XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

RESTAURAÇÃO PRODUTIVA DE ENCOSTAS DEGRADADAS NO SEMIÁRIDO: EFEITOS DE ARRANJOS DE PALMA FORRAGEIRA E COBERTURA MORTA NA DINÂMICA HIDROLÓGICA

Thayná A. B. Almeida [1,3]; Abelardo A. A. Montenegro[1], João L. M. P. de Lima[2], Daniel Green[3]

RESUMO - O semiárido brasileiro apresenta elevada vulnerabilidade à degradação do solo em função da irregularidade das precipitações, elevadas taxas de evapotranspiração e intensificação do uso do solo, agravadas pela remoção da cobertura vegetal da Caatinga. Nesse contexto, estratégias de restauração produtiva associadas à conservação hídrica tornam-se fundamentais para reduzir processos erosivos e aumentar a resiliência de encostas degradadas. O presente estudo avaliou a eficiência da palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.) associada à cobertura morta no controle hidrossedimentológico de encostas degradadas no semiárido pernambucano. O monitoramento foi realizado em parcelas experimentais submetidas a cinco tratamentos: solo descoberto (SD), palma em 100% da parcela (PF100%), palma associada à cobertura morta parcial (PF+M50%), cobertura morta em 100% (M100%) e cobertura morta em 50% (M50%). A dinâmica da umidade superficial do solo (0-0,20 m), precipitação e eventos de escoamento superficial foi monitorada sob condições naturais de chuva. Os resultados evidenciaram forte sazonalidade hidrológica e efeito significativo do tratamento sobre a umidade do solo ($p < 0,001$). No evento de maior resposta hidrológica, o tratamento M100% reduziu em até 68% o escoamento superficial e 95% a perda de solo em relação ao solo descoberto. Enquanto a palma favoreceu maior persistência da umidade durante a estiagem, os tratamentos com cobertura morta apresentaram maior eficiência no controle hidrossedimentológico, indicando potencial complementar para aumento da resiliência hidrológica em áreas degradadas.

ABSTRACT- The Brazilian semiarid region presents high vulnerability to soil degradation due to irregular rainfall patterns, high evapotranspiration rates, and intensified land use, aggravated by the removal of native Caatinga vegetation cover. In this context, productive restoration strategies associated with water conservation become essential to reduce erosive processes and enhance the resilience of degraded hillslopes. This study evaluated the efficiency of forage cactus (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.) associated with mulch cover for hydro sedimentological control of degraded hillslopes in the semiarid region of Pernambuco, Brazil. Monitoring was conducted in experimental plots subjected to five treatments: bare soil (SD), forage cactus covering 100% of the plot (PF100%), forage cactus associated with partial mulch cover (PF+M50%), mulch covering 100% of the surface (M100%), and mulch covering 50% of the surface (M50%). Soil surface moisture dynamics (0-0,20 m), rainfall, and runoff events were monitored under natural rainfall conditions. The results revealed strong hydrological seasonality and a significant treatment effect on soil moisture ($p < 0.001$). During the event with the highest hydrological response, the M100% treatment reduced runoff by up to 68% and soil loss by 95% compared to bare soil. While forage cactus favored greater soil moisture persistence during dry periods, mulch treatments showed higher efficiency in hydro sedimentological control, indicating complementary potential to increase the hydrological resilience of degraded areas.

Palavras-Chave - umidade do solo; escoamento superficial; cobertura morta.

[1]) Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, thayna.britoalmeida@ufrpe.br; montenegro.ufrpe@gmail.com
[2]) MARE-Marine and Environmental Sciences Centre, ARNET-Aquatic Research Network, Department of Civil Engineering, Faculty of Sciences and Technology, University of Coimbra, Coimbra, Portugal, plima@dec.uc.pt.
[3]) Earth Science Department, Durham University, Durham, United Kingdom, daniel.green@durham.ac.uk; thayna-alice.brito-almeida@durham.ac.uk.

INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro, inserido majoritariamente no bioma Caatinga, caracteriza-se pela elevada variabilidade climática, irregularidade espaço-temporal das precipitações e elevada evapotranspiração potencial, fatores que condicionam forte vulnerabilidade hidrológica e susceptibilidade à degradação do solo (Montenegro & Ragab, 2010; Almeida et al., 2024). Eventos pluviométricos concentrados, frequentemente intensos e de curta duração, favorecem a geração de escoamento superficial e erosão hídrica, especialmente em áreas submetidas à remoção da cobertura vegetal e ao uso inadequado do solo (Riquetti et al., 2022). Nas últimas décadas, o avanço do desmatamento, a expansão agropecuária e a substituição da vegetação nativa da Caatinga vêm intensificando processos de degradação ambiental, reduzindo a capacidade de infiltração do solo e aumentando perdas de água, sedimentos e matéria orgânica (Medeiros et al., 2026; Oliveira et al., 2026).

A degradação de encostas no semiárido reduz a rugosidade superficial, favorece o selamento do solo e aumenta a conectividade hidrológica, ampliando a susceptibilidade aos processos erosivos. Nesse contexto, práticas conservacionistas baseadas em cobertura vegetal e cobertura morta têm sido apontadas como estratégias eficazes para aumentar a infiltração, reduzir o impacto direto das gotas de chuva e minimizar o escoamento superficial e as perdas de solo (Abrantes et al., 2018; Cantalice et al., 2019). Em condições naturais do semiárido pernambucano, Lima et al. (2020) observaram maior retenção de umidade e redução das perdas de solo em parcelas protegidas por cobertura vegetal e cobertura morta, reforçando a importância dessas técnicas na recuperação de áreas degradadas.

Entre as alternativas para restauração produtiva, a palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.) destaca-se pelo elevado potencial adaptativo às condições semiáridas, elevada resistência ao déficit hídrico e importância socioeconômica regional, especialmente para alimentação animal durante períodos de estiagem (Montenegro et al., 2019). Além do valor econômico, o uso de cordões vegetados de palma pode atuar como barreira física ao escoamento superficial, favorecendo maior rugosidade hidráulica e retenção hídrica em encostas degradadas (Souza et al., 2023). Entretanto, ainda são limitados os estudos experimentais que avaliam a eficiência de diferentes arranjos espaciais de palma forrageira associados à cobertura morta no controle hidrossedimentológico sob condições naturais de chuva no semiárido.

Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de diferentes configurações de palma forrageira associada à cobertura morta no controle hidrossedimentológico de encostas degradadas no semiárido, investigando seus efeitos sobre a dinâmica da umidade do solo e o escoamento superficial.

2.MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado em uma área experimental agrícola localizada no Assentamento Nossa Senhora do Rosário, na bacia representativa do Mimoso, no município de Pesqueira-PE. A bacia do Mimoso faz parte da bacia do Alto Ipanema, situada na região semiárida do estado de Pernambuco (Figura 1), e é um afluente do rio São Francisco em sua seção médio-baixa. O clima da região é classificado como BSh (semiárido quente) de acordo com a classificação de Köppen. A evapotranspiração potencial de referência média anual é de 2.000 mm, e a temperatura média anual é de 23°C. A região recebe uma precipitação média anual de 686 mm (Lima et al., 2020).

