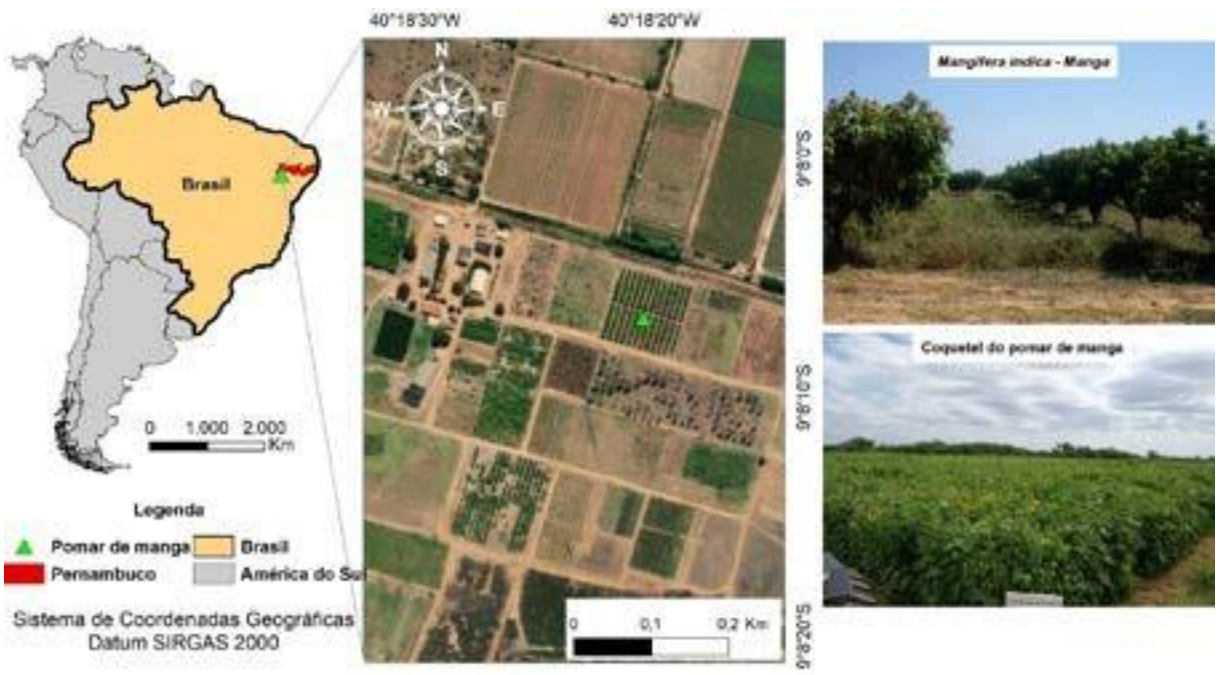


**Figura 1.** Mapa de localização do experimento. Petrolina-PE
Fonte: elaboração dos autores.

O solo foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico plíntico (SANTOS *et al.*, 2018), de textura média. O clima da região é do tipo BSwh' (KOEPPEN, 1948), semiárido, com precipitação média anual de 567 mm, e temperaturas variando de 24,2 a 28,2 ºC.

Os tratamentos são compostos por dois sistemas de manejo, sem revolvimento (SR) e com revolvimento do solo (CR), combinados com três misturas de plantas de cobertura (MP), 75% leguminosas + 25% gramíneas e oleaginosas (mistura de plantas de cobertura 1 – MP1), 25% leguminosas + 75% gramíneas e oleaginosas (mistura de plantas de cobertura 2 – MP2), e vegetação espontânea ( VE) (MP3). Foram utilizadas 14 espécies na composição das misturas de plantas de cobertura (MP1 e MP2), diferindo nas proporções utilizadas (Tabela 1). A MP3, a VE, foi composta principalmente pelas espécies *Desmodium tortuosum* (Sw.) DC, *Macroptilium lathyroides* (L.) Urb., *Digitaria bicornis* (Lam.) Roem. Schult., *Dactyloctenium aegypitium* (L.) Willd., *Commelina difusa* Burm. f., *Acanthospermum hispidum* DC., *Euphorbia chamaeclada* Ule, *Waltheria rotundifolia* Schrank, *Waltheria sp*. L., *Tridax procumbens* L., *Ipomoea mauritiana* Jacq., *Ipomoea bahiensis* Willd. Ex Roem. Schult., *Amaranthus deflexus* L.

**Tabela 1.** Proporção de sementes utilizadas na composição das plantas de cobertura semeadas nas entrelinhas de cultivo da mangueira, MP1 (75% leguminosas + 25% gramíneas e oleaginosas) e MP2 (25% leguminosas + 75% gramíneas e oleaginosas)

| Plantas de cobertura* | MP1 | MP2 |
|---|---|---|
| | kg ha$^{-1}$ | |
| Leguminosas | | |
| *Crotalaria spectabilis* Roth | 5,5 | 1,7 |
| *Crotalaria juncea* L. | 13,5 | 4,5 |
| *Canavalia ensiformis* (L.) DC. (Feijão-de-porco) | 187,5 | 62,5 |
| *Calopogonium mucunoide* Desv. (Calopogônio) | 3,7 | 1,2 |
| *Mucuna pruriens* Piper & Tracy. (Mucuna-preta) | 101,2 | 33,7 |
| *Cajanus cajan* (L.) Millsp. (Feijão guandu) | 12,7 | 4,2 |
| *Dolichos lablab* L. (Lab-lab) | 60,0 | 20,0 |
| *Mucuna cochinchinensis* (Lour.) A. Chev. (Mucuna-cinza) | 101,2 | 33,7 |
| Gramíneas | | |
| *Zea mays* L. (Corn) (Milho) | 15,0 | 45,0 |
| *Pennisetum americanum* (L.) Leeke (Milheto) | 1,0 | 3,0 |
| *Sorghum vulgare* Pers. (Sorgo) | 2,5 | 7,5 |
| Oleaginosas | | |
| *Helianthus annuus* L. (Girassol) | 3,1 | 9,3 |
| *Ricinus communis* L. (Mamona) | 30,0 | 90,0 |
| *Sesamum indicum* L. (Gergelim) | 1,0 | 3,0 |

*proporções baseadas em experimentos anteriores ao início do presente estudo.
Fonte: elaboração dos autores.

