

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

VALIDAÇÃO DE PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO DE UMIDADE DO SOLO PARA A BACIA HIDROGRAFICA DO RIO PAJEÚ.

Daniela Maria Fernandes Tavares¹; Maria Eduarda Ferreira da Silva Carvalho²; Suzana Maria Gico Lima Montenegro³ & Alfredo Ribeiro Neto⁴

Abstract: Soil moisture is a key variable for understanding the hydrological cycle and ecosystem functioning, especially in semiarid regions. Remote sensing has emerged as an efficient alternative to in situ measurements, particularly in areas with low station density. This study aims to evaluate the performance of five satellite-based soil moisture products (SMAP 9 km, SMAP 1 km, SMOS BEC, SMOS CATDS, and ESA CCI) in the Pajeú River Basin, located in the semiarid region of Pernambuco, Brazil, using in situ data from CEMADEN from 2015 to 2019 as reference. The evaluation was based on Pearson Correlation (r) and Root Mean Square Error (RMSE) metrics. The results showed variability in the performance of the products among the analyzed stations, with Tuparetama standing out as the best-performing site. In this location, SMAP 9 km ($r = 0.697$; RMSE = 0.044) and SMOS CATDS ($r = 0.700$; RMSE = 0.056) demonstrated the most consistent results. Time series and scatterplot analyses confirmed the capability of these products to represent the dynamics of soil moisture in the region. The findings highlight the potential of remote sensing products to support hydrological monitoring and water resource management in semiarid environments.

Resumo: A umidade do solo é uma variável essencial para o entendimento do ciclo hidrológico e o funcionamento de ecossistemas, sendo fundamental em regiões semiáridas. O monitoramento por sensoriamento remoto tornou-se uma alternativa eficiente às medições in situ, especialmente em áreas com baixa densidade de estações. Este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de cinco produtos de umidade do solo por satélite (SMAP 9 km, SMAP 1 km, SMOS BEC, SMOS CATDS e ESA CCI) na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú, localizada no semiárido pernambucano, utilizando como referência dados in situ do CEMADEN no período de 2015 a 2019. As comparações foram realizadas com base nas métricas estatísticas de Correlação de Pearson (r) e Erro Quadrático Médio (RMSE). Os resultados indicaram variabilidade no desempenho dos produtos entre as estações analisadas, com destaque para a estação Tuparetama, onde os produtos SMAP 9 km ($r = 0,697$; RMSE = 0,044) e SMOS CATDS ($r = 0,700$; RMSE = 0,056) apresentaram os melhores desempenhos. As análises temporais e de dispersão confirmam a capacidade desses produtos em representar a dinâmica da umidade do solo na região. Os achados ressaltam o potencial do uso de dados de sensoriamento remoto no monitoramento hidrológico em regiões semiáridas, contribuindo para a gestão de recursos hídricos em contextos de escassez.

Palavras-Chave – Umidade do solo, Sensoriamento Remoto, Validação.

1) Universidade Federal de Pernambuco. Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Recife, PE. (83) 9 99961252. E-mail: daniela.fernandes@ufpe.br

2) Universidade Federal de Pernambuco. Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Recife, PE. (83) 987329645. E-mail: mariaeduarda.fsc@hotmail.com

3) Universidade Federal de Pernambuco. Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Recife, PE. (83)9 96352382. E-mail: alfredo.ribeiro@ufpe.br

4) Universidade Federal de Pernambuco. Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Recife, PE. E-mail: suzanam.ufpe@gmail.com

INTRODUÇÃO

A umidade do solo é um componente fundamental do ciclo hidrológico, reconhecida por desempenhar um papel chave no balanço de massa e energia entre o solo e a atmosfera terrestre. Sua relevância tem sido amplamente destacada por diversos estudos científicos ao redor do mundo (Corradini et al., 2014; Seneviratne et al., 2010). Essa importância se deve ao fato de a umidade do solo estar diretamente ou indiretamente relacionada a diversos processos ambientais, como o escoamento superficial, a recarga de aquíferos e o funcionamento de ecossistemas terrestres (Morelo et al., 2016).

