RGe ISSN: 2177-3246

ANÁLISE DO CARBONO ORGÂNICO NO SOLO EM *DRYLANDS*[1] VIA SENSORIAMENTO REMOTO E PROXIMAL: AVANÇOS E PERSPECTIVAS A PARTIR DE ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

ANALYSIS OF SOIL ORGANIC CARBON IN DRYLANDS USING REMOTE AND PROXIMAL SENSING: ADVANCES AND PROSPECTS BASED ON A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

ANÁLISIS DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN LAS TIERRAS ÁRIDAS MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y SENSORES PROXIMALES: AVANCES Y PERSPECTIVAS A PARTIR DE UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

10.56238/revgeov17n6-060

Luciana da Luz Silva
Doutoranda em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: lucisilva.luz@gmail.com

Deorgia Tayane Mendes de Souza
Doutora em Geociências Aplicadas e Geodinâmica
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: dtmsouza@uefs.br

Washington de Jesus Sant'Anna da Franca-Rocha
Doutor em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: wrocha@uefs.br

Rodrigo Nogueira Vasconcelos
Doutor em Ecologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
E-mail: rnv@uefs.br

RESUMO
O Carbono Orgânico do Solo (COS) é fundamental para a sustentabilidade ambiental, mas, em ecossistemas semiáridos, sua dinâmica é marcada pela fragilidade. Nesse contexto, o monitoramento de caatinga é indispensável para a conservação e o planejamento agrícola. O sensoriamento remoto e o proximal surgem como alternativas eficientes para essa quantificação. Este estudo realizou uma análise bibliométrica e sistemática da literatura científica, utilizando a mineração de dados em bases de dados Scopus e Web of Science. Os dados foram processados e analisados por meio de redes de coocorrência nos softwares VOSviewer e RStudio. Os resultados indicam que, embora o Brasil disponha de estudos de impacto, o bioma Caatinga permanece sub-representado. Em contraste, China

[1] Terras secas - ambientes áridos e semiáridos

e Irã lideram a produção com forte sinergia tecnológica. Observou-se um crescimento exponencial das publicações a partir de 2015 (Ano Internacional dos Solos da FAO). Conclui-se que a evolução para modelos preditivos robustos é crucial para o manejo preciso de solos vulneráveis, diante das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Solo do Semiárido. Sensoriamento Proximal. Caatinga. Espectroscopia de Refletância. Machine Learning. Mapeamento Digital do Solo.

ABSTRACT
Soil Organic Carbon (SOC) is essential for environmental sustainability; however, in semi-arid ecosystems, its dynamics are characterised by fragility and rapid surface degradation. In this context, monitoring and mapping SOC in the Caatinga biome becomes indispensable for agricultural planning and soil conservation. The use of non-destructive techniques, such as remote and proximal sensing, emerges as an efficient alternative for this quantification. This study analysed the evolution of scientific literature on soil organic carbon in semi-arid regions, focusing on methodological trends and geoenvironmental variables. The methodology was based on data mining in the Scopus database, using structured strings to collect publications. Data were processed with the support of a thesaurus and analysed using graphs and term co-occurrence networks in VOSviewer and RStudio. The results indicate that Brazil still shows low academic expression in this field, with the Caatinga biome significantly underrepresented. In contrast, there is a strong synergy between remote and proximal techniques in studies conducted in arid regions of China and Iran. An exponential growth in publications was observed from 2015 onward, coinciding with the FAO's International Year of Soils, which boosted the global debate. It is concluded that technological advances in sensing are crucial for understanding SOC patterns in vulnerable environments, enabling more precise management strategies in the face of contemporary climate challenges.

Keywords: Caatinga. Reflectance Spectroscopy. Machine Learning. Semi-Arid. Digital Soil Mapping.

RESUMEN
El carbono orgánico del suelo (COS) es fundamental para la sostenibilidad medioambiental, pero, en los ecosistemas semiáridos, su dinámica se caracteriza por su fragilidad. En este contexto, el seguimiento de la caatinga es indispensable para la conservación y la planificación agrícola. La teledetección y la detección proximal se perfilan como alternativas eficaces para esta cuantificación. Este estudio llevó a cabo un análisis bibliométrico y sistemático de la literatura científica, utilizando la minería de datos en las bases de datos Scopus y Web of Science. Los datos se procesaron y analizaron mediante redes de coocurrencia en los programas VOSviewer y RStudio. Los resultados indican que, aunque Brasil cuenta con estudios de impacto, el bioma de la Caatinga sigue estando infrarepresentado. Por el contrario, China e Irán lideran la producción con una fuerte sinergia tecnológica. Se observó un crecimiento exponencial de las publicaciones a partir de 2015 (Año Internacional de los Suelos de la FAO). Se concluye que la evolución hacia modelos predictivos robustos es cruciais para la gestión precisa de suelos vulnerables frente al cambio climático.

Palabras clave: Suelo del Semiárido. Teledetección. Caatinga. Espectroscopia de Reflectancia. Aprendizaje Automático. Cartografía Digital del Suelo.

1 INTRODUÇÃO

O solo desempenha um papel crucial no ciclo do carbono, sendo o segundo maior reservatório terrestre desse elemento. Essa capacidade de armazenamento está intrinsecamente ligada ao sistema solo-floresta-atmosfera, que regula a concentração de matéria orgânica no solo. Diante da crescente demanda por alimentos e do uso diversificado da terra, novas técnicas têm sido implementadas para analisar atributos pedológicos, destacando-se o sensoriamento remoto (Lal, 2001; Demattê et al., 2000).

O carbono orgânico é um indicador vital da qualidade do solo, representando 58% da matéria orgânica presente. Ele é fundamental para a liberação de nutrientes para a troca de cátions, além de agregar partículas, o que melhora a estrutura do solo. Consequentemente, isso leva à redução da densidade e ao aumento da disponibilidade de água (Terra, 2007; Demattê et al., 2003; Lal, 2001; Trumbore & Camargo, 2009).

Dada a importância do solo para a manutenção da vida e do equilíbrio climático, torna-se necessária a adoção de técnicas e metodologias eficientes, especialmente as limpas e de baixo custo, a partir do sensoriamento remoto e proximal que tem sido cada vez mais utilizado em estudos do solo. Logo, é fundamental avaliar como esse processo evolutivo das pesquisas e suas perspectivas e as tendências atuais empregadas nos estudos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015). Além disso, compreender a dinâmica do carbono em biomas brasileiros, como a Caatinga, é imprescindível, dada a especificidade desses biomas (Brasil, 2022).

Assim, com o avanço das tecnologias de sensoriamento em nível orbital e terrestre, a estimativa do carbono orgânico em regiões semiáridas, como a Caatinga, impõe desafios particulares devido à heterogeneidade espacial e à influência do uso e cobertura do solo na resposta espectral do solo. Nesse contexto, o sensoriamento proximal surge como uma alternativa de alta resolução espectral, permitindo a obtenção de assinaturas espectrais detalhadas que mitigam as interferências atmosféricas e temporais dos sensores remotos.

Contudo, observa-se uma lacuna na sistematização de como tais tecnologias têm sido integradas ao monitoramento de solos em ambientes áridos e semiáridos. Diante desse cenário de expansão tecnológica, torna-se fundamental mapear a produção científica para compreender a evolução desses estudos em arcabouços teóricos robustos. Para tanto, as bases de dados bibliográficas apresentam-se como recursos indispensáveis, pois fornecem metadados essenciais, como tipo de documento, autoria e afiliação, que viabilizam a realização de análises bibliométricas e a reconstrução da trajetória da área.

Nesse contexto, a bibliometria consolidou-se como uma ferramenta poderosa para mapear a distribuição e os desdobramentos da produção científica (Thijs e Glänzel, 2010). Dentre as plataformas disponíveis, as bases SCOPUS e Web of Science destacam-se pela ampla disponibilidade de dados e

abrangência multidisciplinar, oferecendo as ferramentas necessárias para a análise rigorosa dos documentos indexados. Além da métrica quantitativa, é imprescindível verificar a dimensão do campo de estudo e situar as perspectivas metodológicas e técnicas adotadas, especialmente no que tange às características geoambientais.

Nesse sentido, Tranfield, Denyer e Smart (2003) destacam que a revisão da literatura na pesquisa é uma ferramenta-chave para tratar a diversidade de conhecimento em uma área acadêmica e, assim, ao adotar elementos da revisão sistemática, difere das revisões tradicionais por ser um método replicável, com processo científico transparente.

A revisão da literatura auxilia os pesquisadores na compreensão aprofundada, a respeito de um determinado tema, à medida que ela integra diversos artigos que abordam o assunto em estudo (Sampaio & Mancini, 2007). Já a bibliometria tem a finalidade de avaliar e compreender o desempenho das atividades de produção científica acadêmica no período pesquisado e extrair as informações necessárias. Destaca-se, ainda, a utilização de métodos estatísticos e matemáticos que tornam o processo avaliativo da produtividade científica mais objetivo (Wolfram, 2017).

Portanto, este estudo visa analisar a evolução da literatura sobre o estudo do carbono orgânico no solo (COS) via sensoriamento remoto e proximal, em ambientes áridos e semiáridos, para identificar as tendências técnicas e as metodologias empregadas, bem como as lacunas e perspectivas que balizam esse campo de investigação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do estudo, utilizou-se a técnica de mineração de dados. Para subsidiar uma revisão integrada dos documentos publicados, foram realizadas buscas na base de dados SCOPUS e WEB OF SCIENCE, reconhecidas por sua ampla cobertura multidisciplinar e um elevado número de periódicos indexados.

Com a democratização e disseminação do conhecimento, com o passar do tempo, o volume de estudos publicados cresceu e, para dar vazão à análise desses dados, surgiu a bibliometria. Juntamente com recursos de análise sistemática, permite observar o estado da ciência e a produção científica, bem como as relações entre os países e as instituições (Lyrio, 2022). A estratégia de busca foi estruturada a partir da definição de termos-chave relacionados ao tema da pesquisa, combinada por meio de operadores boleamos (“AND” e “OR”) (Thijs e Glänzel, 2010), conforme descrito a seguir na Tabela 1.