O delineamento experimental é composto por blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema de parcelas subdivididas, sendo as parcelas representadas pelo manejo das plantas de cobertura e as subparcelas pelas misturas de plantas de cobertura. Cada subparcela foi composta por três fileiras, sendo três plantas por fileira, dispostas em espaçamento 8 x 5 m, e área total da parcela 360 m² (24 m × 15 m). Utilizou-se as três plantas centrais da parcela como área útil, totalizando 120 m² (5 x 24). As plantas de cobertura foram semeadas, nas entrelinhas do pomar, em faixas de 6 m de comprimento, deixando-se em cada lado 1 m de borda livre (Figura 2).

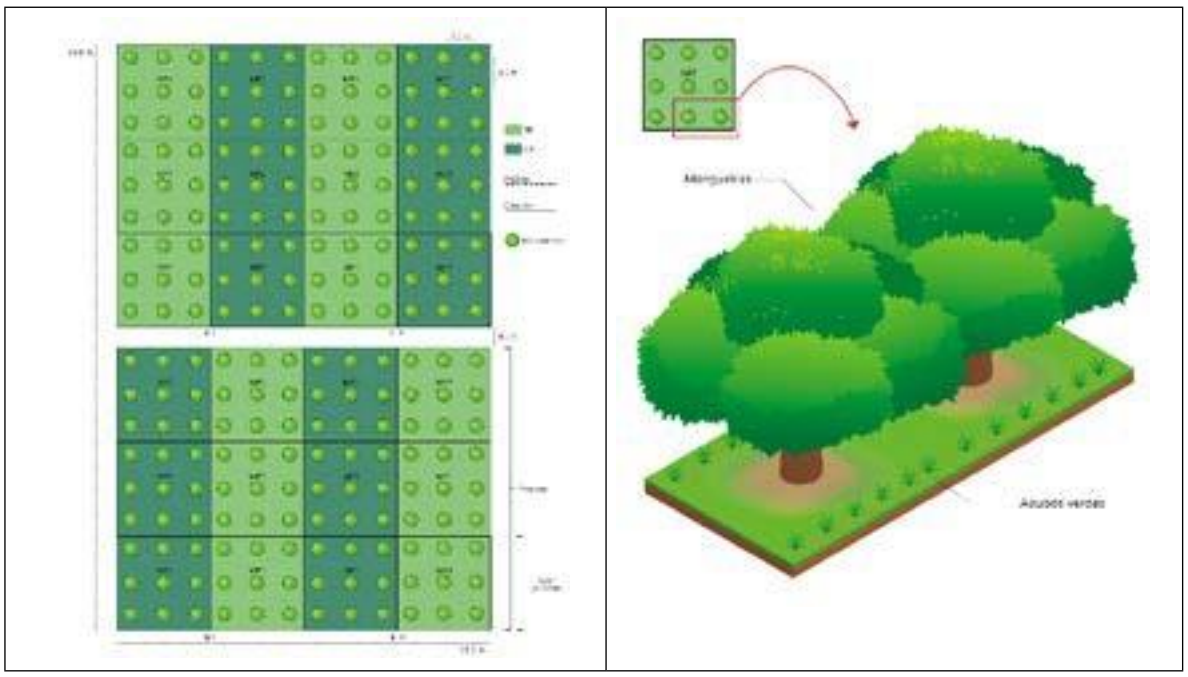

Figura 2. Croqui da área experimental.
Fonte: elaboração dos autores.

Aos 70 dias após a semeadura, quando, cerca de 70% das plantas estavam em florescimento, a fitomassa aérea foi cortada e depositada nas entrelinhas da mangueira, depositando o material sobre a superfície do solo nos tratamentos sem revolvimento (SR), ou incorporando à fitomassa, com auxílio de grade niveladora, nos tratamentos com revolvimento (CR).

Na linha de cultivo da mangueira, foi realizada, em todos os ciclos de cultivo, a adubação de manutenção via fertirrigação, com base na análise de solo da área e na demanda nutricional da cultura da manga (SILVA *et al.*, 2004).

Como forma de monitorar a qualidade do solo, foram coletadas amostras de solo, nas profundidades de 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, nas entrelinhas do pomar, antes de cada ciclo de cultivo das plantas de cobertura, utilizando-se trado holandês. Em cada tratamento, foi coletada uma amostra composta, a partir de cinco amostras simples, por profundidade. Nessas amostras, foram determinadas as características físicas: densidade de partículas (Dp) e densidade do solo (Ds), segundo os métodos do balão volumétrico e do anel, respectivamente (DONAGEMA *et al.*, 2011); macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi), estimadas pelo método de Stolf *et al.* (2011), e porosidade total (Pt) calculada a partir dos dados de Ds e Dp. Para avaliação da qualidade química do solo, foram determinados os teores de carbono orgânico total (C), alumínio ($Al^{3+}$), cálcio ($Ca^{2+}$), magnésio ($Mg^{2+}$), potássio ($K^{+}$) e sódio ($Na^{+}$) trocáveis, fósforo (P), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) disponíveis; acidez potencial (H+Al); condutividade elétrica (CE) e pH em água (1:2,5) (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A partir desses resultados, foram calculados capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB) e saturação por bases (V).

Para avaliar as alterações na qualidade do solo, foram utilizados os dados coletados em 2010 e em 2017 (após o sétimo cultivo das plantas de cobertura). O teor de $Al^{3+}$ foi retirado das análises estatísticas por apresentar valor zero no banco de dados de 2017. Foi utilizada a análise de componentes principais (ACP) com objetivo de reduzir o número de variáveis e verificar semelhanças e/ou diferenças na qualidade do solo, proporcionadas pelos agroecossistemas multifuncionais avaliados por meio do gráfico boxplot. A partir dos grupos formados nesses gráficos, podemos inferir sobre as semelhanças ou diferenças existentes entre os agroecossistemas – formados pela combinação dos manejos adotados e das misturas de plantas

de coberturas –, na qualidade do solo em diferentes profundidades. Realizou-se análise de variância multivariada (MANOVA) para comparar os grupos formados utilizando-se o teste F ($p<0,05$). Todas as análises foram realizadas utilizando-se o *software* Statistica 14.0 (TIBCO, 2020).