A umidade do solo pode ser obtida por meio de medições *in situ*, que, embora apresentem alta precisão, possuem cobertura espacial limitada e custos elevados, especialmente quando aplicadas a grandes áreas (Kerr et al., 2007). Como alternativa, o sensoriamento remoto tem se consolidado como uma ferramenta eficiente para o monitoramento da umidade do solo em escala regional e global. Com o avanço tecnológico, diferentes sensores a bordo de satélites têm sido utilizados para estimar a umidade do solo, variando em termos de resolução espacial, temporal e radiométrica. Essa abordagem tem se mostrado mais acessível, escalável e operacionalmente viável em regiões com baixa densidade de estações terrestres (Han et al., 2023, Wagner et al., 2007)

Neste estudo, foram avaliados cinco produtos de umidade do solo provenientes de satélites: o SMAP 9 km, produto global diário com alta resolução espacial obtido por radiometria em banda L; o SMAP 1 km, derivado por downscaling com o uso de dados MODIS para refinar a resolução espacial; o SMOS BEC, disponibilizado pelo Barcelona Expert Center, baseado em dados filtrados do produto de Nível 2 da ESA; o SMOS CATDS, fornecido pelo Centre Aval de Traitement des Données SMOS, com ampla cobertura temporal e padronização internacional; e o ESA CCI, produto combinado que integra observações de múltiplos sensores ativos e passivos, com o objetivo de fornecer uma série temporal global e robusta de umidade do solo (Fang et al., 2014, Munoz-Sabater et al., 2016, Romano et al., 2014)

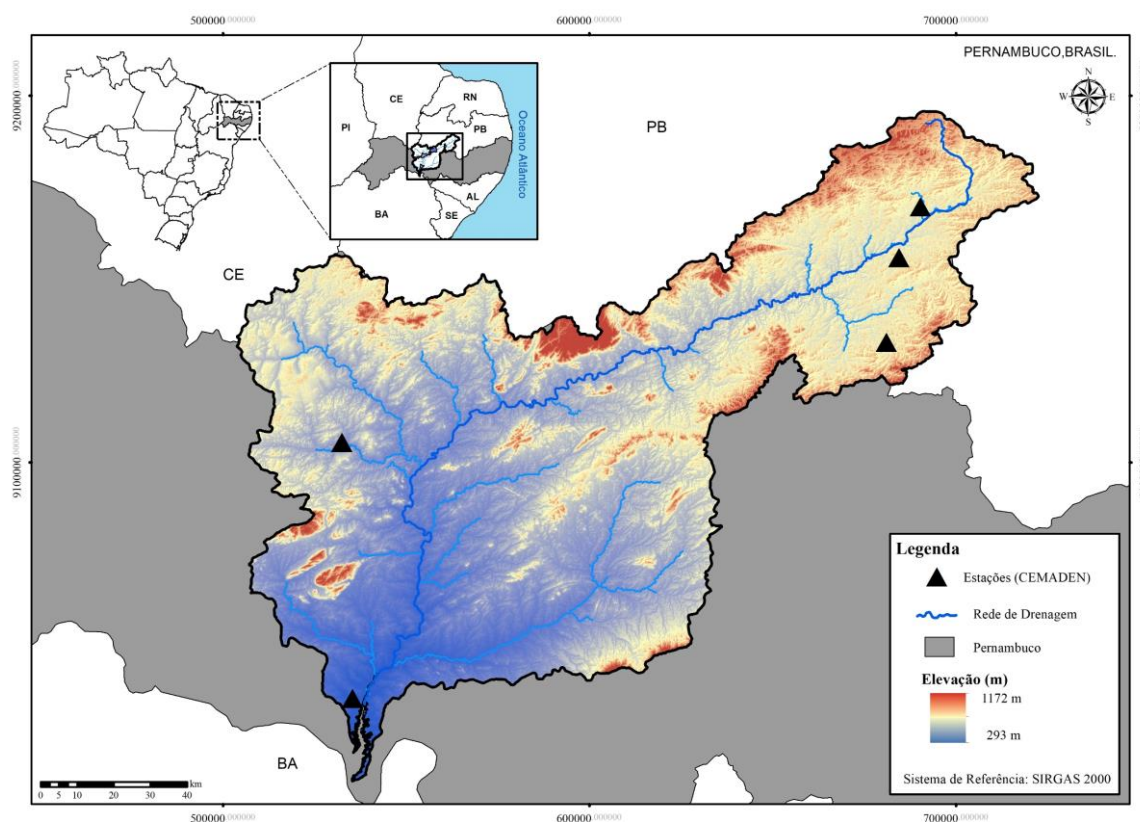
Diante desse contexto, o objetivo deste estudo é avaliar o desempenho de cinco produtos de satélite para estimativa da umidade do solo superficial, comparando-os com dados observados *in situ* em cinco estações localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú, no estado de Pernambuco. A análise busca verificar a capacidade desses produtos em representar a variabilidade temporal da umidade do solo na região semiárida, por meio de métricas estatísticas como o Erro Quadrático Médio (RMSE) e o coeficiente de correlação de Pearson (r), contribuindo para o avanço no uso de dados remotos no monitoramento hidrológico em áreas com baixa densidade de estações terrestres.