Tabela 1. String de buscas na base de dados

((“soil” OR “soil” OR “earth”) AND (“organic carbon” OR “carbon stock” OR “organic matter”) AND (‘arid’ OR “semi-arid” OR “semi-arid” OR “DRY LANDS”) AND (“sensing”) AND (“spectroscopy*” OR “proximal” OR “spectral radiometry” OR ‘spectroradiometer’ OR “spectral library” OR “hyperspectral”))*

Fonte: elaborada pelo autor

A string com os principais termos foi aplicada em busca avançada nas bases de dados. A base de dados Scopus retornou 42 e a Web of Science (WOS) 100 documentos publicados entre 2008 e 2026. Nesse sentido, foram aplicados filtros manuais, selecionando apenas artigos finalizados. Posteriormente, foram realizados procedimentos de refinamento a partir da leitura dos títulos e resumos dos artigos, de modo que foram removidos 17 artigos que não se encaixavam no escopo de análise, pois abordavam temas relacionados ao mangue, ao estudo da biomassa, ao espaço sideral e à revisão, restando um conjunto de 125 artigos; no entanto, entre as bases de dados Scopus e WOS há sobreposição de documentos.

Assim, com o auxílio do pacote bibliometrix, foi realizada a junção dos arquivos e remoção nos artigos duplicados no R, que resultou em um arquivo final com 100 artigos para análise. Os dados foram exportados no formato CSV (Base de dados - 100) e foram realizados o processamento e a análise bibliométrica. Além disso, considerando a diversidade temática e metodológica dos estudos selecionados, foi adotada uma estratégia sistemática de leitura dos artigos visando à extração e organização das informações, tendo como base as perguntas apresentadas na Tabela 2.

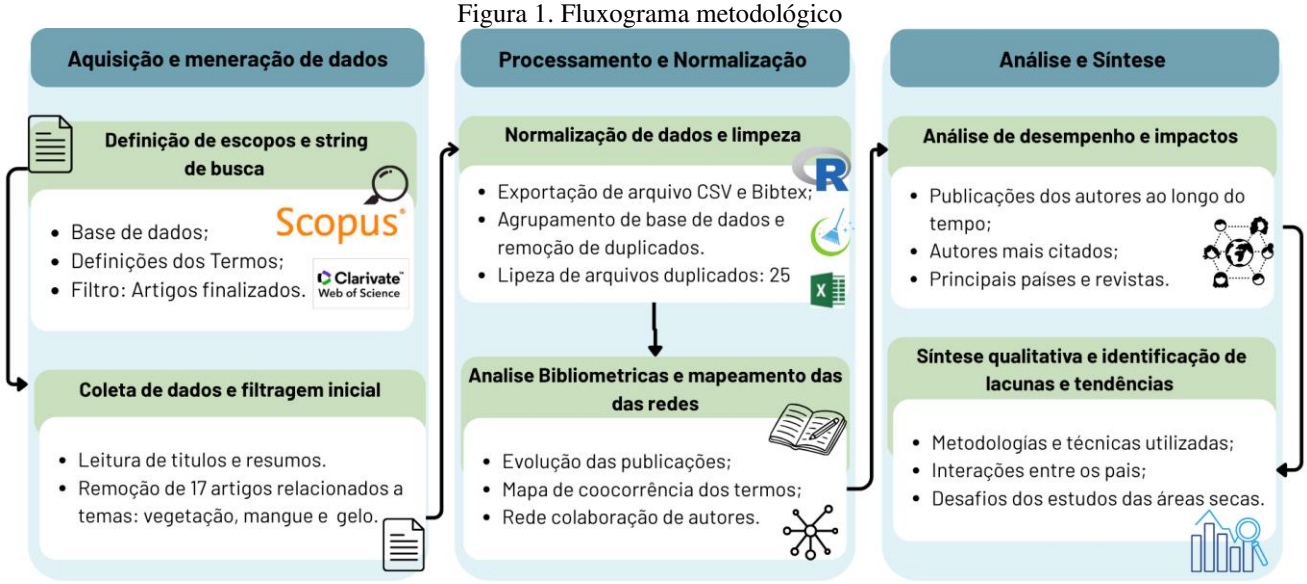
Tabela 2. Estratégias para análise bibliométrica e sistêmica

Perguntas	**Estratégia**	**Resultados**
1- Quais são os métodos e modelos adotados nos estudos do solo em regiões secas?	Leitura dos artigos	Análise sistemática:
2- Quais são os critérios utilizados para definir o delineamento amostral nos estudos do solo?	Leitura dos artigos	Análise sistemática
3- Os trabalhos têm quantificado COS em ambientes semiáridos?	Leitura dos artigos	Análise sistemática
4- Quais são os países que mais publicam em relação ao COS?	Amostragem geral	Mapa de localização
5- Quais são os autores que mais publicam?	Amostragem geral	Gráfico do Bibliometrix
6- Quais as revistas que mais publicam?	Amostragem geral	Gráfico do Bibliometrix
7- Quais as instituições que mais publicam?	Amostragem geral	Gráfico do Bibliometrix
8- Quais métodos e técnicas inovadoras têm sido adotados no âmbito dos artigos publicados?	Leitura dos artigos	Técnicas utilizadas
9- Qual a evolução das publicações sobre sensoriamento proximal e carbono orgânico no solo em ambientes secos?	Leitura dos artigos	Gráfico do Bibliometrix
10- Os trabalhos apresentam padrões espectrais de carbono orgânico no solo relacionados a variáveis geoambientais em ambientes secos?	Leitura dos artigos	Análise sistemática:

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

De modo geral, conforme apresentado no fluxograma metodológico (figura 1) as análises bibliométricas e os mapas de visualização foram elaborados com o auxílio do software VOSviewer® e do pacote bibliométrix em ambiente R. Essas ferramentas possibilitam a construção de redes de colaboração de termos, a identificação dos autores mais citados e com alto impacto local e global, bem como a identificar os principais periódicos e a distribuição espacial dos autores.

Figura 1. Fluxograma metodológico



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

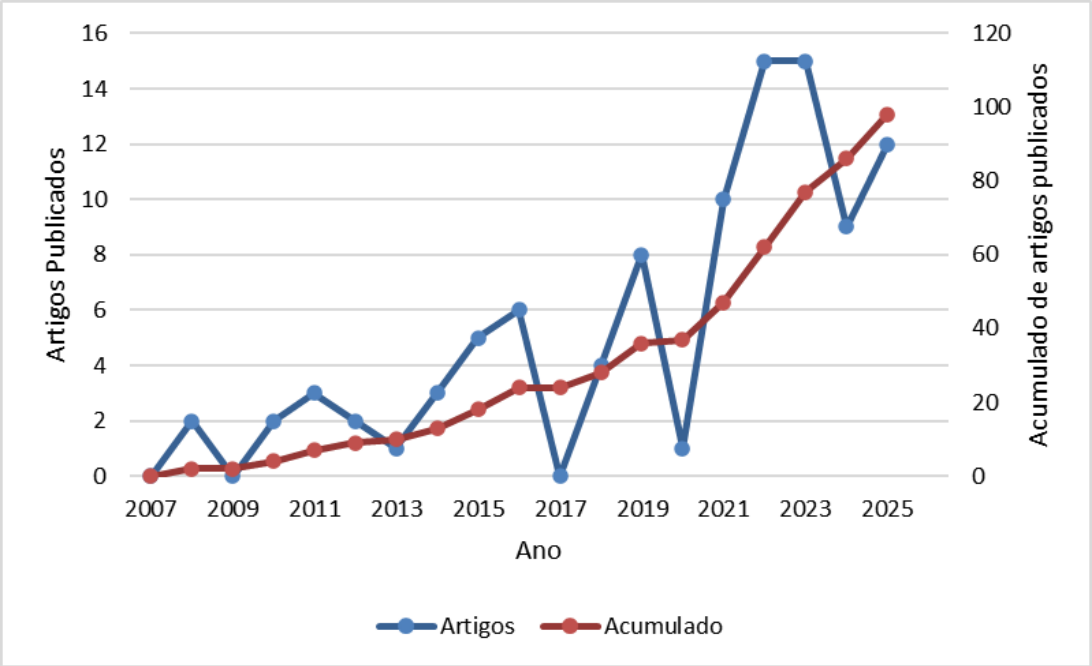
Outro ponto-chave é a análise e avaliação da evolução temporal dos temas investigados. Essa análise bibliométrica visa avaliar a produtividade dos periódicos, dos escritores e a frequência de termos estrados (Marques, 2010). Em linhas gerais, a bibliometria tem papel importante na avaliação da produção científica mundial, uma vez que seus indicadores podem retratar o comportamento e a evolução de um campo de conhecimento (Aguiar Pimenta et al., 2017).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 EVOLUÇÃO DAS PUBLICAÇÕES SOBRE CARBONO ORGÂNICO NO SOLO POR SENSORIAMENTO REMOTO E PROXIMAL

No processo de busca dos documentos indexados nas bases de dados da Scopus e da Web of Science, identificou-se um conjunto de dados com 100 artigos, publicados entre 2008 e 2026. Tal período revela o panorama das pesquisas sobre carbono no solo em ambientes áridos e semiáridos, com o uso do sensoriamento remoto e proximal nos últimos 18 anos, o que demonstra que os estudos no solo em terras secas são recentes e pouco explorados.