A avaliação do banco de dados foi realizada por três critérios: 1) utilizando-se os dois ciclos de cultivo escolhidos, com todas as profundidades, e os dois manejos do solo em conjunto; 2) apenas os tratamentos sem revolvimento do solo (SR); e 3) apenas os tratamentos com revolvimento do solo (CR), aplicando as técnicas estatísticas nessa sequência.

A ACP foi gerada a partir da matriz de correlação entre as variáveis que compõem o banco de dados. Na escolha das componentes apresentadas, foram considerados os autovalores maiores que 1,00, bem como o gráfico de *scree-plot*, com variância acumulada acima de 70% (HAIR *et al.*, 2009).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da ACP demonstram situações diferenciadas: (i) quando foi utilizado o banco de dados completo (2010 e 2017, independentemente do tipo de manejo do solo) (Tabela 2; Figura 3A), as componentes 1 (CP1) e 2 (CP2) explicaram 69,49 % da variabilidade dos dados; e (ii) quando foi utilizado o banco de dados composto apenas pelos agroecossistemas sem revolvimento do solo (SR) (Tabela 2; Figura 3B) e com revolvimento (CR) (Tabela 2; Figura 3C), as componentes 1 e 2 explicaram 72,45 % e 72,00 % da variabilidade dos dados, respectivamente. Os autovalores, apresentados na Tabela 2, correspondem às duas principais componentes e podem ser considerados como uma medida da importância de cada variável. Foram considerados como mais importantes, os que apresentaram carga fatorial acima de 0,60 e os sinais positivos ou negativos são indicações de relações diretamente e inversamente proporcionais, respectivamente.

**Tabela 2.** Coeficientes de correlação entre cada componente principal e as variáveis analisadas

(Continua)

| Variáveis | CR + SR | | SR | | CR | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CP1 | CP2 | CP1 | CP2 | CP1 | CP2 |
| Dp (kg $dm^{-3}$) | 0,312 | -0,125 | 0,569 | -0,131 | -0,048 | 0,278 |
| Ds (kg $dm^{-3}$) | 0,656* | -0,547 | 0,735* | -0,558 | 0,551 | -0,379 |
| Ma ($cm^3$ $cm^{-3}$) | -0,602* | 0,480 | -0,650* | 0,516 | -0,571 | 0,538 |
| Mi ($cm^3$ $cm^{-3}$) | 0,780* | 0,581 | 0,6776 | 0,691* | 0,904* | 0,354 |
| Pt (%) | 0,723* | 0,623 | 0,627 | 0,723* | 0,832* | 0,435 |
| pH | -0,535 | 0,515 | -0,542 | 0,530 | -0,492 | 0,561 |
| CE (dS $m^{-1}$) | -0,644* | -0,399 | -0,613* | -0,477 | -0,710* | -0,302 |
| C (g $kg^{-1}$ | -0,696* | 0,568 | -0,819* | 0,445 | -0,492 | 0,637* |
| P (mg $dm^{-3}$) | -0,402 | 0,688* | -0,447 | 0,713* | -0,367 | 0,667* |
| Ca ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | -0,679* | 0,658 | -0,743* | 0,604 | -0,628 | 0,659* |
| Mg ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | -0,345 | 0,801* | -0,537 | 0,743* | 0,105 | 0,718* |
| K ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | -0,880* | -0,163 | -0,874* | -0,228 | -0,945* | -0,207 |

(Conclusão)

| Variáveis | CR + SR | | SR | | CR | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CP1 | CP2 | CP1 | CP2 | CP1 | CP2 |
| Na ($cmol_c\ dm^{-3}$) | -0,960* | -0,087 | -0,965* | -0,069 | -0,965* | -0,177 |
| H+Al ($cmol_c\ dm^{-3}$) | 0,865* | 0,288 | 0,820* | 0,295 | 0,929* | 0,194 |
| SB ($cmol_c\ dm^{-3}$) | -0,950* | -0,061 | -0,946* | -0,120 | -0,976* | -0,077 |
| CTC ($cmol_c\ dm^{-3}$) | -0,928* | -0,010 | -0,942* | -0,069 | -0,958* | -0,085 |
| V (%) | -0,900* | -0,344 | -0,860* | -0,412 | -0,947* | -0,184 |
| Cu ($mg\ dm^{-3}$) | -0,567 | -0,562 | -0,561 | -0,701* | -0,624* | -0,451 |
| Fe ($mg\ dm^{-3}$) | -0,311 | -0,456 | -0,195 | -0,380 | -0,534 | -0,560 |
| Mn ($mg\ dm^{-3}$) | -0,450 | 0,450 | -0,342 | 0,526 | -0,643* | 0,626 |
| Zn ($mg\ dm^{-3}$) | -0,664* | -0,002 | -0,580 | -0,167 | -0,852* | 0,294 |

*Valores mais discriminatórios; CP1=componente principal 1; CP2=componente principal 2

Fonte: elaboração dos autores.