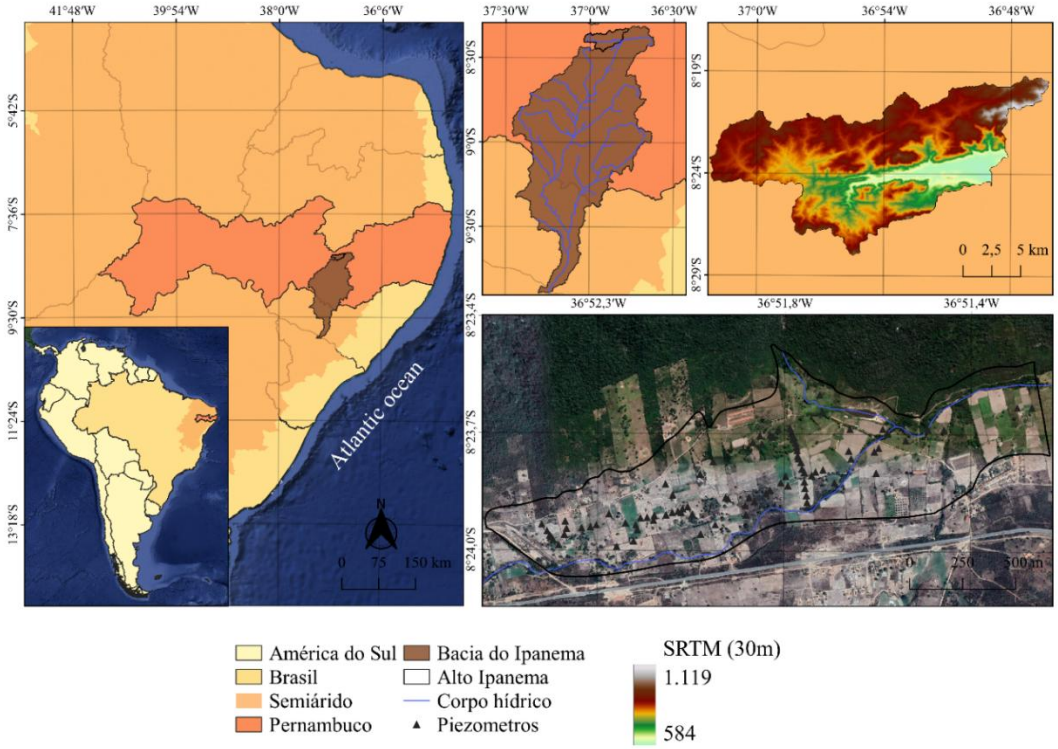


Figura 1 - Mapa de localização bacia do Alto Ipanema, município de Pesqueira-PE.

O solo na área de estudo é classificado como Neossolo Regolítico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013). É relativamente raso, com uma profundidade de aproximadamente 0,85 metros, e possui textura franco-arenosa.

Arranjo experimental dos tratamentos

Foram dispostas cinco parcelas de erosão retangulares de 1,0 m de largura e 8,0 m de comprimento (Figura 2), em uma encosta degradada com 10% de declividade, onde foram

distribuídos os seguintes tratamentos: (1) SD: Solo descoberto (2) PF 100%: Palma Orelha de Elefante (*Opuntia stricta* (Haw) Haw.), plantadas no espaçamento de 1×1 m² entre fileiras entre linhas e distribuída por toda a extensão da parcela; (3) PF + M 50%: Palma OE na parte inferior da parcela na presença de cobertura morta; (4) M 100%: Cobertura morta sobre a superfície do solo de densidade de 8 t ha^{-1}; (5) M 50%: Cobertura morta sobre 50% da superfície do solo de densidade de 8 t ha^{-1};