Figura 2. Evolução das Publicações ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

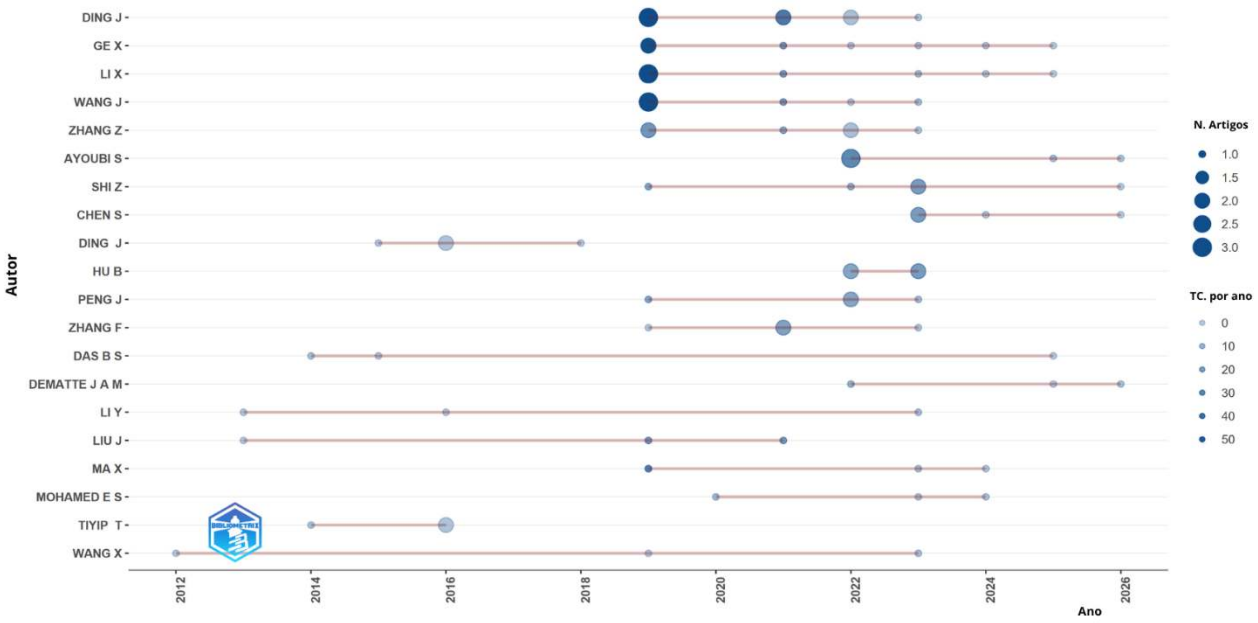
A evolução temporal das publicações na área é marcada por um crescimento acentuado no volume de produção a partir de 2015, com picos expressivos em 2019 e 2021, conforme ilustrado na Figura 2. Esse avanço foi impulsionado por eventos globais que afetaram diretamente os estudos pedológicos, a exemplo da crise alimentar de 2007-2008. Esse cenário forçou países como o Irã e a Arábia Saudita a adotarem medidas estratégicas, iniciando mapeamentos de alta resolução para agricultura irrigada e manejo sustentável visando à segurança alimentar (Lal, 2009).

Complementarmente, o lançamento do projeto GlobalSoilMap em 2009 estabeleceu um novo paradigma ao padronizar o uso de sensoriamento remoto e pedometria para prever propriedades do solo em profundidade. Esse progresso tecnológico foi viabilizado pela democratização do processamento em nuvem via Google Earth Engine a partir de 2012, o que permitiu a análise de grandes extensões territoriais sem a necessidade de supercomputadores, facilitando a identificação de áreas degradadas em países com pouca infraestrutura laboratorial (Arrouays et al., 2014; McBratney et al., 2003).

Este movimento de renovação consolidou-se em 2015, declarado pela ONU e pela FAO como o Ano Internacional do Solo, momento em que as pesquisas transicionaram de um caráter meramente exploratório para metodologias investigativas focadas em modelos preditivos para ambientes tropicais e áridos. Nesse período, destacam-se marcos científicos como o trabalho de Hou et al. (2014) sobre dados hiperespectrais e as contribuições de Yang e Ding (2015) no uso de algoritmos de machine learning, como SVM e RFE, para estimativa de carbono orgânico. Posteriormente, os picos de 2019 e 2021 foram sustentados pela emergência de políticas de governança ambiental, incluindo o Simpósio

Global de Carbono Orgânico do Solo (2017) e o estabelecimento de metas de Neutralidade da Degradação da Terra (LDN) (ONU, 2017; FAO, 2018; FAO, 2019).

Figura 3. Evolução das produções dos autores ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

As publicações nos períodos pós-Pandemia da covid foram influenciadas pela publicação do Relatório Especial do IPCC sobre Mudança Climática e Terra em 2019 e pela criação da rede INSAS, que reforçaram o papel do solo no sequestro de carbono e no combate à salinização. Mais recentemente, o início da Década da ONU da Restauração de Ecossistemas (2021-2030) elevou o solo ao status de base para esforços de reflorestamento, gerando um aumento massivo no financiamento de pesquisas.

Esse cenário atual prioriza o estudo da biodiversidade e do microbioma do solo, conforme os recentes relatórios da FAO, e consolida iniciativas como o mecanismo RECSOIL, que incentiva a recarbonização de solos globais e a adoção de práticas agrícolas sustentáveis para assegurar a saúde do ecossistema e a segurança alimentar das futuras gerações (IPCC, 2019; FAO/GSP-2019; ONU, 2021; Food and Agriculture Organization, 2025).

A articulação entre pedologia e estratégias de segurança alimentar, impulsionada por esses marcos, institucionalizou a pesquisa sobre solos. O resultado foi a diversificação e a regularidade de estudos metodológicos aplicados a zonas áridas, padrão evidenciado pela evolução temporal na Figura 3.

Quanto à periodicidade e recorrência das publicações (Figura 3), destaca-se a trajetória consolidada de pesquisadores como Wang, X., desde 2012. A partir de 2019, os estudos do solo

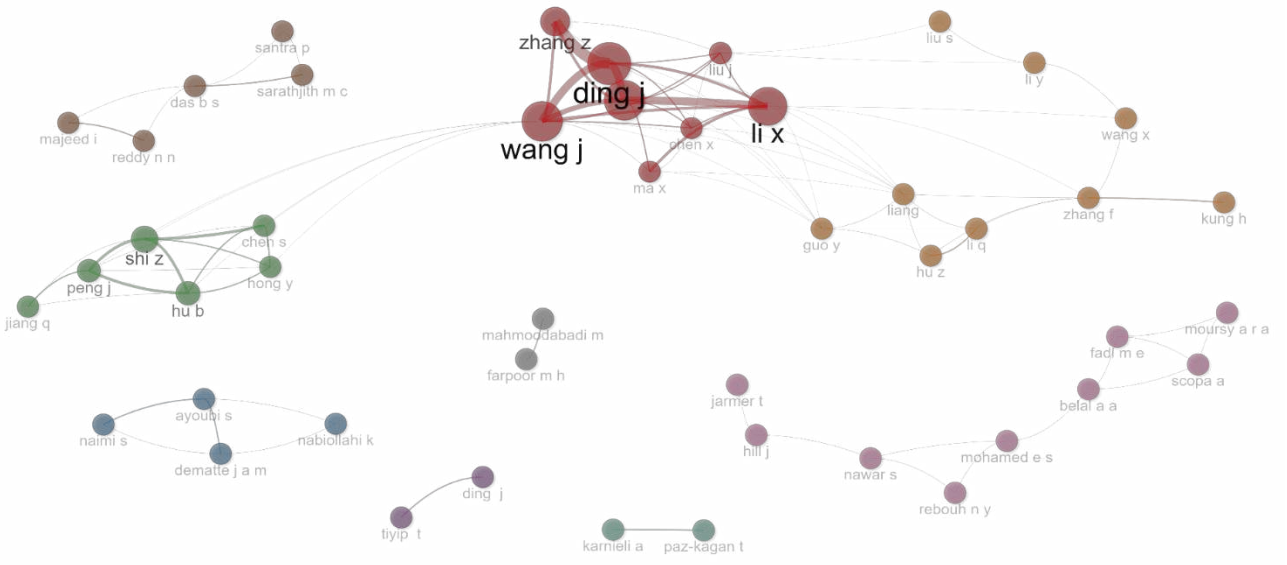
registraram uma intensificação produtiva liderada por autores como Ding, J., Ge, X., Liu, X. e Wang, J., cujas altas densidades de publicações e citações refletem uma forte rede de colaboração (Figura 4).

A ascensão de citações de autores como (Demattê et al., 2025) sugere uma renovação nos marcos teóricos da área, reforçada pela produção de Chen, S. e Ayoubi, S. em coautoria com (Wang et al., 2023 e Naimi et al., 2022). Estes pesquisadores integram uma rede colaborativa entre Brasil, Estados Unidos e Irã, evidenciada no cluster azul da Figura 4. Paralelamente, observa-se desde 2019 uma diversificação autoral que introduziu temas emergentes e oxigenou o campo científico.

Observam-se, ainda, hiatos temporais na produção de autores como Das, B. S., Li, Y., Liu, J. e Wang, X. Esses lapsos entre as publicações de 2013-2014 e as recentes de 2019-2023 sugerem transições metodológicas e de foco de pesquisa. Um exemplo notável é Li, Y., que migrou de estudos iniciais sobre predição de matéria orgânica para estimativas complexas de estoque de carbono via *Deep Learning* (Liu, J. et al., 2013; Guo et al., 2023).

No processo de disseminação científica, os autores estabelecem redes de colaboração que, dependendo do seu nicho de atuação, geram impactos locais ou globais. Ao avaliar as redes apresentadas na Figura 4, observa-se uma fragmentação em diferentes grupos, fenômeno relacionado ao grau de especialização e à proximidade geográfica ou institucional dos pesquisadores.