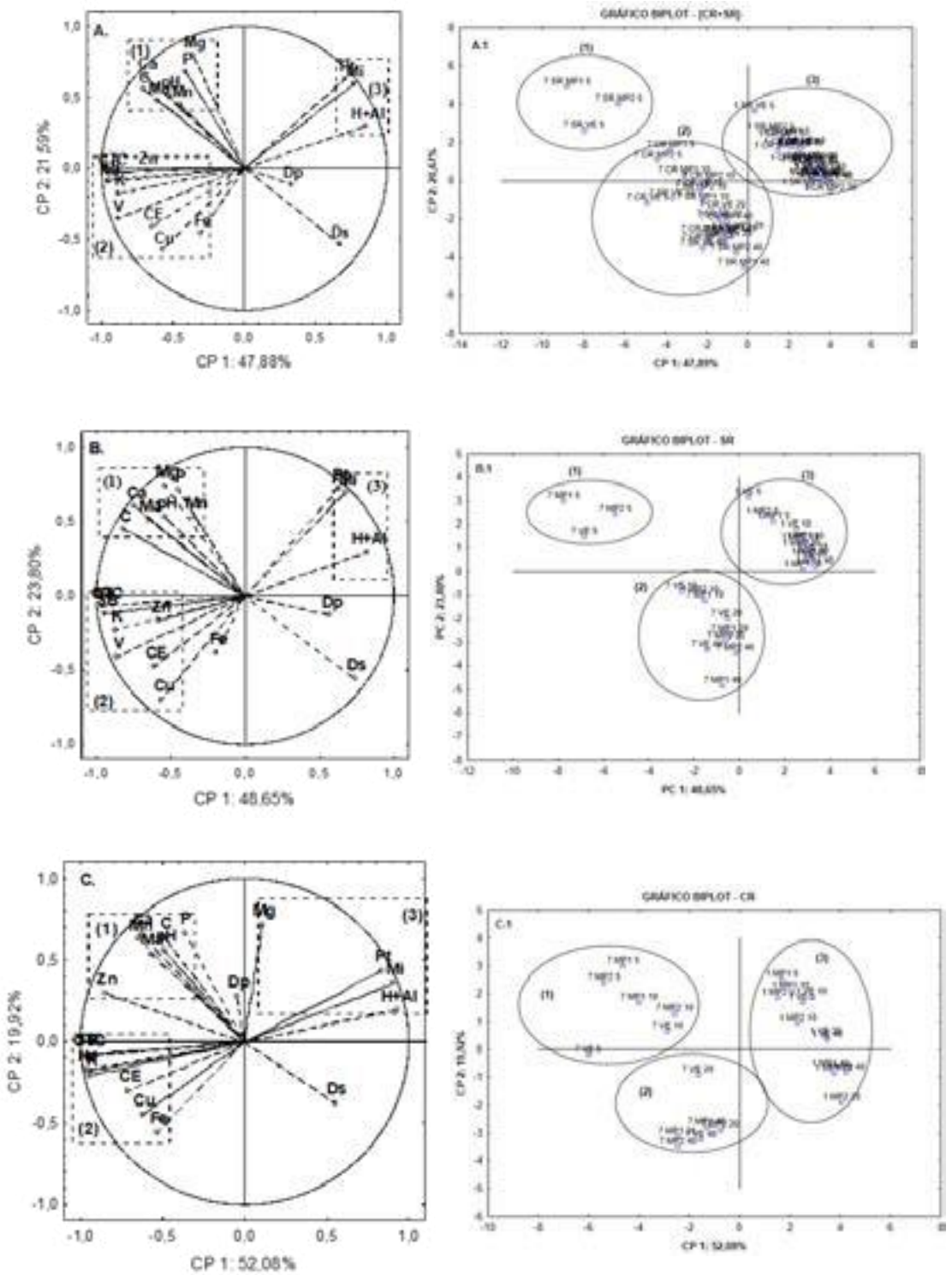


**Figura 3.** Gráficos das componentes principais e biplot (CP1 e CP2) da qualidade química e física do solo em diferentes profundidades e tempos de cultivo de mangueira cv. 'Kent', utilizando modelos de agroecossistemas multifuncionais. (A e A1) dados avaliados em conjunto (CR+SR); (B e B1) dados sem revolvimento do solo (SR); e (C e C1) dados com revolvimento do solo (CR)

Fonte: elaboração dos autores.

Para a análise realizada com o banco de dados completo (Figura 3A), as variáveis de maior peso dentro das componentes foram as características químicas H+Al, CTC, V, SB, os teores de Ca, C, P, Mg, K, Na e Zn; e as características físicas Ds, Mi e Pt (Tabela 2). Para o conjunto de dados representados pelos agroecossistemas sem revolvimento do solo (Figura 3B), as variáveis de maior peso, dentro das

componentes, foram as características químicas H+Al, CTC, V, SB, os teores de C, Ca, Mg, K, Na, Cu e P; e as características físicas Ds, Ma, Mi e Pt (Tabela 2). Os agroecossistemas que utilizam o revolvimento do solo para incorporação da fitomassa aérea das misturas de plantas (MP) (Figura 3C) apresentaram, como variáveis de maior peso na explicação da variância dos dados, as características químicas H+Al, CTC, V, SB, CE, teores de Ca, C, P, Mg, K, Na e Zn e as características físicas Ma, Mi e Pt (Tabela 2).

Assim, as características do solo descritas anteriormente foram as que apresentaram maior importância nas componentes CP1 e CP2 e, consequentemente, maior variação em função do tipo de agroecossistema e do tempo de cultivo. Por isso, podem ser consideradas mais sensíveis ao manejo, apresentando potencial para uso como indicador de evolução da qualidade do solo nas condições deste estudo.

As áreas demarcadas nas Figuras 3A, 3B e 3C são referentes à sobreposição com os gráficos biplot (Figuras 3A.1, 3B.1 e 3C.1) e mostram os grupos referentes aos agroecossistemas com qualidade de solo mais semelhantes entre si. A área 1 da Figura 3A representa a qualidade do solo nos agroecossistemas em que não há revolvimento do solo (SR) para incorporação da palhada das misturas de plantas, independente da MP utilizada, na profundidade de 0-0,05 m. Isso demostra que os agroecossistemas que associam a adição de fitomassa ao não revolvimento do solo são mais efetivos na melhoria na qualidade do solo, com ênfase nos teores de Ca, C, Mg e P. No entanto, essas alterações foram mais efetivas na camada mais superficial do solo, concordando com Blanco-Canqui & Wortmann (2020) na afirmação de que o plantio direto afeta a distribuição vertical de C e nutrientes no solo. Duval *et al. (*2019) também observaram que a prática de não revolvimento do solo foi mais efetiva para o aumento dos estoques de C e para a melhoria da qualidade do solo até 5 cm de profundidade.

A área 2 representa todos os agroecossistemas (combinações de MP e manejo dos resíduos) após 7 anos de cultivo, nas camadas de 5 a 40 cm. As características que se destacaram para caracterização da qualidade do solo desse grupo foram CTC, V, SB e os teores de K e Na.