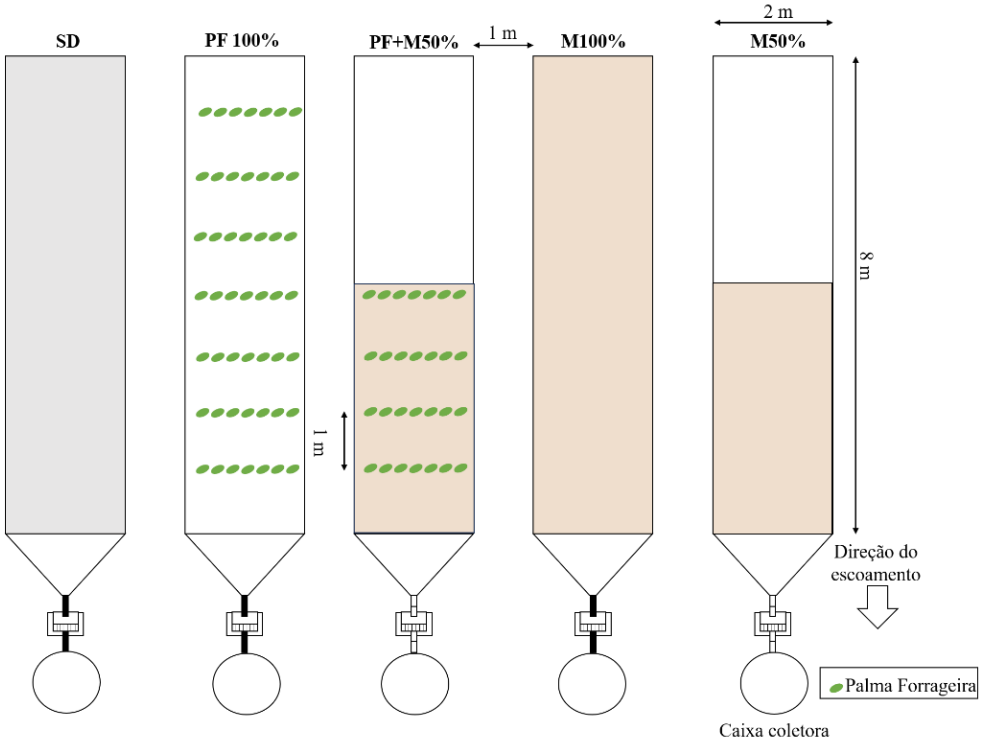


Figura 2 - Parcelas de erosão e os respectivos tratamentos.

As parcelas foram delimitadas por chapas metálicas de 0,40 m de altura, cravadas no solo a uma profundidade de 0,15 m. Para coleta e quantificação do volume de água escoado superficialmente e das perdas de solo, nas partes inferiores das parcelas foram instalados sistemas coletores de água e sedimentos, constituído de divisor tipo Geib (com 7 saídas, sendo previamente nivelado e calibrado) e tanque de coleta com capacidade de 0,5 m^3.

Dados meteorológicos

A coleta dos dados meteorológicos foi realizada na estação meteorológica automatizada, localizada próxima a área. Foi utilizado o microprocessador de dados tipo datalogger da Campbell Scientific (modelo CR1000/CFM100/OS100). A evapotranspiração (ET_0) de referência foi obtida de acordo com o método de Penman-Monteith da FAO (Allen, 1998), utilizando os dados climatológicos registrados na estação automática.

Monitoramento da umidade

Sondas de umidade CS616 da *Campbell Scientific* foram instaladas na profundidade de 0-0,20 m para monitoramento detalhado da umidade do solo, sendo conectados a um dattalogger CR1000 da Campbell Scientific, com aquisição de dados a cada 1 hora.

Medições experimentais de água e sedimento

O escoamento e a perda de solo foram monitorados durante os eventos individuais erosivos. As amostras de água e sedimento foram coletadas em potes plásticos, triplicata para cada tratamento, encaminhado para o laboratório de Água e Solo (LAS) onde foi realizada a pesagem do material coletado na enxurrada, mantidos em repouso por 24 horas, o sobrenadante foi pipetado, e separado do material sólido restante no fundo dos recipientes. Os potes foram levados para secagem em estufa a 65º C, durante 72 horas, sendo em seguida pesados com o solo, para determinar a perda total de solo do evento, conforme recomendações de Cogo (1978).

Análise estatística

A dinâmica da umidade do solo (0-0,20 m) foi analisada considerando os fatores tratamento e período hidrológico (seco e úmido). Inicialmente, os dados foram segregados em dois períodos: período seco (agosto de 2023 a janeiro de 2024) e período úmido (janeiro a abril de 2024). Em seguida, foi ajustado um modelo linear misto (Linear Mixed Model - LMM), considerando tratamento, período hidrológico e a interação tratamento e período como efeitos fixos, e o tempo de monitoramento como efeito aleatório, visando considerar a dependência temporal das observações repetidas. As comparações múltiplas entre médias foram realizadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R (R Core Team, 2025).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A dinâmica temporal da umidade superficial do solo (0-0.20 m) apresentou forte sazonalidade ao longo do período monitorado (Figura 3), com redução gradual dos teores hídricos durante o período seco (agosto de 2023 a janeiro de 2024) e rápida recuperação após o início das chuvas. Os tratamentos apresentaram respostas distintas aos pulsos pluviométricos, particularmente após janeiro de 2024, quando ocorreram eventos sucessivos de precipitação e escoamento superficial.

Durante o período seco, os tratamentos com palma forrageira (PF100%) e cobertura morta total (M100%) apresentaram maior persistência de umidade superficial, sugerindo redução das perdas evaporativas e maior conservação hídrica do solo. Resultados semelhantes foram observados por Montenegro et al. (2019), que identificaram maior estabilidade da umidade do solo sob condições de maior cobertura superficial em ambientes semiáridos.