Figura 4. Rede de colaboração de coautoria



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

O cluster vermelho destaca-se como a rede mais consolidada e coesa, representando um grupo altamente produtivo. Este núcleo é composto por pesquisadores como Wang, J., Ding, J. e Li, X., que apresentam um elevado volume de publicações (mais de 30 nos últimos anos) e citações. Esses autores estão vinculados à Universidade de Xinjiang e à Universidade Normal de Xinjiang, na China. Devido à sua forte coesão interna, este grupo possui ligações mais tênues com os clusters laranja (autores da

China, dos Estados Unidos e da Espanha) e verde (composto por autores de diferentes instituições e laboratórios chineses).

As demais subdivisões revelam que há especializações geográficas distintas, de modo que o Cluster Marrom é composto majoritariamente por autores da Índia. Cluster Azul é formado por uma parceria entre Brasil, Estados Unidos e Irã. O Cluster Rosa abrange pesquisadores da Índia, da Alemanha, do Egito e da Rússia. E por fim, os Clusters Cinza e Verde-Claro são formados, respectivamente, por autores do Irã e de Israel.

Essa configuração evidencia que as colaborações científicas ainda são predominantemente intracontinentais ou nacionais, com baixa integração externa em larga escala. Além disso, a presença de clusters isolados, como o azul, o marrom e o cinza, sugere a existência de grupos menores que desenvolvem pesquisas em nichos específicos, ainda não plenamente integrados aos temas centrais e globais da área. No entanto, a falta de cooperação entre as instituições pode ser uma área de melhoria, considerando a importância da colaboração para o avanço científico (Nielsen, 2013).

A análise da periodicidade e das redes de colaboração revela um perfil espacial de publicações marcado pela proeminência da China, que se consolidou como potência nos estudos do solo, com elevado volume de publicações e citações. Esse protagonismo é reflexo de políticas públicas robustas e do apoio massivo à pesquisa em resposta aos desafios ambientais enfrentados pelo país nas últimas décadas (Huang & Westman, 2021).

A distribuição geográfica da produção científica evidencia a liderança asiática, com a China acumulando 1.377 citações, seguida por produções de alto impacto em nações de clima tropical e árido, com destaque para o Brasil e o Irã. O Brasil, impulsionado pelas contribuições de Demattê, J. A. M., figura como o quarto país de maior influência acadêmica na base analisada. Suas redes de colaboração sólidas com o Hemisfério Norte (Figura 4) inserem a presente pesquisa em um cenário de excelência nacional, no qual a modelagem de solos brasileiros dialoga diretamente com os principais centros globais de conhecimento.

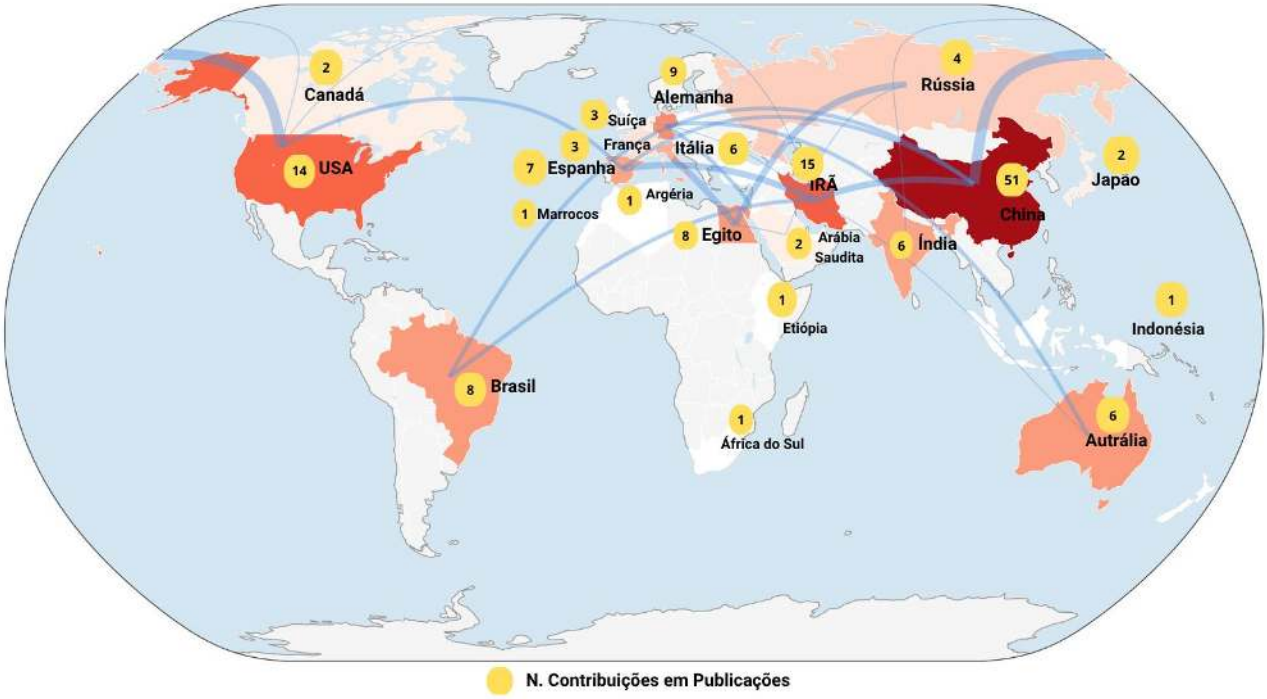
3.2 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ESTUDOS DO SOLO EM AMBIENTES SECOS E SUAS ITERAÇÕES

A distribuição espacial dos estudos sobre o carbono orgânico do solo (COS) em terras secas (*drylands*) concentra-se predominantemente em países de climas tropicais, semiáridos, áridos e temperados. Conforme ilustrado na Figura 5, a produção científica é liderada pela China, seguida pelo Irã, pelos Estados Unidos e pela Austrália, evidenciando uma interação internacional ainda incipiente, centrada majoritariamente no eixo China-Estados Unidos devido ao elevado volume de publicações desses países.

As redes de colaboração evidenciadas na figura 4 perpassam por países como Austrália, China, Alemanha e Espanha, Brasil, USA e Canadá, Índia, Rússia e Itália. No entanto, o volume de publicações concentra-se majoritariamente na China, seguida pelo Irã, pelos Estados Unidos e pela Austrália.

O Brasil também figura nesse cenário, com produções de impacto, destacando-se estudos sobre a quantificação das propriedades intrínsecas do solo por meio de sensores proximais (*Vis-NIR, MIR e XRF*) e predições comparativas por meio de regressão para o COS. A liderança chinesa no ranking reflete o robusto investimento em pesquisas ambientais em sensoriamento remoto observado na última década.

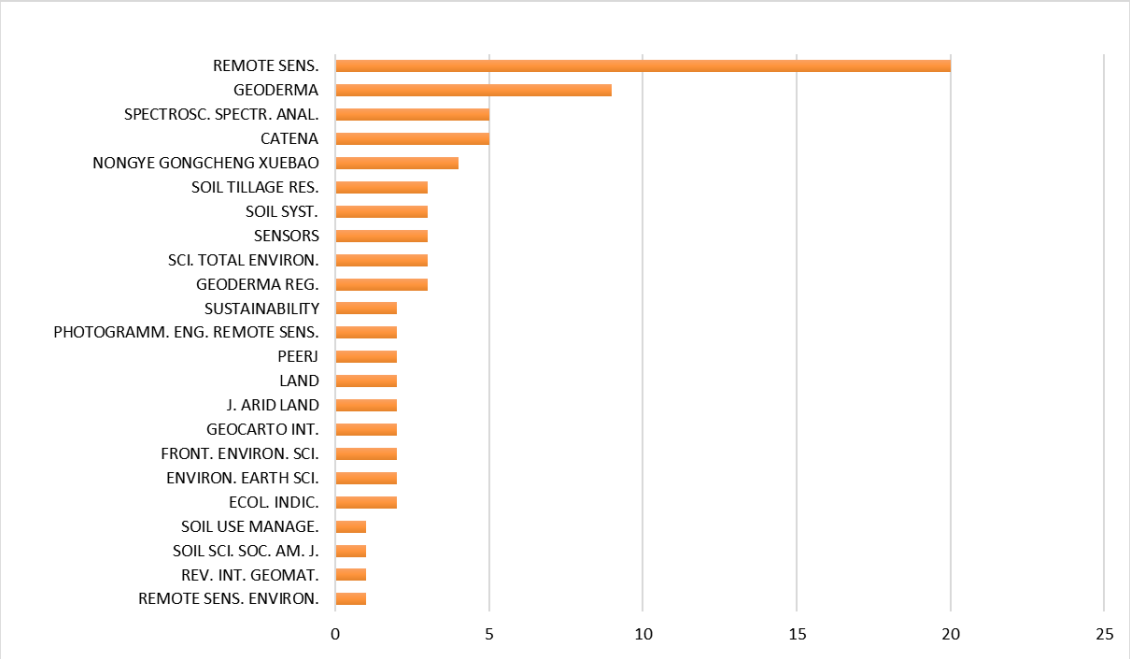
Figura 5. Rede de Interação entre os países



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

No que tange à disseminação desse conhecimento, a seleção dos periódicos é determinante para o alcance das investigações. A análise das bases Scopus e Web of Science (Figura 6) revela que a revista *Remote Sensing* lidera a preferência dos autores, com 20 publicações, seguida pela *Geoderma,* com 9. Em patamares subsequentes, figuram as revistas *Spectroscopy and Spectral Analysis* e *Catena*, ambas com 5 publicações, consolidando-se como os principais veículos para a difusão de metodologias e modelos preditivos na área.

Figura 6. Revistas mais publicadas



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

A proeminência da *Remote Sensing* e da *Geoderma* justifica-se por seus elevados fatores de impacto e escopo especializado, o que atrai um nicho qualificado de pesquisadores. Essa especialização explica o alto volume de citações dos trabalhos publicados nesses periódicos, consolidando-os como os principais veículos para a difusão de avanços em espectroscopia, sensoriamento remoto e mapeamento digital de solos, especialmente em regiões áridas e semiáridas.