A área 3 corresponde ao segundo ciclo de cultivo, fase inicial do experimento, em todas as profundidades do solo amostradas e MPs utilizadas. A qualidade do solo nessa condição é caracterizada pela acidez potencial do solo (H+Al) e pelas características físicas Mi e Pt que apresentaram maior peso na variabilidade dos dados. Assim, observa-se que a ACP permitiu agrupar por similaridade todas as amostras coletadas em função do tempo de implantação dos agroecossistemas. A partir dessa análise, pode-se inferir que o uso desses sistemas de manejo melhorou a qualidade inicial do solo, sendo que o tipo de manejo dos resíduos vegetais adotado é essencial para direcionar a construção dessa qualidade ao longo do tempo. A adoção desses agroecossistemas com adição de fitomassa e preparo mecânico reduzido é essencial para a sustentabilidade dos sistemas de produção, principalmente pelo impacto negativo do sistema convencional de cultivo de mangueira nessa região, já relatado por Santana *et al.* (2022).

Esses pesquisadores avaliaram o impacto de cinco sistemas de produção dependente de chuva e quatro sistemas agrícolas irrigados nos estoques de C e de nutrientes em um solo arenoso, em ambiente semiárido. Eles observaram que o cultivo da mangueira proporcionou perdas nos estoques de C e N na ordem de 70 e 66%, após 12 anos de cultivo, sendo o sistema de produção com maior impacto negativo, entre os nove avaliados. Ainda de acordo com os resultados deste estudo, a expansão da área implantada com essa cultura no semiárido brasileiro, utilizando o sistema vigente de cultivo, pode proporcionar perdas estimadas de C e N por emissão de até 8,9 Pg de $CO_2$. Esses resultados mostram a necessidade de propor novos desenhos de agroecossistemas sustentáveis e com multifuncionalidades para a produção de mangueira irrigada no semiárido brasileiro.

Para os agroecossistemas sem revolvimento do solo (Figura 3B e 3B.1), os resultados foram semelhantes à avaliação anterior (Figuras 3A e 3A.1), tanto no agrupamento dos agroecossistemas quanto

nas variáveis que caracterizam cada um dos três grupos formados. Isso demonstra que o manejo SR foi o fator mais preponderante para a evolução da qualidade do solo nas condições do estudo, determinando também a variabilidade dos dados. A ACP também permitiu observar de forma clara a evolução da qualidade do solo em função do tempo de cultivo e da profundidade do solo para cada tipo de agroecossistema.

Nos agroecossistemas com revolvimento (Figura 3C e 3C.1), ou seja, onde a fitomassa aérea das MPs foi incorporada ao solo (CR), a área 1 é representada pelas amostras coletadas após o sétimo ciclo de cultivo, até 10 cm de profundidade. Apesar de existir uma semelhança nas varáveis que representam esse grupo de dados quando comparado às avaliações anteriores, vale destacar que o C perde importância na variabilidade dos dados, sendo significativo apenas na CP 2, com menor carga fatorial (Tabela 2). Com a incorporação da fitomassa e a movimentação das camadas do solo, os nutrientes são disponibilizados em maior profundidade quando comparados à manutenção da fitomassa em superfície, no entanto, a manutenção de C no solo é reduzida pela mecanização. Ozbolat *et al.* (2023) também observaram a redução dos teores de C no solo pelo uso da mecanização e recomendaram uma combinação de cultivo reduzido e adubação verde para permitir a sustentabilidade de pomares de amendoeiras em condições ambientais muito frágeis. As principais vantagens observadas pelos pesquisadores foram o aumento da matéria orgânica do solo, do nitrogênio total e da maior presença de bactérias benéficas relacionadas à produtividade do solo. A área 2 é representada pelas amostras coletadas a partir de 0,10 m, representadas pelas variáveis CTC, SB e V e os teores de K e Na. Assim como nas outras duas situações de análise do banco de dados, a área 3 também é representada pelas amostras coletadas após o segundo ciclo de cultivo, independentemente do agroecossistema adotado. Esses resultados corroboram a eficiência da ACP na identificação da evolução da qualidade do solo. É importante ressaltar que essa melhoria ocorreu em todos os agroecossistemas, mesmo que em intensidade diferentes, definida pelo aporte de biomassa e o tipo de manejo de resíduos adotado.

Dessa forma, o tipo de manejo adotado nos agroecossistemas altera, de maneira diferenciada, características químicas e físicas do solo ao longo do tempo e no perfil do solo, sendo consideradas, como características com maior potencial para utilização como indicadores de qualidade do solo nesses sistemas de produção, aquelas com maior peso para explicar a variabilidade dos dados, quando foi utilizado o banco de dados completo (Tabela 2). As variáveis de menor peso nas CP1 e CP2, nos três arranjos de dados utilizados, a Dp, o pH e os teores de Fe e Mn, podem ser consideradas inadequadas para uso como indicadores de qualidade do solo nas condições testadas. Portanto, essas características do solo são passíveis de serem retiradas de análises rotineiras, sugerindo-se que sejam avaliadas com maior periodicidade nos agroecossistemas, qualquer que seja o manejo adotado para os resíduos vegetais das MPs. Outros pesquisadores já utilizaram a análise multivariada para selecionar propriedades do solo com potencial para uso como indicadores de qualidade. Duval *et al.* (2020) utilizaram análise multivariada para avaliar índices de qualidade do solo com base nas frações de carbono orgânico do solo e observaram que a ACP foi mais sensível para separar os sistemas de produção em função da qualidade do solo e para identificar as variáveis menos sensíveis aos sistemas de produção. Jalhoum *et al.* (2024) utilizaram técnicas de análise multivariada e SIG como abordagem para modelagem e mapeamento da qualidade do solo com objetivo de avaliar a adequação da terra para uso em zonas áridas. Esses pesquisadores destacaram que a integração dessas técnicas oferece um método preciso e eficaz para avaliar tanto o Índice de Qualidade do Solo (IQS) como a adequação da terra para o uso.

Ainda observando a Figura 3C.1, observa-se menor similaridade da VE 5cm com os demais dados do grupo 1 e da VE 20 cm no grupo 2, mostrando uma qualidade menor em relação aos outros tratamentos. Assim, observou-se que a prática de deixar a VE nas entrelinhas de mangueira não mostrou tanta eficiência no incremento da qualidade do solo, quando associada ao seu revolvimento, mas apresentou bom desempenho se usada como cobertura do solo, sem sua incorporação.