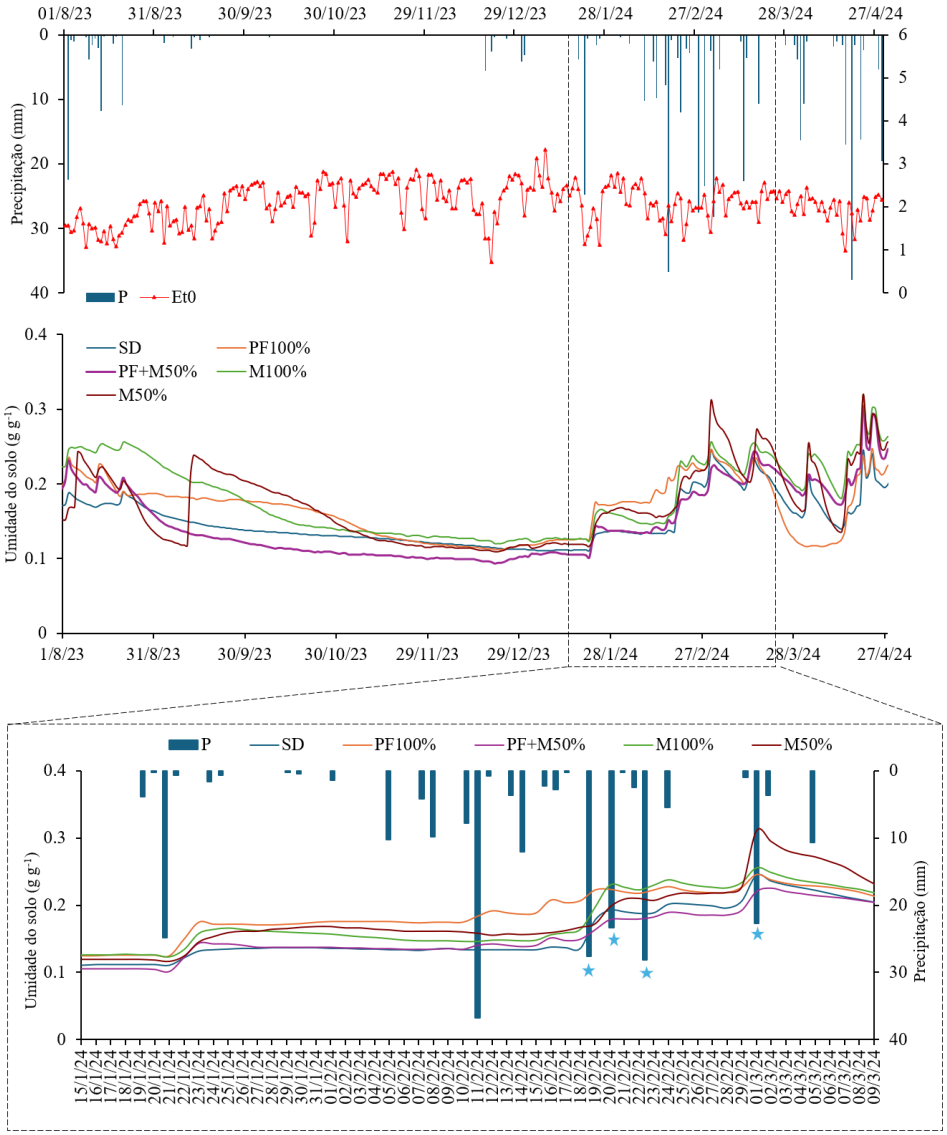


Figura 3 - Dinâmica temporal da precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET_0) e da umidade superficial do solo (0-0,20 m) sob diferentes estratégias de restauração em encosta degradada do semiárido.

Após o início do período chuvoso, os tratamentos com cobertura morta (M100% e M50%) passaram a apresentar maiores valores de umidade, indicando maior eficiência na retenção hídrica após os pulsos pluviométricos. Esse comportamento sugere maior capacidade de infiltração e proteção superficial do solo, reduzindo o efeito do selamento provocado pelo impacto das gotas de chuva, conforme discutido por Lima et al. (2020).

Em contraste, o solo descoberto (SD) apresentou menores valores de umidade ao longo do monitoramento, evidenciando maior vulnerabilidade hidrológica de superfícies degradadas. Segundo Montenegro e Ragab (2010), alterações no uso do solo e remoção da cobertura vegetal intensificam

processos de degradação hídrica em regiões semiáridas, favorecendo maior escoamento superficial e menor armazenamento hídrico.