3.3 RELEVÂNCIA ACADÊMICA DOS ESTUDOS

Os artigos analisados apresentam relevância regional e global, refletida tanto no volume de citações quanto no impacto das tecnologias e metodologias empregadas. Ao avaliar o conjunto dos 100 artigos selecionados, observa-se que os vinte trabalhos de maior relevância global lideram o ranking de citações, como observado na Figura 7.

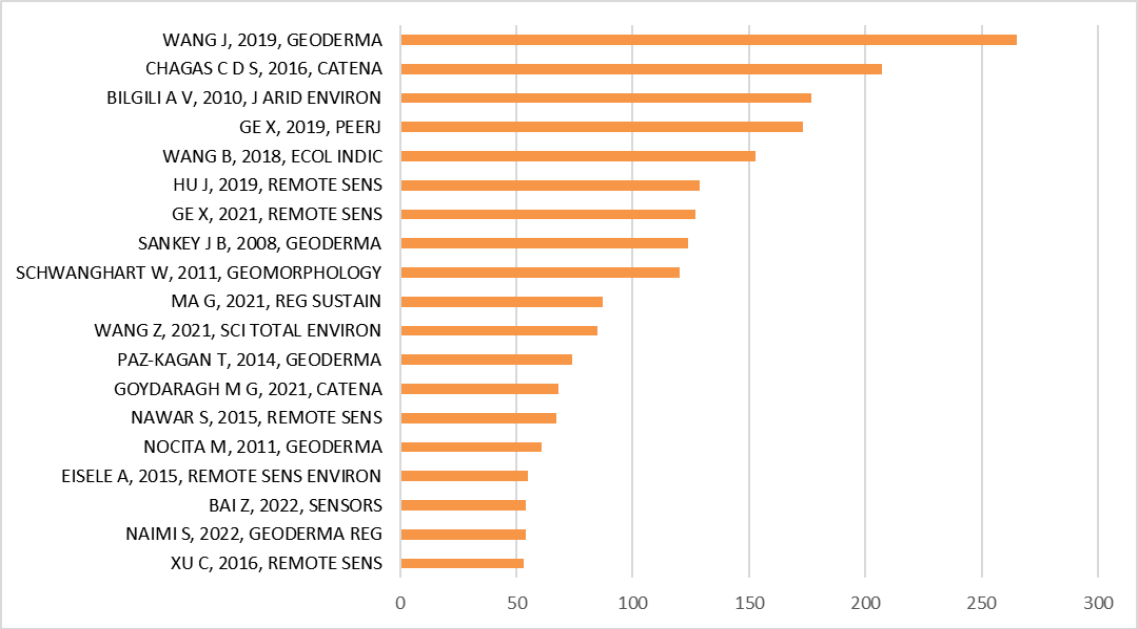
Ocupando o primeiro lugar, com mais de 250 citações, o estudo de J. Wang et al. (2019) focou no mapeamento da salinidade do solo em escala local. Utilizando imagens do satélite *Sentinel-2* e aplicando modelos de Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLSR) e *Random Forest* (RF), os autores alcançaram níveis de precisão essenciais para o monitoramento da salinidade sazonal, fornecendo subsídios vitais para a recuperação de terras em regiões áridas e semiáridas.

Dando continuidade ao ranking, destaca-se o trabalho de (Chagas et al., 2016) realizado no semiárido brasileiro. Os autores avaliaram a eficiência de dados multiespectrais (*sensor TM/Landsat 5*) para o mapeamento digital do solo, comparando a Regressão Linear Múltipla (RLM) com o algoritmo *Random Forest* (RF), demonstrando a superioridade deste último na predição das classes de solo. Em terceiro lugar, o artigo de Volkan Bilgili et al. (2010) investigou o uso da espectroscopia para

a predição de propriedades do solo via PLSR. Os resultados evidenciaram o alto potencial da técnica espectral como alternativa viável e eficiente às análises laboratoriais convencionais, consolidando-a como uma tendência metodológica na área.

No que concerne aos estudos precursores, destaca-se o trabalho de (Schwanghart & Jarmer, 2011), que acumula mais de 100 citações. Os autores caracterizaram os padrões espaciais das concentrações de carbono orgânico total (COT) superficiais em uma região semiárida do Mediterrâneo, correlacionando-os à topografia, variável determinante para compreender a dinâmica do carbono em solos áridos. Os resultados evidenciam que o sensoriamento remoto hiperespectral é uma técnica promissora para o avanço dos inventários de carbono nessas regiões.

Figura 7. Artigos mais citados globalmente



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

Outra referência fundamental é o estudo de Sankey et al. (2008), com aproximadamente 120 citações. O artigo compara calibrações locais e globais de espectroscopia de refletância difusa (DRS) nas faixas do visível e do infravermelho próximo (Vis-NIR) para a predição de argila e frações de carbono (orgânico e inorgânico). Pela sua precisão metodológica, o trabalho tornou-se um marco para investigações em ambientes de clima seco, justificando seu elevado impacto acadêmico.

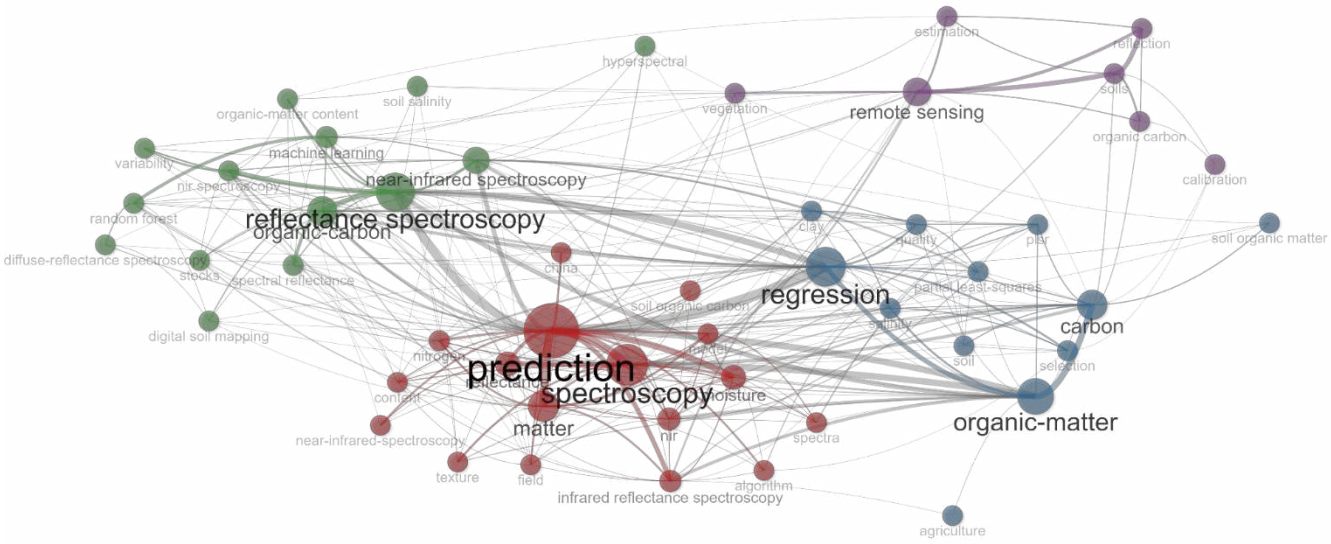
De modo geral, a literatura demonstra que os solos de regiões áridas e semiáridas ainda carecem de investigações aprofundadas, lacuna atribuída, em parte, à dificuldade de acesso logístico e tecnológico a essas áreas. Nesse cenário, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e proximal consolida-se como ferramenta essencial, permitindo a compreensão desses fenômenos nas dimensões temporal e espacial, além de promover a necessária diversificação e inovação dos estudos pedológicos no semiárido

3.4 REDES DE INTERAÇÃO, TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS.

O crescimento exponencial das publicações sobre o carbono orgânico do solo (COS) em zonas áridas e semiáridas foi impulsionado pelo avanço da espectrorradiometria e pela aplicação de modelos matemáticos complexos. Esse cenário consolidou o Mapeamento Digital do Solo (MDS) e o uso de algoritmos de *Machine Learning* e *Deep Learning*, fundamentais para o processamento de grandes volumes de dados. Nesse contexto, descritores como *"Prediction"*, *"Reflectance spectroscopy"*, *"Regression"*, *"Organic matter"*, *"Organic carbon"* e *"Remote Sensing"* apresentaram notável evidência, refletindo as principais tendências metodológicas da área, conforme demonstrado na Figura 9.

A análise de coocorrência de termos permite identificar a frequência e a interdependência entre descritores, sendo essencial para estabelecer os padrões que regem a pesquisa científica contemporânea (Robredo & Cunha, 1998; Marques et al., 2021). Nesse contexto, a predição de atributos do solo consolida-se como a tendência predominante.

Figura 9. Rede de coocorrência de termos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

As redes de interação evidenciam a intensidade dessas ligações por meio de clusters. O cluster vermelho destaca-se como o núcleo central, agrupando termos como *"Prediction"*, *"Soil"* e *"Organic carbon"*. Este grupo apresenta o maior número de conexões e serve de base para os demais, representando investigações voltadas à predição de atributos como matéria orgânica, textura e nitrogênio a partir de dados espectrais

Em contrapartida, os clusters periféricos detalham aplicações e variáveis específicas: o Cluster Verde está focado em sensoriamento remoto e espectroscopia, com ênfase na modelagem de dados espectrais via *Machine Learning* (como o algoritmo *Random Forest*) e no mapeamento digital do solo

(MDS). O Cluster Roxo está direcionado a metodologias aplicadas, destacando algoritmos de estimativa e calibração que integram dados de solo e vegetação. E por fim, Cluster Azul caracteriza-se pela aplicação de modelos de regressão PLSR para avaliar atributos como argila, carbono e salinidade.