Ao contrário do observado por Stefanoski *et al.* (2016), no presente trabalho, obteve-se diferenciação entre os manejos do solo, apesar de ser apenas na profundidade inicial. No entanto, os autores ressaltam que a não diferenciação entre o manejo convencional e o plantio direto nos indicadores avaliados pode estar relacionada ao curto tempo de avaliação, fator que evidencia a necessidade de estudos por maior período de tempo. Assim, espera-se aumento na qualidade do solo com esses agroecossistemas em maiores profundidades para o manejo SR, proporcionando sustentabilidade ao cultivo da mangueira no semiárido e contribuindo na manutenção dos serviços ecossistêmicos do solo nessa região. Giongo *et al.* (2020), utilizando o Roth-C para avaliar os efeitos em longo prazo do uso das misturas de plantas e dos manejos da fitomassa nos estoques de C do solo, observaram que a combinação do não revolvimento com as misturas de plantas de cobertura de alta qualidade, utilizada no cultivo irrigado de manga, excederia os estoques iniciais de C, na camada até 20 cm, da Caatinga em 25 anos.

Após a identificação dos grupos, foram calculadas as médias das propriedades do solo para cada um deles (Tabela 3), que apresentaram diferença estatística significativa pelo teste F (MANOVA), sendo possível observar mais nitidamente os efeitos do manejo na qualidade do solo.

**Tabela 3.** Médias e desvio padrão (DP) das variáveis para cada grupo formado pela ACP

(Continua)

| **SR+CR** | **G1** | | **G2** | | **G3** |
|---|---|---|---|---|---|
| | **média** | **dp** | **média** | **dp** | **dp** |
| CE (dS $m^{-1}$) | 0,78 | 0,19 | 0,68 | 0,34 | 0,08 |
| C (g $kg^{-1}$) | 1,13 | 0,24 | 0,32 | 0,16 | 0,08 |
| P (mg $kg^{-1}$) | 43,17 | 15,96 | 23,54 | 7,89 | 10,07 |
| K ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 0,37 | 0,19 | 0,17 | 0,06 | 0,08 |
| Ca ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 3,72 | 0,55 | 1,71 | 0,48 | 0,27 |
| Mg ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 1,51 | 0,23 | 0,75 | 0,14 | 0,18 |
| SB ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 5,65 | 0,61 | 2,65 | 0,61 | 0,45 |
| H+Al ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 0,23 | 0,04 | 0,47 | 0,36 | 0,28 |
| CTC ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 5,88 | 0,65 | 3,12 | 0,56 | 0,48 |
| V (%) | 95,80 | 0,49 | 85,49 | 8,75 | 5,94 |
| Mn (mg $kg^{-1}$) | 28,58 | 10,09 | 25,32 | 9,41 | 8,26 |
| Cu (mg $kg^{-1}$) | 1,22 | 0,13 | 1,32 | 0,47 | 0,23 |
| Fe (mg $kg^{-1}$) | 8,69 | 2,52 | 13,62 | 6,19 | 2,94 |
| Zn (mg $kg^{-1}$) | 2,74 | 1,18 | 2,04 | 1,08 | 0,44 |
| Ds (kg $dm^{-3}$) | 1,30 | 0,01 | 1,44 | 0,04 | 0,02 |
| Mi (%) | 0,27 | 0,01 | 0,27 | 0,01 | 0,01 |
| Ma (%) | 0,21 | 0,02 | 0,17 | 0,03 | 0,01 |
| Pt (%) | 48,01 | 1,33 | 43,75 | 1,86 | 0,82 |
| **SR** | **G1** | | **G2** | | **G3** | |
| | **Média** | **DP** | **Média** | **DP** | **Média** | **DP** |
| CE (dS $m^{-1}$) | 0,78 | 0,19 | 0,68 | 0,36 | 0,26 | 0,09 |
| C (g $kg^{-1}$) | 1,13 | 0,24 | 0,29 | 0,11 | 0,26 | 0,08 |

(Conclusão)

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| P (mg $kg^{-1}$) | 43,17 | 15,96 | 18,42 | 5,74 | 26,36 | 11,18 |
| K ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 0,37 | 0,19 | 0,19 | 0,07 | 0,29 | 0,08 |
| Ca ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 3,72 | 0,55 | 1,45 | 0,44 | 1,64 | 0,34 |
| Mg ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 1,51 | 0,23 | 0,67 | 0,15 | 0,89 | 0,20 |
| SB ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 5,65 | 0,61 | 2,34 | 0,60 | 2,75 | 0,48 |
| H+Al ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 0,23 | 0,04 | 0,58 | 0,53 | 1,66 | 0,28 |
| CTC ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 5,88 | 0,65 | 2,91 | 0,64 | 4,34 | 0,39 |
| V (%) | 95,80 | 0,49 | 82,29 | 11,73 | 63,33 | 6,49 |
| Mn (mg $kg^{-1}$) | 1,22 | 0,13 | 1,33 | 0,36 | 0,56 | 0,18 |
| Cu (mg $kg^{-1}$) | 8,69 | 2,52 | 14,61 | 9,05 | 8,17 | 3,62 |
| Fe (mg $kg^{-1}$) | 28,58 | 10,09 | 20,63 | 9,42 | 22,28 | 9,27 |
| Zn (mg $kg^{-1}$) | 2,74 | 1,18 | 2,11 | 1,37 | 1,00 | 0,49 |
| Ds (kg $dm^{-3}$) | 1,30 | 0,01 | 1,45 | 0,02 | 1,44 | 0,03 |
| Mi (%) | 0,21 | 0,02 | 0,16 | 0,02 | 0,16 | 0,01 |
| Ma (%) | 0,27 | 0,01 | 0,27 | 0,01 | 0,28 | 0,00 |
| Pt (%) | 48,01 | 1,33 | 43,03 | 1,30 | 56,28 | 0,96 |

