MONITORAMENTO INTEGRADO DA SECA NO NORDESTE BRASILEIRO POR SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL E O POTENCIAL DA GNSS-R

Francisco Agenor Alves Marques[1]; Natália Rudorff Oliveira[2] & Paulo de Tarso Setti Júnior[3]

RESUMO - A caracterização da seca no Nordeste brasileiro exige o uso integrado de variáveis que representem o déficit pluviométrico, a condição hídrica superficial e a resposta biofísica da vegetação. Este trabalho apresenta uma revisão das principais técnicas e produtos de sensoriamento remoto orbital incluindo índices de seca multi-sensor, e com ênfase no potencial da refletometria GNSS para aumentar a frequência temporal das observações em ambientes semiáridos. São discutidas as contribuições de produtos de precipitação, temperatura da superfície continental, índices espectrais de vegetação e umidade do solo, como elo entre a seca meteorológica e a seca agrícola. Por fim, são apresentadas as vantagens e limitações da GNSS-R para a estimativa da umidade do solo, em vistas às aplicações da missão AQUAE Amazonia-1B, que será lançada em 2027. Esta missão prioriza aplicações voltadas ao diagnóstico hidrológico, à identificação de hotspots de vulnerabilidade e ao apoio à gestão de recursos hídricos, principalmente em regiões críticas como no Nordeste brasileiro.

ABSTRACT - Characterizing drought in northeastern Brazil requires the integrated use of variables representing rainfall deficit, surface water condition and vegetation response. This paper presents an enhanced methodological framework based on multisensor orbital remote sensing, emphasizing soil moisture as the link between meteorological and agricultural drought. The contributions of precipitation products, land surface temperature, spectral indices and soil moisture datasets are discussed, as well as the potential of GNSS-R reflectometry to increase the temporal frequency of observations in semi-arid environments. The proposed framework is oriented toward regional hydrological diagnosis, identification of vulnerability hotspots and support for water resources management in northeastern Brazil.

Palavras-Chave - seca; sensoriamento remoto; recursos hídricos.

[1]) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PGMET), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), Rodovia Presidente Dutra, km 39, Cachoeira Paulista – SP, CEP 12630-000, Brasil. Fone (88) 999693384. E-mail: agenoram@yahoo.com.br.
[2]) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PGMET), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), Rodovia Presidente Dutra, km 39, Cachoeira Paulista – SP, CEP 12630-000, Brasil. Fone:(12) 98158-9778. E-mail: natalia.rudorff@inpe.br.
[3]) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PGMET), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), Rodovia Presidente Dutra, km 39, Cachoeira Paulista – SP, CEP 12630-000, Brasil. Fone:(19) 99257-6024. E-mail: paulotsetti@gmail.com.

1 - INTRODUÇÃO

A seca figura entre os eventos extremos de maior relevância para o Nordeste brasileiro, sobretudo em áreas semiáridas, onde o desequilíbrio entre precipitação e demanda atmosférica impõe forte pressão sobre o solo, a vegetação e os sistemas de abastecimento. O caráter cumulativo e multiescalar do fenômeno exige que o seu monitoramento considere não apenas o déficit de chuva, mas também a propagação do estresse hídrico ao longo do sistema solo-planta-atmosfera.

Nesse contexto, o sensoriamento remoto orbital oferece uma base observacional particularmente valiosa. Produtos de precipitação, temperatura da superfície, índices espectrais e umidade do solo permitem acompanhar, com diferentes resoluções, a evolução espaço-temporal da seca, inclusive em regiões com baixa densidade de estações in situ. Entretanto, cada variável representa apenas uma dimensão do fenômeno, o que reforça a necessidade de integração multissensorial.

A pesquisa de doutorado em desenvolvimento no PGMET/INPE está voltada à análise e à previsão de secas extremas no Nordeste brasileiro por meio de técnicas de sensoriamento remoto, com integração de índices espectrais, umidade do solo, precipitação e modelagem preditiva. Nessa linha, a GNSS-R surge como tecnologia de interesse crescente por sua sensibilidade em banda L às propriedades dielétricas do solo e pelo potencial de ampliar a frequência temporal das observações hidrológicas. A Figura 1 apresenta a área de estudo considerada neste trabalho, com destaque para o Nordeste brasileiro e a região semiárida onde o monitoramento da seca assume maior relevância hidrológica.