METODOLOGIA

Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú está localizada na região central do estado de Pernambuco, integrando a Região Hidrográfica do Médio São Francisco. Suas coordenadas geográficas aproximadas variam entre 7°16'20" e 8°56'01" de latitude sul e 36°59'00" e 38°57'45" de longitude oeste. Inserida na região fisiográfica do Sertão Pernambucano, a bacia faz limite ao norte com os estados do Ceará e da Paraíba; ao sul, com o Grupo de Bacias de Rios Interiores – GI3 (UP22) e com a Bacia do Rio Moxotó (UP8); a Leste, novamente com o estado da Paraíba e com a Bacia do Rio Moxotó; e a oeste, com a Bacia do Rio Terra Nova e com o Grupo GI4 de pequenos rios interiores (UP23), conforme definição do Plano Estadual de Recursos Hídricos (Pernambuco, 2006).

Figura 1 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Pajeú e das estações de monitoramento.



Dados In Situ

A validação dos produtos de umidade do solo obtidos por satélite foi realizada por meio da comparação com dados in situ provenientes da rede de monitoramento do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). Essa rede cobre predominantemente o semiárido brasileiro e utiliza sensores do modelo EC-5, da Decagon Devices (EUA), instalados em diferentes profundidades (10, 20, 30 e 40 cm), com precisão de $0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Os sensores operam em resolução horária, mas para este estudo os dados foram agregados em escala diária, com foco na profundidade de 10 cm, a mais próxima da superfície e mais compatível com a informação obtida com os sensores de micro-ondas dos satélites. Para precipitação também foram utilizados os dados disponíveis do CEMADEN em uma resolução temporal horária (Zeri *et al.*, 2018).

Foram selecionadas cinco estações (Igaraci, Itacuruba, Mirandiba, São José do Egito e Tuparetama) localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú, no estado de Pernambuco, considerando sua representatividade regional e a disponibilidade de dados consistentes. A série temporal analisada abrange o período de 2015 a 2019, contemplando cinco anos de monitoramento contínuo.

Produtos de Sensoriamento Remoto

Foram utilizados neste estudo cinco produtos satelitais de umidade do solo, todos avaliados no período de 2015 a 2019, tendo como base comparativa os dados in situ provenientes da rede de monitoramento do CEMADEN.

O produto SMAP L3 9 km (SPL3SMP_E, Versão 2) fornece estimativas globais diárias de umidade do solo superficial (0–5 cm, em m^3/m^3), derivadas do radiômetro de banda L (1,41 GHz) a

bordo do satélite SMAP (Soil Moisture Active Passive). Os dados são disponibilizados na grade EASE-Grid 2.0, com resolução espacial de 9 km, e são processados por meio da técnica de interpolação Backus-Gilbert aplicada às temperaturas de brilho dos produtos de Nível 1. As estimativas ascendentes e descendentes são processadas separadamente, resultando em composições diárias amplamente utilizadas em estudos hidrológicos, especialmente em regiões semiáridas (Duarte et al., 2014).