A robustez das conexões entre os termos *"Prediction"*, *"Regression"* e *"Reflectance spectroscopy"*, expressa pela espessura das linhas na rede, demonstra a consolidação metodológica da área. Por outro lado, a maior distância entre os nós, como *"Salinity"* e *"Soil organic matter",* indica que esses temas raramente são discutidos de forma integrada no mesmo artigo. Contudo, o entendimento da salinidade em ambientes áridos tem emergido como um fator crucial para a dinâmica do carbono e a fertilidade do solo, configurando-se como uma tendência crescente. Bem como estudos relacionados à degradação do solo e erosão, principalmente na China, no Irã e na Arábia Saudita.

Apesar do avanço, a representatividade dos dados em escalas locais e globais permanece um desafio. Embora o uso de técnicas de baixo custo e "limpas", como a espectroscopia, tenha impulsionado as pesquisas, a representação fiel da variabilidade espacial ainda esbarra em limitações de escala que podem gerar generalizações excessivas. Nesse sentido, o Mapeamento Digital do Solo (MDS) consolidou-se como um eixo estratégico, utilizando amplamente sensores orbitais como *Landsat*, *MODIS* e *Sentinel-2*. Nota-se ainda um esforço para utilizar dados de alta resolução espectral do satélite *Hyperion* e integrar dados de missões hiperespectrais contemporâneas, como o *PRISMA*, para refinar os modelos em regiões áridas.

3.5 LEVANTAMENTO DE TÉCNICAS E METODOLOGIAS APLICADAS AOS ESTUDOS DE COS EM AMBIENTES ÁRIDOS E SEMIÁRIDOS

A análise dos 100 artigos selecionados permitiu identificar padrões metodológicos e tendências tecnológicas, sintetizados a seguir. Observa-se que, embora as geotecnologias tenham avançado significativamente, a reprodutibilidade dos modelos permanece um desafio crítico. A ausência de detalhamento nos protocolos de amostragem e análise laboratorial dificulta a transposição de modelos entre diferentes escalas e regiões.

Quanto à determinação química, o método de Walkley-Black (oxidação úmida) (Nelson & Sommers, 1996) ainda é predominante em cerca de 90% dos trabalhos, devido ao seu baixo custo e à tradição. No entanto, sua alta toxicidade tem impulsionado a adoção de alternativas mais sustentáveis, como a combustão seca (análise elementar CHN) e a técnica de incineração (mufa), que, embora mais onerosas, são indicadas por não gerarem resíduos de cromo (Alsaleh et al., 2025; dos Santos et al., 2025; Levi et al., 2022; Subi et al., 2023).

Tabela 3. Síntese da Análise sistemática dos aspectos metodológicos

Categoria	Matodo/algoritomo	Características principais	Limitações
Análise Química (COS)	Walkley-Black (WB)	Oxidação úmida via dicromato. É o método clássico e barato.	Gera resíduos tóxicos (cromo); pode subestimar o carbono (fator de correção necessário).
	Combustão Seca (CHN)	Considerado o método de referência. Queima a amostra em alta temperatura.	Custo elevado por amostra e exige equipamentos mais complexos.
	Salinidade	condutividade elétrica	É um processo trabalhoso e lento para muitas amostras.
Análises Físicas do solo	Granulometria; Densidade do solo; Retenção de água.	Análises essenciais para avaliar o carbono orgânico	O método da pipeta é demorado. A coleta com anéis é extremamente sensível ao erro humano, a análise física é demorada e cara.
Amostragem	LDSF / Transectos, Estratificação por declividade	Amostragem sistemática para avaliar a saúde do solo em escalas paisagísticas.	Exige grande esforço logístico em campo e tempo.
	Hipercubo (cLHS - Conditioned Latin Hypercube Sampling)	Amostragem que garante que todas as variáveis ambientais sejam representadas de forma equilibrada no seu conjunto de amostras.	Pode gerar pontos em locais de difícil acesso físico
	SPXY / X-Means	Divisão de dados baseada na variabilidade estatística e espacial.	Pode ser influenciado por outliers ou erros de leitura espectral.
	Krigagem, MDE	O MDE representa a forma do terreno e a krigagem tem precisão estatística.	Dependência da resolução do MDE. A krigagem "suaviza" os dados
Pre-Processamentos	CWT / FOD	Transformada de Wavelet e Derivada de Ordem Fracionária para destacar picos espectrais.	Risco de amplificar o ruído se não houver suavização prévia.
	CARS / SPA / ACO	Algoritmos competitivos para selecionar os comprimentos de onda mais importantes.	Podem selecionar variáveis diferentes a cada rodada (instabilidade).
Modelos Lineares	PLSR / PCR	Reduzem a dimensionalidade e lidam com multicolinearidade (dados correlacionados).	Não capturam relações não lineares complexas entre solo e ambiente.
Machine Learning	Random Forest (RF)	Excelente para capturar interações entre variáveis.	Não extrapola: não prevê valores fora do intervalo visto no treinamento.
	Cubist	Modelo baseado em regras (If-Then) com regressões lineares nas pontas.	Menos flexível que modelos puramente não lineares para dados muito ruidosos.
	XGBoost / BRT	Boosting de gradiente. Foca em corrigir os erros das árvores anteriores.	Requer ajuste fino de hiperparâmetros para evitar overfitting.

	SVM	Encontra o hiperplano que melhor separa ou regressa os dados.	É sensível à escolha do Kernel e não lida bem com alto volume de dados.
Deep Learning	CNN / LSTM / GRU	Redes neurais possuem alta eficiência	Alto custo computacional; podem demorar para convergir.
Otimização	PSO / GWO / GA	Algoritmos de enxame/genéticos para buscar os melhores parâmetros do modelo.	Alto custo computacional; podem demorar para convergir.
Origem dos dados de campo e espectroscopias Vis-NIR Swir, Mid-IR/ MIR, pxRF)	Coletas de campo	Trago holandês, Trincheira	Alto custo logístico, físico e econômico fornece apenas dados pontuais
	Dados secundários	Bases globais, nacionais e regionais	Possuem baixa resolução espacial para estudos locais; podem conter erros de métodos antigos ou falta de padronização entre diferentes bases.
	Espectroscopía Laboratorial	ASD FieldSpec FRX, FTIR, DRIFT	Exige preparo rigoroso das amostras (secar, moer e peneirar)
	Espectroscopía in situ	Levar o sensor em campo	Influência direta de variáveis ambientais (umidade do solo e luz solar)
	Imagens de satélite (multiespectrais e hiperespectrais)	MODIS, Landsat, Sentinel 2, PRISMA, Hyperion, ASTER e VANTs	Presença de nuvens (exceto para VANTs sob o céu nublado); resolução espacial pode ser grosseira para solos muito heterogêneos; necessidade de correção atmosférica.
	DRXs	Identificação precisa de minerais	É uma análise lenta, cara e exige uma preparação rigorosa da amostra.
	Radar	Funciona dia e noite e atravessa a cobertura de nuvens.	O sinal é muito complexo e sofre com o "speckle".

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

Outro ponto relevante identificado na literatura é a predominância de amostragens concentradas na camada superficial, visando captar a heterogeneidade ambiental e a variabilidade espacial. No entanto, as metodologias descritas carecem de detalhamento quanto ao delineamento amostral, omitindo frequentemente os critérios para a definição do tamanho da amostra e a lógica utilizada para a distribuição espacial dos pontos.

Nesse contexto, o sensoriamento remoto assume importância estratégica em ambientes áridos e semiáridos, ao ampliar o alcance dos estudos e permitir o uso de bases de dados secundárias. Embora essa tecnologia reduza a necessidade de campanhas de campo onerosas, ela pode induzir a uma dependência de bases globais que, em muitos casos, não captam as nuances da variabilidade local (Malav et al., 2022).

Na análise dos artigos verifica-se a consolidação dos sensores Vis-NIR integrados a algoritmos de *Machine Learning* para a predição de atributos químicos. Observa-se que, enquanto o Carbono Orgânico do Solo (SOC) permanece como o foco central das investigações, há uma diversidade considerável nas técnicas de pré-processamento espectral adotadas. Esta escolha está intrinsecamente ligada ao modelo selecionado e às características pedológicas da área de estudo, o que reforça a urgência de estabelecer protocolos específicos para biomas tropicais e semiáridos (Miloš et al., 2022).

Nesse sentido, verifica-se uma transição clara de modelos lineares consolidados (Tabela 4), como o PLSR, para algoritmos de aprendizado de máquina de alta precisão, como Random Forest (RF), Cubist e XGBoost. O XGBoost, em particular, destaca-se pela eficiência em lidar com dados ruidosos e pela capacidade de ranquear a importância das variáveis e do comprimento de onda.

Recentemente (2021–2025), o uso de Redes Neurais Convolucionais (CNN) trouxe um novo paradigma, que passou a tratar o espectro como um sinal contínuo ou uma imagem, permitindo extrair padrões que métodos tradicionais não detectam. Contudo, essa técnica exige grandes volumes de dados (*Big Data*), o que esbarra nos custos de coleta de campo (Delgadillo-Duran et al., 2022).

A tendência atual de "sinergia de técnicas" substitui o uso isolado de modelos. A integração de dados espectrais laboratoriais com sensores orbitais (Landsat, Sentinel-2, PRISMA) e dados de Radar (SAR) busca suprir as deficiências individuais de cada fonte, gerando bancos de dados multivariados mais robustos para representar a heterogeneidade ambiental (Goodwin et al., 2022; Karmakar et al., 2024).