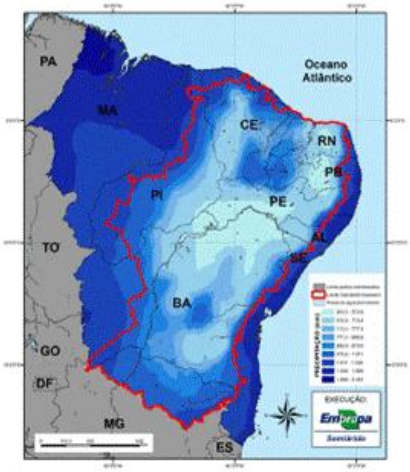


Figura 1 – Precipitação média anual no Nordeste brasileiro e delimitação do Semiárido.
Fonte: Embrapa Semiárido.

2 – FUNDAMENTAÇÃO E RELEVÂNCIA HIDROLÓGICA

O monitoramento operacional da seca depende da articulação entre variáveis que respondem em ritmos distintos. A precipitação atua como forçante atmosférico primário, a umidade do solo representa a condição hídrica superficial de resposta mais rápida, e a vegetação expressa os efeitos biofísicos do estresse hídrico com certa defasagem temporal. A temperatura da superfície, por sua vez, auxilia na interpretação das trocas de energia e do agravamento do estresse térmico-hídrico. As principais variáveis orbitais utilizadas nesse processo e suas respectivas contribuições para o diagnóstico da seca estão sintetizadas na Tabela 1.

Em ambientes semiáridos, a umidade do solo assume papel particularmente relevante, pois integra a variabilidade meteorológica recente e condiciona a resposta da vegetação, da evapotranspiração e da infiltração. Assim, a sua representação adequada favorece tanto a identificação precoce da seca quanto a interpretação mais consistente da transição entre suas fases meteorológica, agrícola e hidrológica.

Tabela 1 – Variáveis orbitais prioritárias para o monitoramento integrado da seca no Nordeste brasileiro.

Variável	Base de dados	Contribuição para o diagnóstico
Precipitação	CHIRPS; GPM/IMERG	Representa o déficit pluviométrico e a forçante atmosférica inicial.
Umidade do solo	SMAP; GNSS-R/HydroGNSS	Expressa a condição hídrica superficial e a propagação inicial do estresse.
Temperatura da superfície	MODIS/LST	Indica intensificação do estresse térmico-hídrico e alterações no balanço de energia.
Vegetação	NDVI; EVI; VCI; VHI	Representa a resposta biofísica da cobertura vegetal ao déficit hídrico.

A utilização conjunta dessas variáveis permite estruturar o monitoramento da seca como processo encadeado. Em um primeiro momento, o déficit pluviométrico reduz a reposição hídrica do sistema; em seguida, a umidade do solo responde mais diretamente a essa anomalia; por fim, a vegetação expressa o estresse de forma integrada, muitas vezes com atraso temporal. Essa sequência física justifica a adoção de indicadores compostos e o uso de abordagens multissensores. Esse encadeamento físico entre o déficit pluviométrico, a redução da umidade do solo e a resposta da vegetação pode ser visualizado na Figura 2, que sintetiza a propagação da seca no sistema solo-planta-atmosfera.

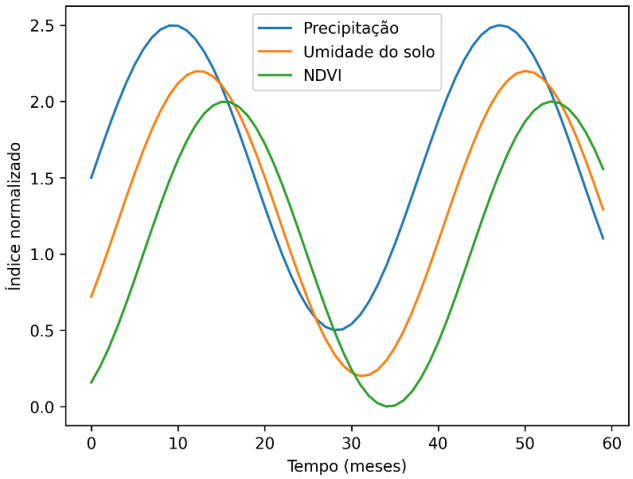


Figura 2 – Representação conceitual da propagação da seca no sistema solo–planta–atmosfera, mostrando o atraso temporal entre precipitação, umidade do solo e resposta da vegetação (NDVI). Fonte: Elaboração Própria.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta metodológica considera o Nordeste brasileiro como área de estudo, com ênfase na porção semiárida inserida no domínio da Caatinga. O fluxo de trabalho envolve a organização de séries temporais multissensores, harmonizadas em resolução espacial e temporal, seguidas de procedimentos de controle de qualidade, recorte espacial, reprojeção e padronização das grades.