O produto de umidade do solo SMAP-Derived 1 km é resultado da aplicação de um algoritmo de downscaling que combina os dados do radiômetro L-band do SMAP com a temperatura da superfície terrestre obtida pelo sensor MODIS. O algoritmo utiliza como base o produto SMAP Enhanced L2 (9 km) para refinar a resolução espacial e gerar estimativas mais detalhadas. Este produto foi validado com dados de redes densas de monitoramento representando diferentes tipos de cobertura do solo ao redor do mundo.

O produto SMOS BEC, fornecido pelo Barcelona Expert Center, apresenta estimativas de umidade do solo no formato L3, com resolução espacial de 25 km e temporal diária. Os dados são derivados do produto de Nível 2 (UDP) da ESA e são disponibilizados gratuitamente no site oficial (<http://cp34-bec.cmima.csic.es/data/data-access/>). Durante o processamento, foram aplicados filtros de qualidade que eliminaram estimativas negativas e registros com índice de qualidade (DQI) superior a 0,07 (Kerr et al., 2010).

O produto SMOS-CATDS L3, processado pelo Centre Aval de Traitement des Données SMOS (CATDS), fornece estimativas globais de umidade do solo com resolução espacial de 25 km e diferentes resoluções temporais (1, 3, 10 dias ou mensal), no formato de Nível 3 (L3). Este produto foi selecionado por sua ampla cobertura temporal, padronização internacional e uso consolidado em validações hidrológicas.

Por fim, o produto ESA CCI Soil Moisture, pertencente à Climate Change Initiative (CCI) da ESA, oferece uma série temporal de longo prazo de estimativas globais de umidade do solo superficial (em m^3/m^3), com resolução espacial de 25 km. A versão utilizada neste estudo foi a CCI SM v07.1 Combined Product, que integra dados de 17 sensores ativos e passivos, combinando-os por meio de uma estrutura de fusão de dados (Dorigo et al., 2017). Essa abordagem visa gerar estimativas mais robustas e consistentes, sendo amplamente aplicada em estudos climáticos e ambientais.

Validação dos Produtos de Sensoriamento Remoto

A validação estatística dos produtos de umidade do solo obtidos por satélite é fundamental para avaliar sua precisão e utilidade em aplicações hidrológicas e ambientais. Esse processo consiste na comparação entre os dados dos produtos de satélite e as medições in situ, utilizando métricas como o Erro Quadrático Médio (RMSE) e o coeficiente de correlação de Pearson (r). Embora a validação ideal envolva longas séries temporais, esta análise apresenta uma avaliação preliminar baseada em séries diárias de cinco estações localizadas no semiárido brasileiro. O objetivo é verificar, de forma inicial, a capacidade dos produtos de satélite em representar a variabilidade da umidade do solo observada, como parte do processo de validação em andamento no contexto de uma pesquisa em desenvolvimento.

Tabela 1 – Métricas de validação.

Métricas	Intervalo de Valores	Valores Ideais
Correlação de Pearson (r)	[-1, 1]	1
Root Mean Square Error (RMSE)	[0, +∞ [0

RESULTADOS

Neste estudo, foram analisadas as métricas estatísticas correlação de Pearson (r) e Erro Quadrático Médio (RMSE) para avaliar o desempenho de cinco produtos de umidade do solo por satélite, em comparação com dados observados in situ em cinco estações localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú. A análise teve como objetivo verificar a capacidade desses produtos em representar, de forma adequada, a variabilidade temporal da umidade do solo superficial na região semiárida.

A Tabela 2 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson (r) e os valores de Erro Quadrático Médio (RMSE) entre os dados observados in situ (CEMADEN) e os cinco produtos de umidade do solo provenientes de sensoriamento remoto. De forma geral, observa-se uma variação considerável no desempenho dos produtos entre as diferentes estações. Dentre elas, destaca-se a estação Tuparetama, que apresentou os melhores resultados em termos combinados de alta correlação e baixo RMSE em diversos produtos, com destaque para o produto SMOS CATDS ($r = 0.700$; $RMSE = 0.056$) e SMAP 9 km ($r = 0.697$; $RMSE = 0.044$). Esse comportamento indica que, para essa localidade, os produtos satelitais analisados foram capazes de representar de maneira mais adequada a variabilidade da umidade do solo observada, tanto em tendência quanto em magnitude.