| **CR** | **G1** | | **G2** | | **G3** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Média** | **DP** | **Média** | **DP** | **Média** | **DP** |
| CE (dS $m^{-1}$) | 0,65 | 0,29 | 0,71 | 0,42 | 0,25 | 0,08 |
| C (g $kg^{-1}$) | 0,45 | 0,21 | 0,23 | 0,04 | 0,25 | 0,08 |
| P (mg $kg^{-1}$) | 32,38 | 5,77 | 22,38 | 4,48 | 25,88 | 9,32 |
| K ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 0,16 | 0,05 | 0,13 | 0,02 | 0,30 | 0,09 |
| Ca ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 2,28 | 0,22 | 1,53 | 0,16 | 1,65 | 0,21 |
| Mg ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 0,89 | 0,06 | 0,73 | 0,06 | 0,90 | 0,18 |
| SB ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 3,36 | 0,25 | 2,40 | 0,18 | 2,83 | 0,43 |
| H+Al ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 0,30 | 0,12 | 0,47 | 0,08 | 1,71 | 0,29 |
| CTC ($cmol_c$ $dm^{-3}$) | 3,66 | 0,27 | 2,87 | 0,16 | 4,54 | 0,56 |
| V (%) | 91,92 | 2,67 | 83,86 | 2,79 | 62,63 | 5,60 |
| Mn (mg $kg^{-1}$) | 1,28 | 0,64 | 1,36 | 0,49 | 0,68 | 0,27 |
| Cu (mg $kg^{-1}$) | 10,79 | 1,55 | 14,96 | 2,54 | 8,40 | 2,23 |
| Fe (mg $kg^{-1}$) | 35,63 | 2,13 | 22,07 | 5,29 | 22,07 | 7,52 |
| Zn (mg $kg^{-1}$) | 2,51 | 0,87 | 1,47 | 0,45 | 0,91 | 0,40 |
| Ds (kg $dm^{-3}$) | 1,40 | 0,04 | 1,46 | 0,04 | 1,46 | 0,02 |
| Mi (%) | 0,20 | 0,02 | 0,15 | 0,02 | 0,16 | 0,01 |
| Ma (%) | 0,26 | 0,01 | 0,28 | 0,01 | 0,28 | 0,01 |
| Pt (%) | 45,69 | 1,64 | 42,91 | 1,46 | 56,67 | 0,64 |

Fonte: elaboração dos autores.

Observou-se que os grupos G1 e G2 (Tabela 3) apresentam, em geral, uma melhoria nos indicadores avaliados, em relação ao G3, formado pelas amostras coletadas no segundo ano de cultivo dos agroecossistemas. Isso ressalta os benefícios da adoção de sistemas de produção mais complexos, com adição de fitomassa e, principalmente, com a prática de não revolvimento do solo, sobre sua qualidade, independente da mistura de plantas de cobertura. Além disso, nas condições do estudo, observou-se que as práticas de manejo adotadas (SR e CR) dentro de cada agroecossistema é mais determinante nas alterações da qualidade do solo. Quando se compara as médias dos indicadores dos grupos formados com os agroecossistemas que adotam o revolvimento como estratégia para o manejo da fitomassa, estas são menores do que as observadas nos agroecossistemas nos quais não há revolvimento do solo.

Os agroecossistemas SR do solo proporcionam maior acúmulo de C (Tabela 3), logo, considerando-se que esse indicador influencia positivamente em diferentes propriedades do solo (ZORZONZA *et al.*, 2015), a manutenção dos resíduos de fitomassa sobre a superfície melhora a qualidade dos serviços ecossistêmicos prestados. Segundo Vezanni (2015), a dependência dos serviços ecossistêmicos com o solo está relacionada às funções que este executa. Entre as funções do solo, podemos citar a promoção da biodiversidade, a produção de alimentos, constituinte dos ciclos biogeoquímicos, atuação no ciclo da água, auxílio na regulação ambiental, entre outros (SERE *et al.*, 2024).

O não revolvimento do solo (SR) proporcionou melhoria da qualidade do solo, ao longo do tempo, principalmente na profundidade 0-0,05 m, seja pelo aumento da disponibilidade de nutrientes, seja pela redução da acidez potencial do solo. No entanto, houve redução da porosidade do solo (Pt, Ma e Mi).

Apesar de o revolvimento (CR) melhorar a qualidade do solo, em relação à sua condição inicial, na camada de 0-0,10 m, os incrementos são menores para todos os indicadores avaliados, principalmente de C. Ji *et al.* (2015) destacam que o plantio convencional tem efeitos positivos e negativos na qualidade do solo, apesar de aumentar o rendimento das culturas no curto prazo, a degradação geral dos ecossistemas geralmente tende a limitar a produtividade das culturas em longo prazo.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tipo de manejo utilizado é fator preponderante para alterar a qualidade do solo em agroecossistemas sustentáveis para produção de manga no semiárido.

Após sete ciclos de cultivo de misturas de plantas de cobertura e deposição da palhada na superfície do solo (SR), a camada superficial (0 – 0,05 m) apresentou melhor qualidade, evidenciada, principalmente pelo maior acúmulo de C no solo da entrelinha do pomar de mangueira.

A ACP se mostrou uma ferramenta efetiva para a escolha das propriedades do solo que apresentam maior influência na sua qualidade. No entanto, ainda é necessário desenvolver pesquisas com intuito de integrar propriedades químicas, físicas e biológicas em modelos para avaliação da qualidade do solo em ambientes semiáridos, utilizando IQS sensíveis aos diferentes agroecossistemas adotados. Igualmente importante é classificar os IQS em faixas de adequabilidade, relacionando-as com as produtividades alcançadas para auxiliar o produtor na escolha adequada das práticas de manejo que melhorem a qualidade do solo e a sustentabilidade dos sistemas de produção de manga no semiárido.

## 5 AGRADECIMENTOS

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa - MP 22.14.08.002.00.00; MP 03.07.09.032.00.00), ao Banco do Nordeste (BNB), pelo financiamento do projeto, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão das bolsas de pós-graduação.

## REFERÊNCIAS

BAGNALL, D. K. *et al*. A minimum suite of soil health indicators for north American agriculture. **Soil Security**, v. 10, 100084. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soisec.2023.100084.

BLANCO-CANQUI, H.; WORTMANN, C. S. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review. **Soil and Tillage Research**, v. 198, 104534, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104534.

CHUCKRAN, P. F. *et al*. Multiple mechanisms determine the effect of warming on plant litter decomposition in a dryland, **Soil Biology and Biochemistry**, v. 145, 107799, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107799.

CUNHA, T. J. F. et al. **Principais solos do semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo**. *In*: SA, I. B.; SILVA, P. C. G. da. (ed.). Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação. Petrolina: Embrapa Semiárido, cap. 2, p. 50-87, 2010.

DONAGEMA, G. K. *et al.* (org). **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011, 230 p.