As diferenças entre os tratamentos tornaram-se mais evidentes quando os dados foram segregados entre os períodos seco e úmido (Figura 4). Observou-se mudança no padrão de resposta hidrológica entre os manejos, indicando comportamento sazonal distinto das estratégias de restauração.

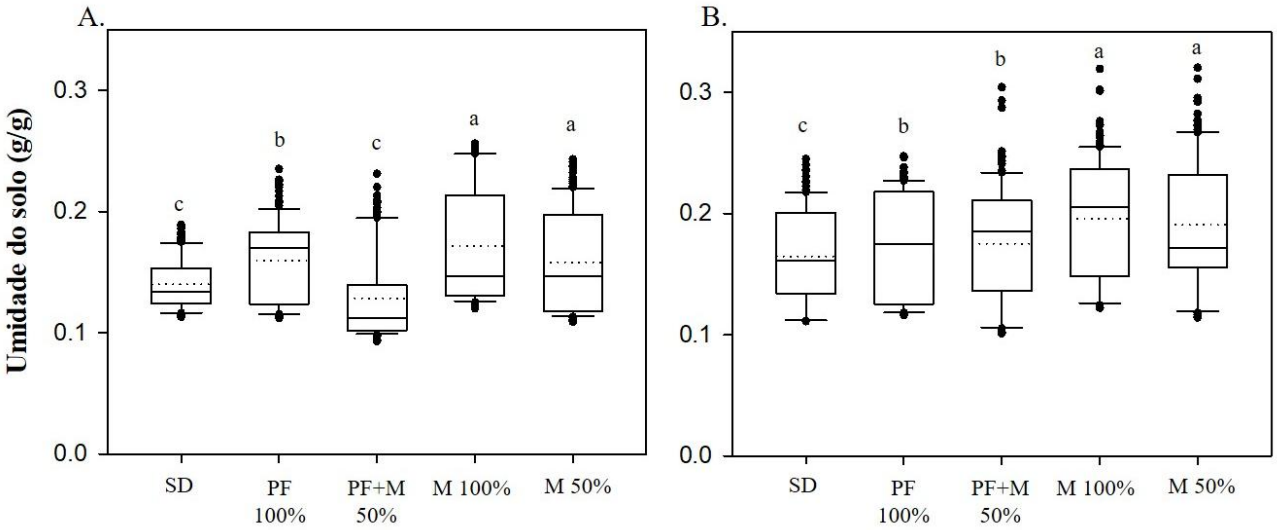


Figura 4 - Distribuição da umidade superficial do solo (0-0,20 m) sob diferentes estratégias de restauração em encosta degradada do semiárido durante o período seco (A - agosto de 2023 a janeiro de 2024) e período úmido (B- janeiro a abril de 2024).

*A linha central representa a mediana, a linha pontilhada a média e as caixas representam os quartis da distribuição dos dados, e letras distintas indicam diferenças significativas entre tratamentos dentro de cada período hidrológico pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

No período seco (Figura 4A), os tratamentos com palma distribuída em toda a parcela (PF100%) e cobertura morta total (M100%) apresentaram maior persistência da umidade superficial do solo em comparação ao solo descoberto (SD), sugerindo maior capacidade de manutenção hídrica sob condições prolongadas de déficit hídrico. A resposta observada em PF100% sugere que a palma forrageira atuou como elemento estabilizador da umidade superficial, comportamento também reportado por Souza et al. (2023) em parcelas com cordões de palma no semiárido brasileiro.

Após o início do período chuvoso (Figura 4B), verificou-se alteração no padrão de resposta dos tratamentos, com maiores valores de umidade observados nos tratamentos com cobertura morta (M100% e M50%), evidenciando maior eficiência na retenção da água após sucessivos pulsos de precipitação. Esse comportamento sugere maior capacidade de amortecimento hidrológico

promovida pela cobertura morta, em concordância com os resultados observados por Abrantes et al. (2018).