A estação Mirandiba também apresentou desempenho satisfatório, especialmente com o produto ESA CCI ($r = 0.758$), embora com um RMSE mais elevado (0.157). Por outro lado, em estações como Igaraci e São José do Egito, observaram-se resultados menos expressivos, com maior dispersão nos valores de correlação e erros mais elevados, sugerindo a influência de características locais na qualidade da estimativa por sensoriamento remoto.

Tabela 2 – Correlação de Pearson e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE).

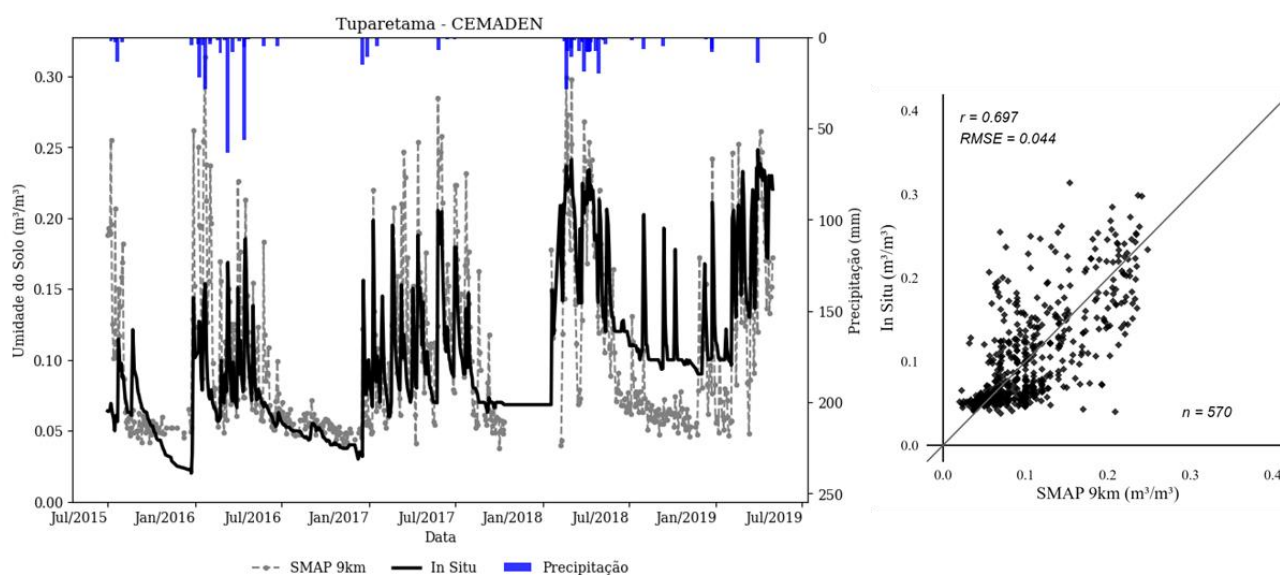
Estação	SMAP 9km		SMAP 1km		SMOS BEC		SMOS CATDS		ESA	
	r	RMSE (m ³ /m ³)	r	RMSE (m ³ /m ³)	r	RMSE (m ³ /m ³)	r	RMSE (m ³ /m ³)	r	RMSE (m ³ /m ³)
Igaraci	0.449	0.094	0.505	0.090	0.529	0.072	-0.062	0.083	0.322	0.250
Itacuruba	0.455	0.037	0.312	0.047	0.405	0.176	0.340	0.182	0.335	0.061
Mirandiba	0.644	0.074	0.471	0.108	0.670	0.058	0.639	0.071	0.758	0.157
São José do Egito	0.734	0.095	0.717	0.116	0.630	0.084	0.711	0.084	-0.023	0.193
Tuparetama	0.697	0.044	0.017	0.078	0.663	0.054	0.700	0.056	0.796	0.094

Além disso, a análise interprodutos evidencia diferenças relevantes no desempenho dos sensores. O SMAP 9 km demonstrou desempenho consistente, com correlações superiores a 0.64 em três das cinco estações, e RMSEs abaixo de $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$, exceto em São José do Egito. Por outro lado, o SMAP 1 km, apesar de sua resolução aprimorada por downscaling, apresentou resultados heterogêneos, com baixa correlação em Tuparetama ($r = 0.017$), sugerindo limitações do algoritmo em certas condições de superfície.