Os produtos de precipitação são empregados para representar anomalias e intensidade do déficit hídrico. A umidade do solo, tratada como variável central, é obtida inicialmente por produtos consolidados de micro-ondas, em especial SMAP. A resposta biofísica do sistema é acompanhada por índices de vegetação e pela temperatura da superfície. Em etapa posterior, essas variáveis podem ser integradas em indicadores compostos de seca ou mapas de severidade para análise regional.

3.1 - Inserção do GNSS-R na proposta

A GNSS-R é incorporada como elemento inovador do sistema. O método baseia-se na análise de sinais GNSS refletidos pela superfície terrestre, cuja intensidade depende, entre outros fatores, do teor de água no solo. Em comparação aos produtos ópticos, a técnica apresenta menor sensibilidade à cobertura de nuvens; em relação aos sensores passivos tradicionais, oferece a perspectiva de maior frequência temporal, sobretudo quando associada a missões em constelação.

Na proposta aqui apresentada, a GNSS-R pode atuar em três frentes: validação cruzada com produtos de umidade do solo já consolidados; integração em indicadores compostos de seca; e aprimoramento da detecção precoce da redução da umidade superficial. A missão HydroGNSS é particularmente relevante para essa perspectiva, por orientar suas aplicações ao monitoramento

hidrológico continental. As principais aplicações e produtos esperados da metodologia proposta são sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Produtos e aplicações esperadas da metodologia proposta

Produto gerado	Escala de análise	Aplicação potencial
Mapas de anomalia	Mensal e sazonal	Diagnóstico da distribuição espacial da seca.
Séries temporais regionais	Sub-regional e estadual	Acompanhamento da evolução temporal do estresse hídrico.
Indicadores compostos	Pixel e região	Integração entre chuva, solo, temperatura e vegetação.
Hotspots de vulnerabilidade	Regional	Priorização territorial para segurança hídrica e gestão.

4 - RESULTADOS ESPERADOS E IMPLICAÇÕES

Os resultados esperados concentram-se em três frentes complementares. A primeira é a melhoria da caracterização espaço-temporal da seca por meio da leitura integrada entre chuva, umidade do solo, temperatura da superfície e vegetação. A segunda é a identificação de áreas mais sensíveis à instalação e à intensificação do estresse hídrico, com potencial para delimitação de hotspots de vulnerabilidade. A terceira refere-se ao fortalecimento de produtos geoespaciais voltados à gestão de recursos hídricos em escala regional. Em termos espaciais, a intensidade do estresse hídrico e a resposta da cobertura vegetal podem ser identificadas por produtos orbitais, como exemplificado na Figura 3.

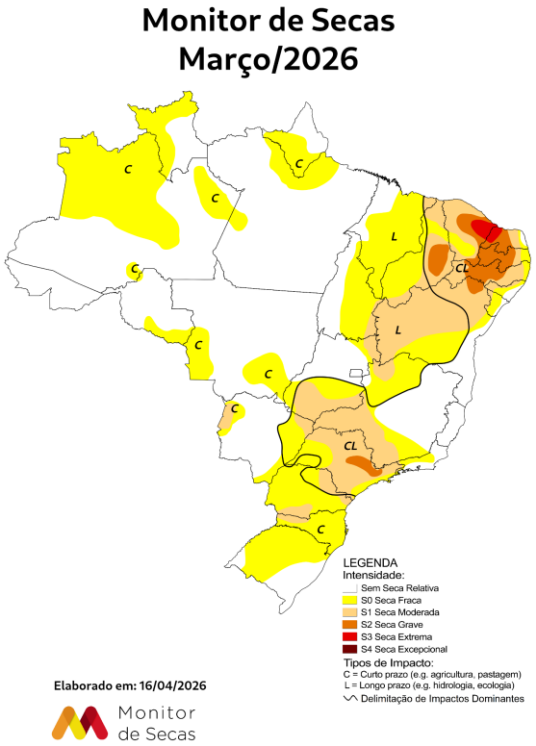


Figura 3 – Intensidade da seca no Brasil em março de 2026, conforme classificação do Monitor de Secas. Fonte: Monitor de Secas – ANA.