Tabela 4. Métodos aplicados nos estudos do solo

Metodo	**periodo**	**categoria**	**Característica Principal**	**Limitação**
PLSR	2008 - 2026	Linear	Linear e simples	Baixa acurácia em solos complexos
BRT	2008	Machine Learning	Alta Precisão supera o PLSR e o Random Forest em estudos de solos.	Sensível a ruído
SVM	2015 - 2025	Machine Learning	Robusto, não linear e eficiente em espaços de alta dimensão.	Baixo desempenho com grande volume de dados.
Randon Forest	2018 -2026	Machine Learning	Robusto não linear. É difícil sofrer *overfitting* e lida muito bem com dados não lineares.	Não consegue extrapolar
Redes Neurais	2021 - 2025	Deep Learning	Alta precisão deep learning	Exige um grande banco de dados e são difíceis de treinar
XGBoost	2021 - 2025	Machine Learning	Robusto e não linear Extremamente rápido e eficiente.	Difícil de interpretar e exige muito ajuste de hiperparâmetros

Cubist	2021 - 2026	Machine Learning	Supera o Random Forest em precisão para dados de solo e sensoriamento remoto.	Baixo suporte
BART	2022	Machine Learning	Flexível para capturar interações complexas, excelente para quantificar a incerteza das previsões	Lento para treinar em conjuntos de dados com muitas observações.
CARS	2022 - 2024	Seleção	Seleção de variáveis	Funciona para limpeza de dados e identificação de biomarcadores.
Boruta	2023 - 2026	Seleção	Seleção de variáveis	Funciona para limpeza de dados e identificação de biomarcadores.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2026.

No cenário brasileiro, observa-se uma nítida sub-representação do bioma Caatinga: dos oito artigos publicados com participação de autores nacionais, apenas três abordam especificamente o semiárido (Chagas et al. 2016; Ribeiro et al. 2021; dos Santos et al. 2025), evidenciando a escassez de pesquisas em um ecossistema amplamente negligenciado. Globalmente, nota-se que as metodologias ignoram as especificidades edafoclimáticas de zonas secas, o que limita a aplicabilidade geográfica e compromete a reprodutibilidade dos modelos (Malav et al., 2022; Menezes et al., 2021; Wiesmeier et al., 2019).

Dada a singularidade e o alto endemismo da vegetação xerofítica, há uma urgência acadêmica na construção de estudos e protocolos específicos que considerem a heterogeneidade da Caatinga, garantindo que seus estoques de carbono sejam representados com fidelidade em modelos globais (Holanda Leite, 2022) .

Para o avanço da área, é necessário que os estudos futuros foquem na otimização do delineamento amostral e na integração de variáveis ambientais como clima, geomorfologia e geologia que são fundamentais para o estudo do carbono orgânico no solo, sobretudo em ambientes áridos e semiarídeos. É necessário, ainda, acelerar a transição de análises meramente descritivas para sistemas preditivos robustos e escaláveis, essenciais para o monitoramento temporal das propriedades dinâmicas do solo (Menezes et al. 2021; Wiesmeier et al. 2019).

A implementação recente de dados de radar, em convergência com o sensoriamento remoto proximal e dados de campo, sinaliza um caminho promissor para superar lacunas metodológicas. Entretanto, a padronização permanece um desafio, pois a carência de detalhamento nos procedimentos de coleta e a dependência de dados secundários comprometem a replicabilidade dos métodos em diferentes regiões, reforçando a necessidade de protocolos mais rigorosos e transparentes (Wiesmeier et al. 2019).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos dados revela que os estudos sobre solos em ambientes áridos e semiáridos, por meio de sensoriamento remoto e proximal, embora cronologicamente recentes, apresentam uma sofisticação técnica acelerada. Ao longo das últimas décadas, a incorporação de sensores e algoritmos complexos expandiu as áreas de aplicação, visando capturar a heterogeneidade desses sistemas. No entanto, ainda existem lacunas geográficas e conceituais que demandam atenção acadêmica para adensar o conhecimento sobre a dinâmica do carbono orgânico em escalas locais e globais.

A integração entre a análise bibliométrica e a revisão sistemática evidencia uma transição clara de ensaios exploratórios para modelos preditivos robustos baseados em *Machine Learning e Deep Learning*. No entanto, a evolução é geograficamente assimétrica, apresentando obstáculos críticos de reprodutibilidade e de detalhamento metodológico que dificultam a padronização e a democratização do conhecimento científico.

Um dos achados mais relevantes desta pesquisa é a constatação de que o bioma brasileiro estratégico, como a Caatinga, permanece severamente sub-representado na literatura internacional. A singularidade edafoclimática e o endemismo desse ecossistema exigem o desenvolvimento de estudos e protocolos de campo que contemplem sua variabilidade espacial, para que seus estoques de carbono não sejam sistematicamente negligenciados ou subestimados em modelos globais.

Nesse sentido, a sinergia entre o sensoriamento orbital e o proximal deixa de ser apenas uma alternativa de baixo custo para se tornar uma necessidade estratégica no monitoramento do carbono diante das mudanças climáticas. Reafirma-se a urgência de investigar o semiárido brasileiro por meio de metodologias padronizadas que permitam a replicabilidade de modelos e a redução de incertezas em diferentes escalas.

Espera-se que este estudo sirva de base para futuras investigações que busquem preencher as lacunas técnicas identificadas, pois o fortalecimento de uma ciência do solo precisa ser contextualizado e tecnologicamente integrado, para garantir a conservação ambiental e a resiliência climática das regiões semiáridas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Os autores agradecem ao PPBio pelo suporte no desenvolvimento da pesquisa. E à UEFS, especificamente ao PPGM e ao Labespectro, pela disponibilização de infraestrutura e materiais.

REFERÊNCIAS

Aguiar Pimenta, A., Moraes, A. R., Portela, R., Cleiciane, B., & Ribeiro, R. M. (n.d.). *A BIBLIOMETRIA NAS PESQUISAS ACADÊMICAS*. Retrieved May 1, 2026, from https://flucianofeijao.com.br/flf/wp-content/uploads/2017/12/EDUCAR_PARA_A_CIDADANIA_FINANCEIRA.pdf.

Alsaleh, A. R. S., Alcibahy, M., Gafoor, F. A., Hashemi, H. A., Athamneh, B., Al Hammadi, A. A., Seneviratne, L., & Al Shehhi, M. R. (2025). Estimation of soil organic carbon in arid agricultural fields based on hyperspectral satellite images. *Geoderma*, *453*(117151), 117151. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117151

Arrouays, D., McKenzie, N., Hempel, J., de Forges, A. R., & McBratney, A. B. (2014). *GlobalSoilMap: Basis of the global spatial soil information system*. CRC Press. https://books.google.com/books/about/GlobalSoilMap.html?hl=&id=S5ClAgAAQBAJ.

Brasil, 2022. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Brasília; [s.d.].

Chagas, C. da S., de Carvalho Junior, W., Bhering, S. B., & Calderano Filho, B. (2016). Spatial prediction of soil surface texture in a semiarid region using random forest and multiple linear regressions. *Catena*, *139*, 232–240. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.001.

Delgadillo-Duran, D. A., Vargas-García, C. A., Varón-Ramírez, V. M., Calderón, F., Montenegro, A. C., & Reyes-Herrera, P. H. (2022). Vis–NIR spectroscopy and machine learning methods to diagnose chemical properties in Colombian sugarcane soils. *Geoderma Regional*, *31*(e00588), e00588. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00588.

Demattê, J. A. M., Campos, R. C., & Alves, M. C. (2000). Avaliação espectral de solos desenvolvidos em uma topossequência de diabásio e folhelho da região de Piracicaba, SP. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *35*(12), 2447–2460. https://doi.org/10.1590/s0100-204x2000001200016.

Demattê, J. A. M., Epiphanio, J. C. N., & Formaggio, A. R. (2003). Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. *Bragantia: Boletim Tecnico Do Instituto Agronomico Do Estado de Sao Paulo*, *62*(3), 451–464. https://doi.org/10.1590/s0006-87052003000300012.

Demattê, J. A. M., Rizzo, R., Rosin, N. A., Poppiel, R. R., Novais, J. J. M., Amorim, M. T. A., Rodriguez-Albarracín, H. S., Rosas, J. T. F., Bartsch, B. D. A., Vogel, L. G., Minasny, B., Grunwald, S., Ge, Y., Ben-Dor, E., Gholizadeh, A., Gomez, C., Chabrillat, S., Francos, N., Fiantis, D., … Shepherd, K. D. (2025). A global soil spectral grid based on space sensing. *The Science of the Total Environment*, *968*(178791), 178791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178791.

dos Santos, E. P., Moreira, M. C., Fernandes-Filho, E. I., Demattê, J. A. M., Santos, U. J. dos, Moura-Bueno, J. M., Cruz, R. R. P., Silva, D. D. da, & Sampaio, E. V. de S. B. (2025). Integrating satellite radar vegetation indices and environmental descriptors with visible-infrared soil spectroscopy improved organic carbon prediction in soils of semi-arid Brazil. *Geoderma*, *457*(117288), 117288. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117288.

Food and Agriculture Organization. (2025). *State of knowledge of soil biodiversity: status, challenges and potentialities, report 2020* (Food and Agriculture Organization (ed.)). Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO). https://doi.org/10.4060/cb1928en.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018). *Soil organic carbon: The hidden potential*. https://openknowledge.fao.org/items/c0b7c9bc-d8e9-4d45-8ef2-969f58f01247.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). *Diretrizes voluntárias para a gestão sustentável dos solos*. Roma, Itália. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bit.

Goodwin, D. J., Kane, D. A., Dhakal, K., Covey, K. R., Bettigole, C., Hanle, J., Ortega-S., J. A., Perotto-Baldivieso, H. L., Fox, W. E., & Tolleson, D. R. (2022). Can low-cost, handheld spectroscopy tools coupled with remote sensing accurately estimate soil organic carbon in semi-arid grazing lands? *Soil Systems*, *6*(2), 38. https://doi.org/10.3390/soilsystems6020038.