O SMOS BEC e o SMOS CATDS mostraram-se mais estáveis em termos de desempenho, com o CATDS se destacando em Tuparetama e São José do Egito, enquanto o BEC obteve bons resultados especialmente em Mirandiba ($r = 0.670$). O ESA CCI, por sua vez, apresentou o maior coeficiente de correlação da análise ($r = 0.796$ em Tuparetama), reforçando sua robustez em contextos semiáridos, apesar de apresentar valores de RMSE mais elevados em algumas estações.

Com base nos melhores resultados de correlação e RMSE, os produtos SMAP 9 km e SMOS CATDS foram selecionados para análise na estação de Tuparetama. As figuras 2 e 3 a seguir apresentam a comparação temporal com os dados observados, os eventos de precipitação e os gráficos de dispersão correspondentes.

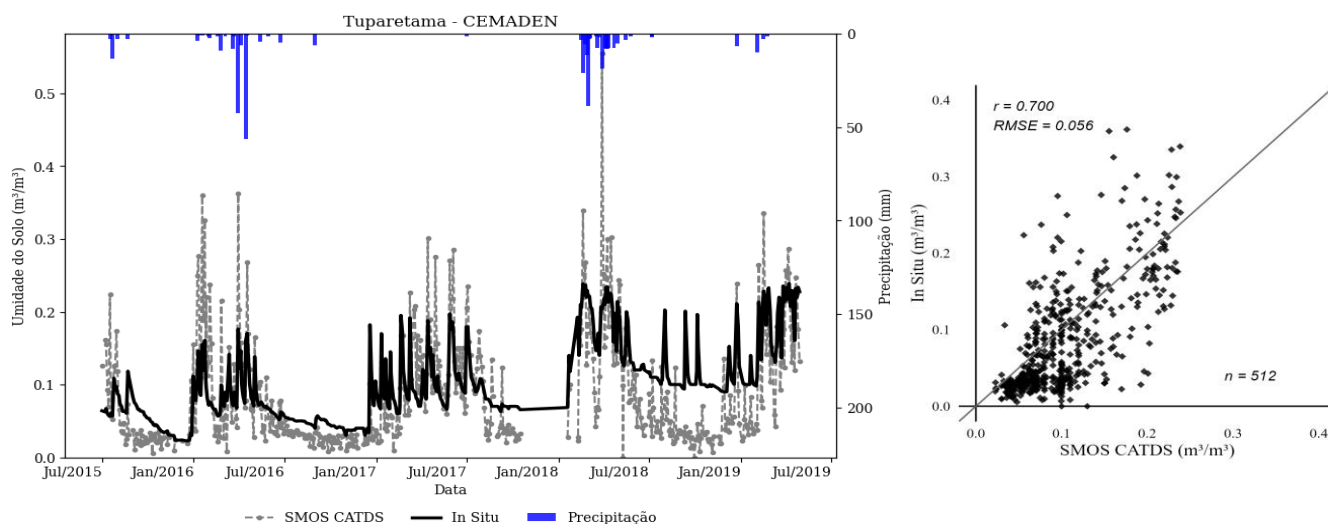
Figura 2 – Umidade do solo (SMAP 9km) e in situ para a estação de Tuparetama.



A Figura 2 apresenta a comparação entre os dados observados de umidade do solo e o produto satelital SMAP 9 km, ao longo do período de julho de 2015 a julho de 2019, para a estação de Tuparetama. A série temporal revela uma boa correspondência nas flutuações sazonais da umidade do solo, especialmente nos períodos úmidos, evidenciando a resposta dos dados satelitais aos eventos de precipitação. Embora existam momentos de subestimativa pelo SMAP o padrão geral das variações é bem representado. O gráfico de dispersão à direita confirma a consistência da estimativa do produto SMAP 9 km, com um coeficiente de correlação de $r = 0.697$ e um RMSE de $0.044 \text{ m}^3/\text{m}^3$, indicando um bom ajuste linear entre os dados estimados e observados. A dispersão dos pontos é relativamente concentrada ao longo da reta 1:1, com uma leve tendência à subestimação em valores mais altos de umidade. Esses resultados sugerem que o SMAP 9 km é eficiente em captar a variabilidade da umidade do solo superficial em Tuparetama, sendo um dos produtos mais promissores analisado.