DUVAL, M. E.; MARTINEZ, J. M. M.; GALANTINI, J. Assessing soil quality indices based on soil organic carbon fractions in different long-term wheat systems under semiarid conditions. **Soil Use Manage**. v. 36, p.71–82, 2020. DOI: https://doi.org/10.1111/sum.12532

EMBRAPA. **Observatório de manga:** Exportações 2023. Disponível em: https://www.embrapa.br/observatorio-da-manga-2023. Acesso em: 25 fev. 2024.

FREITAS, M. do S. C. *et al*. Decomposition and nutrient release of cover crops in mango cultivation in Brazilian Semi-arid region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, e0170402, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170402.

GIONGO, V. *et al*. Optimizing multifunctional agroecosystems in irrigated dryland agriculture to restore soil carbon - experiments and modelling. **Science of the total environment**, v. 725, 138072, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138072.

GIONGO, V. *et al*. **Fundamentos para o desenho de agroecossistemas multifuncionais adaptados às condições de semiaridez**. *In*: GIONGO, V.; ANGELOTTI, F. (ed.). Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira. Brasília, DF: Embrapa, cap. 8, p. 127-140. 2022a

GIONGO, V. *et al*. Estratégias para sequestro de carbono: experimentação de modelos**.** *In*: GIONGO, V.; ANGELOTTI, F. (ed.). **Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas**: experiência brasileira. Brasília, DF: Embrapa, cap. 7, p. 113-126. 2022b

HAIR, J. *et al*. **Multivariate data analysis.** 7th edition. Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2009. 688p.

IBGE, **Produção Agrícola Municipal 2022**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pi/pesquisa/14/0. Acesso em: 25 fev. 2024.

JALHOUM, M. *et al*. Multivariate analysis and GIS approaches for modeling and mapping soil quality and land suitability in arid zones. **Heliyon**, v. 10, n. 5, p. e27577. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27577.

JI, Q. *et al*. Tillage effects on soil aggregation, organic carbon fractions and grain yield in Eum-Orthic Anthrosol of a winter wheat-maize double-cropping system, Northwest China. **Soil use and management**, v. 31, p. 504-514, 2015. DOI: https://doi.org/10.1111/sum.12213.

KOEPPEN, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la tierra. México, DF: Fondo de Cultura Economica, 1948 478 p.

NGUEMEZI, C. *et al*. Soil quality and soil fertility status in major soil groups at the Tombel area, South-West Cameroon, **Heliyon**, v.6, e03432, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03432.

NORRIS, C. *et al*. Introducing the north American project to evaluate soil health measurements **Agronomy Journal**, v. 112, p. 3195-3215, 2020. DOI: https://doi.org/10.1002/agj2.20234.

NORRIS, C. *et al*. The story of long-term research sites and soil health in Canadian agriculture. **Canadian Journal of Soil Science,** v. 103, p. 164–190, 2023. DOI: https://dx.doi.org/10.1139/CJSS-2021-0174.

NUNES, M. *et al*. The soil health assessment protocol and evaluation applied to soil organic carbon. **Soil Science Society of American Journal,** v. 85, p. 1196-1213, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/saj2.20244.

OLIVEIRA NETO, M. B. *et al*. Contribuição ao estudo de solos frágeis na Região Semiárida: Petrolina, PE. *In*: CASTRO, S. S. de; HERNANI, L. C. (ed.). **Solos frágeis**: caracterização, manejo e sustentabilidade. Brasília, DF: Embrapa, 2015. pt. 1, cap. 5, p. 111-133.

OLIVEIRA, U.; AMADO, A. M.; VASCONCELLOS; A. Aerial plant biomass and litterfall as local determinants of leaf litter and fine root decomposition in a semiarid ecosystem of the Neotropical region, **Arid Land Research and Management**, v. 33, p. 375-387, 2019. DOI: https://doi.org/10.1080/15324982.2019.1573387.

ÖZBOLAT, O. *et al*. Long-term adoption of reduced tillage and green manure improves soil physicochemical properties and increases the abundance of beneficial bacteria in a Mediterranean rainfed almond orchard. **Geoderma**, v. 429, 116218, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116218.

PEREIRA FILHO, A. *et al*. Nutrient cycling in multifunctional agroecosystems with the use of plant cocktail as cover crop and green manure in the semi-arid. **African Journal of Agricultural Research**, v. 14, p. 241-251, 2019. DOI: https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13600.

REN, H. *et al*. Green manure provides growth benefits for soil mesofauna by promoting soil fertility in agroecosystems. **Soil and tillage research**, v. 238, 106006, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106006.

SALVIANO, A. M. *et al*. Plantas de cobertura em ambiente semiárido: produção de biomassa, adição de Carbono e de nutrientes ao solo. **DELOS**: Desarrollo local sostenible, v. 16, p. 835-852, 2023. DOI: https://doi.org/ 10.55905/rdelosv16.n43-022.

SANTANA, M. da S. Do agrosystems change soil carbon and nutrient stocks in a semiarid environment? **Journal of Arid Environments**, v. 201, 104747, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104747.

SANTOS, H. G. dos *et al*. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SERE, G. *et al*. Selection of soil health indicators for modelling soil functions to promote smart urban planning. **Science of The Total Environment**, 2024, 171347, ISSN 0048-9697. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171347.

SILVA, D. J. et al. Nutrição mineral e adubação da mangueira em condições irrigadas. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2004. 13 p. (Embrapa Semi-Árido. Circular técnica, 77).

STEFANOSKI, D. C. *et al*. Selecting soil quality indicators for different soil management systems in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p.1643-1651, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900064.

STOLF, R. *et al*. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 447-459, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200014.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* (Ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574p.

TIBCO Software Inc. (2020). Data Science Workbench, version 14. http://tibco.com.

VEZZANI, F. M. Solos e os serviços ecossistêmicos (Soils and the Ecosystem Services). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 673-684. 2015. DOI: https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.0.

ZHANG, J. *et al*. Assessment of soil health and identification of key soil health indicators for five long-term crop rotations with varying fertility management. **Geoderma**, Volume 443, 2024, 116836, ISSN 0016-7061. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116836.

ZORNOZA, R. *et al*. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. **Soil**, v. 1, p. 173-85. 2015. DOI: https://doi.org/10.5194/soil-1-173-2015.