Ao destacar a umidade do solo como variável-chave, a proposta amplia a capacidade de diagnóstico hidrológico, favorecendo a identificação de áreas onde o estresse hídrico já se instalou, ainda que a resposta da vegetação permaneça incipiente. Isso é particularmente útil para aplicações em gestão de recursos hídricos, monitoramento de vulnerabilidade, apoio a decisões de abastecimento e priorização territorial de ações de mitigação.

Em perspectiva operacional, a geração de mapas integrados, séries temporais regionais e painéis geoespaciais pode subsidiar sistemas de acompanhamento em tempo quase real. A futura incorporação de produtos GNSS-R e de metodologias de modelagem preditiva tende a ampliar esse potencial, sobretudo para regiões onde o monitoramento convencional ainda é limitado.

Do ponto de vista institucional, a metodologia dialoga diretamente com as demandas de segurança hídrica no semiárido, uma vez que oferece base técnico-científica para interpretação de episódios secos, avaliação de persistência do estresse hídrico e suporte à tomada de decisão por órgãos gestores, defesa civil e instituições de monitoramento ambiental.

5 - DISCUSSÃO

A principal contribuição da abordagem multissensor está em representar a seca como processo integrado, e não apenas como anomalia de precipitação. Essa leitura é especialmente importante no

Nordeste brasileiro, onde a heterogeneidade de solos, coberturas vegetais e usos da terra condiciona respostas espaciais contrastantes a um mesmo episódio de déficit pluviométrico.

A GNSS-R reforça esse potencial ao acrescentar uma fonte observacional com alta frequência temporal e sensibilidade física à condição hídrica superficial. Embora existam desafios associados à rugosidade, à vegetação e à geometria de observação, a sua integração com produtos tradicionais pode representar avanço importante para o monitoramento hidrológico de regiões semiáridas.

6 - CONCLUSÕES

O monitoramento da seca no Nordeste brasileiro requer uma abordagem que combine variáveis atmosféricas, hidrológicas e biofísicas derivadas por sensoriamento remoto orbital. Entre essas variáveis, a umidade do solo se destaca por representar a conexão física entre o déficit de precipitação e a resposta da vegetação, assumindo papel central na caracterização de secas em ambientes semiáridos.

A integração entre precipitação, temperatura da superfície, índices de vegetação e umidade do solo constitui base promissora para o desenvolvimento de produtos geoespaciais aplicados ao diagnóstico e ao monitoramento hidrológico regional. Nesse cenário, a GNSS-R surge como tecnologia complementar de alto interesse, com potencial para aumentar a frequência temporal das observações e fortalecer ferramentas de segurança hídrica no Nordeste brasileiro.

O trabalho, assim, enquadra-se de forma direta no eixo Qualidade da Água, Monitoramento e Inovação Tecnológica do XVIII SRHNe, ao enfatizar o uso de sensores remotos e a construção de metodologias orientadas ao acompanhamento de secas e ao suporte à gestão de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

BOKEN, V. K. et al. (2005). Drought and water crises: science, technology and management issues. CRC Press, Boca Raton.

GAO, B. C. (1996). “NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space”. Remote Sensing of Environment, 58(3), pp. 257-266.

HODGES, E. et al. (2025). “A merged CYGNSS soil moisture product using a minimum variance estimator”. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 63, pp. 1-15.

LIU, Y. et al. (2024). “Assessing the performance of GNSS-R observations in drought monitoring: a case study in Jiangxi and Hunan, China”. Geocarto International, 39(1).

RHEE, J.; IM, J.; CARBONE, G. J. (2010). “Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data”. Remote Sensing of Environment, 114(12), pp. 2875-2887.

SETTI JR., P. T.; TABIBI, S. (2025a). “Comprehensive analysis of CYGNSS GNSS-R data for enhanced soil moisture retrieval”. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 18, pp. 663-679.

SETTI JR., P. T.; TABIBI, S. (2025b). “Enhancing soil moisture estimates through the fusion of SMAP and GNSS-R data at 3-km resolution for daily mapping”. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 18, pp. 5303-5316.

VICENTE-SERRANO, S. M. et al. (2010). “A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index”. Journal of Climate, 23, pp. 1696-1718.

WANG, L.; QU, J. J. (2007). “NMDI: a normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing”. Geophysical Research Letters, 34.

ZHANG, A.; JIA, G. (2013). “Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data”. Remote Sensing of Environment, 134, pp. 12-23.