Duarte et al. (2024) identificam o SMAP como uma das ferramentas mais relevantes e avançadas para o monitoramento da umidade do solo em ecossistemas semiáridos, destacando seu papel fundamental na geração de produtos de umidade do solo em diversas escalas, especialmente quando integrado com técnicas de *downscaling* e *machine learning*.

Figura 3 - Umidade do solo (SMOS CATDS) e in situ para a estação de Tuparetama.



A Figura 3 apresenta a análise para o produto SMOS CATDS na estação de Tuparetama, também no período de 2015 a 2019. Observa-se que a série temporal do SMOS (linha cinza tracejada) acompanha razoavelmente a tendência dos dados in situ (linha preta), captando os aumentos nos períodos chuvosos e os decréscimos nas estações secas. Embora o produto apresente maior variabilidade e dispersão em alguns trechos da série, o comportamento sazonal da umidade do solo é bem representado de forma geral. No gráfico de dispersão, a correlação entre os dados estimados e observados é de $r = 0.700$, com um RMSE de $0.056 \text{ m}^3/\text{m}^3$, valores que indicam boa concordância estatística. Assim como no SMAP, há uma tendência de subestimação em valores elevados de umidade, porém o SMOS CATDS mostra uma resposta consistente às flutuações da umidade superficial do solo. Em comparação com os demais produtos avaliados, este apresentou um dos melhores desempenhos estatísticos na estação de Tuparetama.

Souza et al. (2018) concluíram que os dados do SMOS se ajustaram bem aos dados in situ, com melhor desempenho em regiões semiáridas, e foram capazes de capturar satisfatoriamente a variação temporal e a sazonalidade da umidade do solo. Os resultados satisfatórios encorajam o uso do SMOS para o monitoramento da seca, especialmente em grandes áreas como o Nordeste do Brasil.

Os produtos SMAP 9 km e SMOS CATDS apresentaram os melhores desempenhos entre os avaliados para a estação de Tuparetama, tanto na fidelidade da série temporal quanto nos indicadores estatísticos. Esses resultados reforçam o potencial de uso desses produtos para monitoramento da umidade do solo na região do semiárido, especialmente em áreas com infraestrutura de medição limitada.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, foram avaliados cinco produtos de umidade do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú, no período de 2015 a 2019, utilizando dados in situ da rede do CEMADEN. A aplicação das métricas estatísticas correlação de Pearson (r) e Erro Quadrático Médio (RMSE) permitiu identificar variações de desempenho entre os produtos e entre as estações analisadas. Dentre elas, a

estação de Tuparetama apresentou os melhores resultados, destacando-se pela melhor concordância entre os dados observados e os estimados.

Os produtos SMAP 9 km e SMOS CATDS foram os que apresentaram os desempenhos mais consistentes, representando adequadamente a variabilidade temporal da umidade do solo superficial. Os achados reforçam o potencial de uso de produtos de satélite como ferramenta de monitoramento em regiões semiáridas, especialmente em áreas com cobertura limitada de estações terrestres. A continuidade da pesquisa, com a expansão espacial e temporal da validação e o uso de métricas adicionais, poderá contribuir significativamente para ações de planejamento, gestão de recursos hídricos e adaptação às variações climáticas na região do semiárido.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento FACEPE pelas bolsas de doutorado concedidas, proporcionando dessa forma suporte para o desenvolvimento do avanço científico-tecnológico na área do presente estudo. Ao CNPq pela bolsa de Produtividade em Pesquisa – PQ da quarta autora (processo n. 313392/2020-0) e quinto autor, pelo financiamento do projeto Universal (Chamada Universal – Processo n. 431980/2018-7) e pelo INCT ONSeadapta CNPq Proc. 406919/2022-4.