O modelo linear misto (Tabela 1) indicou efeito significativo do tratamento, do período hidrológico e da interação tratamento × período sobre a umidade superficial do solo ($p < 0,001$), demonstrando que a resposta hidrológica das estratégias de restauração variou sazonalmente. Esse resultado indica que a eficiência dos manejos não foi constante ao longo do período monitorado, apresentando comportamento distinto entre as condições seca e úmida.

Tabela 1- Efeito dos tratamentos de restauração, período hidrológico e interação tratamento × período sobre a umidade superficial do solo (0-0.20 m).

Fonte de variação	GL (num)	GL (den.)	F	p-valor	Significância
Tratamento	4	1084	139,43	<0,001	p < 0,001
Período hidrológico	1	271	37,97	<0,001	p < 0,001
Tratamento × período	4	1084	25,14	<0,01	p < 0,001

GL = graus de liberdade; O período hidrológico corresponde aos períodos seco (antes de janeiro de 2024) e úmido (após janeiro de 2024).

A interação significativa entre tratamento e período hidrológico indica que o desempenho das estratégias de restauração foi dependente da sazonalidade, com alterações no padrão de retenção hídrica entre os períodos seco e úmido.

Os eventos de escoamento superficial (Tabela 2) ocorreram predominantemente sob condições de maior armazenamento hídrico antecedente, sendo observados valores médios de umidade do solo superiores a aproximadamente 0,22 $m^3\ m^{-3}$ e precipitação acumulada antecedente de até 82 mm nos sete dias anteriores ao evento. Entretanto, a geração do escoamento mostrou-se sensível também do tratamento aplicado.

Tabela 2- Escoamento superficial (mm) e perda de solo (t ha^{-1}) observados em eventos monitorados sob diferentes estratégias de restauração produtiva em encosta degradada do semiárido.

	SD	PF 100%	PF+M50%	M100%	M50%	SD	PF 100%	PF+M50%	M100%	M50%
Trat./ Data	Escoamento					Perda de Solo				
28/01/2024	0,64	0,48	0,23	0,06	0,20	0,17	0,13	0,07	0,04	0,05
01/03/2024	3,16	2,12	2,06	1,02	1,78	0,24	0,19	0,07	0,01	0,03
04/03/2024	5,06	3,39	3,30	1,62	2,85	0,38	0,30	0,11	0,02	0,05
14/03/2024	0,38	0,29	0	0	0	0,10	0,08	0	0	0

O evento de 04 de março de 2024 apresentou as maiores respostas hidrossedimentológicas, coincidindo com maior precipitação acumulada antecedente (82,1 mm) e maior umidade média do solo (0,256 $m^3\ m^{-3}$), sugerindo forte influência das condições antecedentes sobre a resposta hidrológica das parcelas.

No evento de 14 de março de 2024, apesar da manutenção de valores relativamente elevados de umidade antecedente do solo, os tratamentos com cobertura superficial (PF+M50%, M100% e M50%) não apresentaram escoamento superficial. Em contraste, SD e PF100% ainda apresentaram resposta hidrológica, evidenciando maior conectividade do fluxo superficial. De modo geral, os tratamentos com cobertura morta apresentaram maior eficiência na mitigação dos processos hidrossedimentológicos, reduzindo em até 68% o escoamento superficial e 95% a perda de solo em relação ao solo descoberto no evento de maior resposta hidrológica (04/03/2024).

Em geral, a elevada eficiência dos tratamentos com cobertura morta, particularmente M100%, na redução do escoamento superficial e da perda de solo corrobora Lima et al. (2020), que observaram redução expressiva dos processos erosivos em superfícies protegidas por cobertura vegetal e morta no semiárido. Esse comportamento é atribuído ao amortecimento do impacto das gotas de chuva e à redução do selamento superficial do solo.

CONCLUSÕES

As estratégias de restauração produtiva influenciaram significativamente a dinâmica da umidade do solo, o escoamento superficial e a perda de solo em encosta degradada do semiárido, apresentando respostas distintas entre os períodos seco e úmido. Os tratamentos com palma forrageira (PF100%) favoreceram maior persistência da umidade do solo durante a estiagem, enquanto os tratamentos com cobertura morta, especialmente M100%, apresentaram maior eficiência na redução do escoamento superficial e da perda de solo após os eventos pluviométricos. A interação significativa entre tratamento e período hidrológico evidenciou que a eficiência das estratégias de restauração variou sazonalmente, indicando mecanismos complementares de resposta hidrológica. Os resultados sugerem que o uso combinado de práticas de restauração produtiva, integrando palma forrageira e cobertura superficial do solo, apresenta potencial para aumentar a resiliência hidrológica e reduzir a vulnerabilidade erosiva de encostas degradadas no semiárido.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), à FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - BFP-0092-5.03/24), ao

CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 200278/2026-6) e à Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA) pelo apoio concedido.