Guo, Z., Li, Y., Wang, X., Gong, X., Chen, Y., & Cao, W. (2023). Remote sensing of soil organic carbon at regional scale based on deep learning: A case study of Agro-pastoral ecotone in northern China. *Remote Sensing*, *15*(15), 3846. https://doi.org/10.3390/rs15153846.

Holanda Leite, M. J. de. (2022). CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PRINCIPAIS SOLOS DA REGIÃO SEMIÁRIDA. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218*, *3*(10), e3101964. https://doi.org/10.47820/recima21.v3i10.1964.

Huang, P., & Westman, L. (2021). China's imaginary of ecological civilization: A resonance between the state-led discourse and sociocultural dynamics. *Energy Research & Social Science*, *81*(102253), 102253. https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102253.

Hou Y, Tiyip T, Sawut M, Zhang F (2014) Estimation model of desert soil organic matter content using hyperspectral data. Trans Chin SocAgric Eng 30(16):113–120. https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2014.16.016 (in Chinese with English abstract).

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). *Climate change 2014: Mitigation oclimate change*. Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**.** (2019). *Mudanças climáticas e terra: Um relatório especial do IPCC sobre mudanças climáticas, desertificação, degradação da terra, gestão sustentável da terra, segurança alimentar e fluxos de gases de efeito estufa em ecossistemas terrestres* (P. R. Shukla et al., Eds.). https://www.ipcc.ch/srccl/.

Karmakar, P., Teng, S. W., Murshed, M., Pang, S., Li, Y., & Lin, H. (2024). Crop monitoring by multimodal remote sensing: A review. *Remote Sensing Applications Society and Environment*, *33*(101093), 101093. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101093.

Lal, R. (2001). World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Advances in Agronomy*, *71*, 145–191. https://doi.org/10.1016/s0065-2113(01)71014-0.

Lal, R. (2009). Soils and food sufficiency: A review. In *Sustainable Agriculture* (pp. 25–49). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_4.

Levi, N., Karnieli, A., & Paz-Kagan, T. (2022). Airborne imaging spectroscopy for assessing land-use effect on soil quality in drylands. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing: Official Publication of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, *186*, 34–54. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.01.018.

Liu Jiao; Li Yi Liu Shibin. (2013) Modelo preditivo para a determinação espectroscópica da matéria orgânica do solo no curso superior do rio Heihe. https://doi:10.3964/j.issn.1000-0593(2013)12-3354-05.

Lyrio, K. de O. (2022). Journal of Refugee Studies: Um Estudo bibliométrico na Web of Science. Revista Produção e Desenvolvimento, 8(1), e624–e624. https://doi.org/10.32358/rpd.2022.v8.624.

Marques, Andrielle de A. A bibliometria: reflexões para comunicação científica na Ciência da Comunicação e Ciência da Informação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DA COMUNICAÇÃO, 33, 2010, Caxias do Sul. Anais... Caxias do Sul: INTERCOM, 2010. p. 1-10.

Marques, F. B., Marques, Y. B., & Maculan, B. C. M. dos S. (2021). Coocorrência de palavras-chave em dados abertos da Capes: Teses e dissertações em Ciência da Informação. Múltiplos Olhares em Ciência da Informação. https://doi.org/10.35699/2237-6658.2021.37157.

Malav, L. C., Yadav, B., Tailor, B. L., Pattanayak, S., Singh, S. V., Kumar, N., Reddy, G. P. O., Mina, B. L., Dwivedi, B. S., & Jha, P. K. (2022). Mapping of land degradation vulnerability in the semi-arid watershed of Rajasthan, India. *Sustainability*, *14*(16), 10198. https://doi.org/10.3390/su141610198.

McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, *117*(1-2), 3–52. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4.

Menezes, R. S. C., Sales, A. T., Primo, D. C., Albuquerque, E. R. G. M. de, Jesus, K. N. de, Pareyn, F. G. C., Santana, M. da S., Santos, U. J. dos, Martins, J. C. R., Althoff, T. D., Nascimento, D. M. do, Gouveia, R. F., Fernandes, M. M., Loureiro, D. C., Araújo Filho, J. C. de, Giongo, V., Duda, G. P., Alves, B. J. R., Ivo, W. M. P. de M., … Sampaio, E. V. de S. B. (2021). Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. *Geoderma*, *390*(114943), 114943. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114943.

Miloš, B., Bensa, A., & Japundžić-Palenkić, B. (2022). Evaluation of Vis-NIR preprocessing combined with PLS regression for estimation soil organic carbon, cation exchange capacity and clay from eastern Croatia. *Geoderma Regional*, *30*(e00558), e00558. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00558.

Nações Unidas (ONU). (2014, 5 de dezembro). *Solo saudável é fundamental para a vida na Terra, diz agência da ONU*. ONU News. https://news.un.org/pt/story/2014/12/1494791.

Nações Unidas (ONU). (2017). *Integration of Sustainable Development Goal 15 and its target 15.3 into the implementation of the United Nations Convention to Combat Desertification and land degradation neutrality*. United Nations Convention to Combat Desertification. https://www.unccd.int/sites/default/files/inline-files/ICCD_COP%2813%29_L.18-1716078E_0.pdf.

Nações Unidas (ONU). (2021, 3 de junho). *Começa a Década da ONU da Restauração de Ecossistemas*. Nações Unidas Brasil. https://brasil.un.org/pt-br/130341-come%C3%A7a-d%C3%A9cada-da-onu-da-restaura%C3%A7%C3%A3o-de-ecossistemas.

Naimi, S., Ayoubi, S., Di Raimo, L. A. D. L., & Dematte, J. A. M. (2022). Quantification of some intrinsic soil properties using proximal sensing in arid lands: Application of Vis-NIR, MIR, and pXRF spectroscopy. *Geoderma Regional*, *28*(e00484), e00484. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00484.

Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. Em D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, & M. E. Summer (Org.), Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods (p. 961–1010). SSSA-ASA.

Parceria Portuguesa para o Solo. (s.f.). *Carbono orgânico do solo: Um potencial oculto*. Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural. https://parceriaptsolo.dgadr.gov.pt/?view=article&id=442 .

Robredo, J., & Cunha, M. B. da. (1998). Aplicação de técnicas infométricas para identificar a abrangência do léxico básico que caracteriza os processos de indexação e recuperação da informação. Ciência da Informação, 27, 11–27. https://doi.org/10.1590/S0100-19651998000100003.

Sampaio, R. F., & Mancini, M. C. (2007). Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. Revista Brasileira de Fisioterapia, 11(1), 83–89. Retrieved from http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-35552007000100013&nrm=iso.

Sankey, J. B., Brown, D. J., Bernard, M. L., & Lawrence, R. L. (2008). Comparing local vs. global visible and near-infrared (VisNIR) diffuse reflectance spectroscopy (DRS) calibrations for the prediction of soil clay, organic C and inorganic C. *Geoderma*, *148*(2), 149–158. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.019.

Schwanghart, W., & Jarmer, T. (2011). Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography — A case study from south-eastern Spain. *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)*, *126*(1-2), 252–263. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.11.008.

Subi, X., Eziz, M., & Zhong, Q. (2023). Hyperspectral estimation model of organic matter content in farmland soil in the arid zone. *Sustainability*, *15*(18), 13719. https://doi.org/10.3390/su151813719.

Terra, F. da S. (2007). Estudo da contribuição do comportamento espectral de diferentes substratos do bioma Pampa para a componente espectral dos modelos agrometeorológicos-espectrais. 189.

Thijs, Bart & Glänzel, Wolfgang, 2010. "**A structural analysis of collaboration between European research institutes**," Research Evaluation, Oxford University Press, vol. 19(1), pages 55-65, March.

Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. British Journal of Management, 14(3), 207–222. Retrieved from http://10.0.4.87/1467-8551.00375.

Trumbore, S., & Camargo, P. B. (2009). *Dinâmica do carbono do solo. Amazonia Global Change*. 451–462.

Vanti, N. A. P. Da bibliometria à webometria: uma exploração conceitual dos mecanismos utilizados para medir o registro da informação e a difusão do conhecimento. Ciência da Informação, Brasília, v. 31, n. 2, p. 152-162, maio/ago. 2002.

Volkan Bilgili, A., Van Es, H. M., Akbas, F., Durak, A., & Hively, W. D. (2010). Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi-arid area of Turkey. *Journal of Arid Environments*, *74*(2), 229–238. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.08.011.

Yang Aixia, Ding Jianli. (2015), Comparative assessment of two methods for estimation of soil organic carbon content by Vis-NIR spectra in Xinjiang Ebinur Lake Wetland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31(18): 162-168. https://do:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.023.

Wolfram, Dietmar. Bibliometrics Research in the Era of Big Data: Challenges and Opportunities. Bibliometria e Cientometria no Brasil: infraestrutura para avaliação da pesquisa científica na Era do Big Data, p. 91-101, 2017.

Wang, J., Feng, C., Hu, B., Chen, S., Hong, Y., Arrouays, D., Peng, J., & Shi, Z. (2023). A novel framework for improving soil organic matter prediction accuracy in cropland by integrating soil, vegetation, and human activity information. *The Science of the Total Environment*, *903*(166112), 166112.

Wang, J., Ding, J., Yu, D., Ma, X., Zhang, Z., Ge, X., Teng, D., Li, X., Liang, J., Lizaga, I., Chen, X., Yuan, L., & Guo, Y. (2019). Capability of Sentinel-2 MSI data for monitoring and mapping of soil salinity in dry and wet seasons in the Ebinur Lake region, Xinjiang, China. *Geoderma*, *353*, 172–187. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.040.

Wang, Y., Chen, S., Hong, Y., Hu, B., Peng, J., & Shi, Z. (2023). A comparison of multiple deep learning methods for predicting soil organic carbon in Southern Xinjiang, China. *Computers and Electronics in Agriculture*, *212*(108067), 108067. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108067.

Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobley, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H.-J., & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, *333*, 149–162. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026.