REFERÊNCIAS

- Chen, Y., Yang, K., Qin, J., Cui, Q., Lu, H., La, Z., Han, M., Tang, W., 2017. Evaluation of SMAP, SMOS, and AMSR2 soil moisture retrievals against observations from two networks on the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res. Atmos.* 122, 5780–5792.
- Corradini, C. Soil moisture in the development of hydrological processes and its determination at different spatial scales. *J. Hydrol.* 2014, 516, 1–5.
- Dorigo, W., Wagner, W., Albergel, C., Albrecht, F., Balsamo, G., Brocca, L., Chung, D., Ertl, M., Forkel, M., Gruber, A., 2017. ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *Remote Sens. Environ.* 203, 185–215.
- Duarte, E.; Hernandez, A. (2024). A Review on Soil Moisture Dynamics Monitoring in Semi-Arid Ecosystems: Methods, Techniques, and Tools Applied at Different Scales. *Appl. Sci.*, 14, 7677. DOI: 10.3390/app14177677.1
- Fang, B.; Lakshmi, V. Soil moisture at watershed scale: Remote sensing techniques. *J. Hydrol.* 2014, 516, 258–272.
- Hajj, M. el, Baghdadi, N., Zribi, M., Rodríguez-Fernández, N., Wigneron, J.P., Al-Yaari, A., al Bitar, A., Albergel, C., Calvet, J.C., 2018. Evaluation of SMOS, SMAP, ASCAT and Sentinel-1 soil moisture products at sites in Southwestern France. *Rem. Sens.* 10, 1–17.
- Han, Q.; Zeng, Y.; Zhang, L.; Cira, C.-I.; Prikaziuk, E.; Duan, T.; Wang, C.; Szabó, B.; Manfreda, S.; Zhuang, R.; et al. Ensemble of optimised machine learning algorithms for predicting surface soil moisture content at a global scale. *Geosci. Model Dev.* 2023, 16, 5825–5845.

Kerr, Y.; Waldteufel, P.; Wigneron, J.P.; Delwart, S.; Cabot, F.; Boutin, J.; Escorihuela, M.J.; Font, J.; Reul, N.; Gruhier, C.; et al. The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle. *Proc. IEEE* 2010, 98, 666–687.

Kerr, Y.H. Soil moisture from space: Where are we? *Hydrogeol. J.* 2007, 15, 117–120.

Molero, B.; Merlina, O.; Malbêteau, Y.; Al Bitar, A.; Cabot, F.; Stefan, V.; Kerr, Y.; Bacona, S.; Cosh, M.H.; Bindlish, R.; et al. SMOS disaggregated soil moisture product at 1 km resolution: Processor overview and first validation results. *Remote Sens. Environ.* 2016, 180, 361–376.

Muñoz-Sabater, J.; AlBitar, A.; Brocca, L. Soil moisture retrievals based on active and passive microwave data: State-of-the-art and operational applications. In *Satellite Soil Moisture Retrievals: Techniques and Applications*; Petropoulos, G.P., Srivastava, P., Kerr, Y., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2016; Volume 18, pp. 351–378.

PERNAMBUCO. (2006). Atlas de bacias hidrográficas de Pernambuco. Recife: Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente, 2006.

Romano, N. Soil moisture at local scale: Measurements and simulations. *J. Hydrol.* 2014, 516, 6–20. Seneviratne, S.I.; Corti, T.; Davin, E.L.; Hirschi, M.; Jaeger, E.B.; Lehner, I.; Orlowsky, B.; Teuling, A.J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Sci. Rev.* 2010, 99, 125–161.

Wagner, W.; Blöschl, G.; Pampaloni, P.; Calvet, J.C.; Bizzarri, B.; Wigneron, J.P.; Kerr, Y. Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications. *Hydrol. Res.* 2007, 38, 1–20.

Zhang, R., Li, L., Zhang, Y., Huang, F., Li, J., Liu, W., Mao, T., Xiong, Z., Shangguan, W., 2021. Assessment of agricultural drought using soil water deficit index based on ERA5-Land soil moisture data in four southern provinces of China. *Agriculture* 11.

Zeri, M., Alvalá, R.C.S., Carneiro, R., Cunha-Zeri, G., Costa, J.M., Spatafora, L.R., Urbano, D., Vall-Llossera, M., Marengo, J., 2018. Tools for communicating agricultural drought over the Brazilian Semi-arid using the soil moisture index. *Water* 10. <https://doi.org/10.3390/w10101421>.