REFERÊNCIAS

ABRANTES, J. R. C. B.; PRATS, S. A.; KEIZER, J. J.; DE LIMA, J. L. M. P. Effectiveness of the application of rice straw mulching strips in reducing runoff and soil loss: laboratory soil flume experiments under simulated rainfall. *Soil and Tillage Research*, v. 180, p. 238-249, 2018.

ALMEIDA, T. A. B.; MONTENEGRO, A. A. A.; MACKAY, R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COELHO, V. H. R.; CARVALHO, A. A.; SILVA, T. G. F. Hydrogeological trends in an alluvial valley in the Brazilian semiarid: impacts of observed climate variables change and exploitation on groundwater availability and salinity. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 53, p. 101784, 2024.

CANTALICE, J. R. B.; NUNES, E. O. S.; CAVALCANTE, D. M.; BARBOSA, B.; BARROS JUNIOR, G.; GUERRA, S. M. S.; ROLIM NETO, F. C. Vegetative-hydraulic parameters generated by agricultural crops for laminar flows under a semi-arid environment of Pernambuco, Brazil. *Ecological Indicators*, v. 106, p. 105496, 2019.

COGO, N. P. Uma contribuição à metodologia de estudo das perdas por erosão em condições de chuva natural: I. Sugestões gerais, medição do volume, amostragem e quantificação de solo e água da enxurrada (1ª aproximação). *In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO*, 2., 1978, Passo Fundo. Anais [...]. Passo Fundo: EMBRAPA/CNPT, 1978. p. 75–98.

LIMA, C. A.; MONTENEGRO, A. A. A.; DE LIMA, J. L. M. P.; ALMEIDA, T. A. B.; SANTOS, J. C. N. Uso de coberturas alternativas do solo para o controle das perdas de solo em regiões semiáridas. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 3, p. 531-542, 2020.

MEDEIROS, A. S.; SANTOS, M. L.; FONTANA, A.; BALIEIRO, F. C.; MONTEIRO, L. C.; RODRIGUES, R. A. R.; MAIA, S. M. F. Different land uses in the Brazilian semi-arid: impacts and drivers on organic matter fractions and soil carbon. *Catena*, v. 266, p. 109922, 2026.

MONTENEGRO, A. A. A.; RAGAB, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. *Hydrological Processes*, v. 24, n. 19, p. 2705-2723, 2010.

MONTENEGRO, A. A. A.; LOPES, I.; CARVALHO, A. A.; DE LIMA, J. L. M. P.; SOUZA, T. E. M. S.; ARAÚJO, H. L.; LINS, F. A. C.; ALMEIDA, T. A. B.; MONTENEGRO, H. G. L. A. Spatio temporal soil moisture dynamics and runoff under different soil cover conditions in a semiarid representative basin in Brazil. *Advances in Geosciences*, v. 48, p. 19-30, 2019.

OLIVEIRA, F. G. G.; AMORIM, J. S.; DOMINGUES, G. F.; BENTO, N. L.; RODRIGUES, A. F. Optimizing reforestation for soil conservation in semi-arid landscapes: a heuristic-based spatial planning framework. *Journal of Environmental Management*, v. 404, p. 129374, 2026.

RIQUETTI, N. B.; MELLO, C. R.; LEANDRO, D.; GUZMAN, J. A.; BESKOW, S. Assessment of the soil-erosion-sediment for sustainable development of South America. *Journal of Environmental Management*, v. 321, p. 115933, 2022.

SOUZA, T. E. M. S.; SOUZA, E. R.; MONTENEGRO, A. A. A.; BAYABIL, H. Could forage palm and stone barrier be as effective as native vegetation in controlling runoff and erosion in the Brazilian semiarid region? *Agronomy*, v. 13, n. 12, p. 3026, 2023.