

ceb stag com /cna
ok @am @nel
co co PpL /UC
m/s m/s Fm XPd
bcs bcs geh rok
solo solo KX4 kM7
s/) s/) dld ZT7
OIS XG
) FZ1
aA)

www.sbcs.org.br/en/2025/08/07/pedology-in-the-face-of-artificial-intelligence-critical-integration-or-illusion-of-
www.sbcs.org.br/2025/08/07/a-pedologia-diante-da-inteligencia-artificial-integracao-critica-ou-ilusao-de-mc



Sociedade Brasileira de
Ciência do Solo

Pesquisar...



Fazer login
(https://associado.sbcs.org.br/)

(https://www.sbcs.org.br)

Associe-se
(https://associado.sbcs.org.br/)



A pedologia diante da inteligência artificial, integração crítica ou ilusão de modernidade?

© Comunicação SBSCS 2(https://www.sbcs.org.br/autor/comunicacaosbcs-org-br/).

📅 07/08/2025 🕒 14:45

José Alexandre M. Demattê¹, Cássio Marques Moquedace¹, Eduardo Couto², Raul R. Poppiel¹, Maria de Lourdes Mendonça-Santos³, Lúcia Helena Cunha dos Anjos⁴, Ricardo Simão Diniz Dalmolin⁵, Carlos R. Espindola⁶, Elpídio Inácio Fernandes-Filho⁷, Jaime Almeida⁸, João Carlos Ker⁸, Felipe Haenel Gomes⁹, Luiz Toledo Barros Rizzo¹⁰

Consolidação institucional da pedologia no Brasil

A pedologia consolidou-se como disciplina científica a partir dos trabalhos pioneiros de Vasily Dokuchaev, na Rússia, no final do século XIX, ao propor que os solos deveriam ser entendidos como corpos naturais com gênese própria. Essa abordagem inovadora foi posteriormente expandida por Hans Jenny, especialmente em sua obra *Factors of Soil Formation*, publicada em 1941 (Jenny, 1945), que estabeleceu uma base quantitativa para os fatores formadores do solo.

No Brasil, a ciência do solo ganhou impulso a partir da década de 1960, com importantes contribuições de instituições universitárias, do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e do então Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária (DNPEA), vinculado ao Ministério da Agricultura. Com a criação da Embrapa, em 1973, o DNPEA foi transformado no Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (SNLCS), responsável por coordenar os levantamentos sistemáticos de solos em escala nacional. Em 1993, essa estrutura foi

reconfigurada como Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPS), posteriormente denominado Embrapa Solos, promovendo a integração entre conhecimento de campo, metodologias emergentes e políticas públicas de base técnico-científica (Embrapa, 2025). Esse foi um período de forte desenvolvimento institucional, marcado pela padronização de procedimentos e avanços nas áreas de química, mineralogia e física do solo.

A consolidação técnica da pedologia brasileira foi marcada por marcos estruturantes. Em 1963, a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS) publicou o Manual de Métodos de Trabalho de Campo, que orientou sistematicamente a descrição morfológica de perfis em levantamentos pedológicos. Em 1977, o SNLCS organizou o Primeiro Workshop Internacional de Classificação de Solos, cuja publicação, em 1978, consolidou critérios sistemáticos de caracterização e ilustração de perfis representativos. Esses esforços culminaram nas Reuniões de Classificação e Correlação de Solos (RCCs), fundamentais para a construção do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), cuja primeira edição foi lançada em 1999, com nova versão publicada em junho de 2025.

Durante décadas, a pedologia brasileira teve papel essencial na organização do conhecimento sobre os solos do país e na formação de profissionais qualificados, especialmente até os anos 1990. Até então, os levantamentos realizados serviram de base para políticas públicas relevantes, destacando-se o Projeto RadamBrasil, voltado ao mapeamento integrado dos recursos naturais do território nacional. Tal projeto compreendeu a realização de mapas de aptidão agrícola e de capacidade de uso das terras, ainda amplamente utilizados. Por outro lado, entre 1986 e 1992, iniciou-se um processo de desmonte institucional, com a descontinuidade de programas como o próprio RadamBrasil e o enfraquecimento da pedologia em centros como o IAC. Permaneceram ativos apenas núcleos ligados à classificação de solos, como na Embrapa Solos e em grupos de pesquisa das universidades. Esse contexto resultou em um período de incertezas e retração na formação de técnicos especializados. A partir dessa inflexão, a pedologia passou a conviver com o desafio de se reinventar diante das transformações tecnológicas, das novas exigências ambientais e da crescente demanda social por dados de solo mais acessíveis, rápidos e integrados.

Crise, reconfiguração e novas fronteiras da pedologia

Após o ano 2000, com o surgimento de técnicas agrupadas sob o conceito de Mapeamento Digital de Solos (MDS), consolidou-se o modelo SCORPAN (McBratney et al., 2003), marco teórico que ampliou as bases para a predição de atributos e classes de solo por meio de algoritmos e covariáveis ambientais. No entanto, a pedologia não incorporou de forma imediata o MDS, nem assimilou plenamente tecnologias emergentes como o sensoriamento remoto de alta resolução e a geoestatística. Em passos mais lentos que a adoção das fotografias aéreas e do radar nos períodos anteriores, houve resistência por parte de setores técnicos. Fora da academia e dos programas de pós-graduação, os protocolos tradicionais continuaram predominando nos levantamentos de solos: definição de pontos de observação, coletas pontuais, análises laboratoriais convencionais e interpretação personalizada, com elaboração de mapas fortemente ancorada na experiência do pedólogo. Apesar de consolidado, esse modelo apresenta

limitações importantes em termos de interpretabilidade para o usuário, reprodutibilidade dos resultados, custos operacionais, padronização metodológica e atualização cartográfica.

Paradoxalmente, enquanto a pedologia buscava um novo caminho diante desse paradigma em transformação, a demanda da sociedade por informações sobre o solo se intensificava. Temas emergentes como degradação ambiental, segurança alimentar, planejamento territorial e as implicações das mudanças climáticas passaram a exigir respostas mais rápidas, abrangentes e transparentes, o que os métodos tradicionais não conseguiam atender com a mesma agilidade. Essa defasagem ampliou a percepção de que a pedologia estava ficando para trás.

De forma quase simultânea, observou-se uma retração na formação de novos pedólogos. Já em 2002, boletins da SBCS chegaram a levantar a pergunta provocativa: teria a pedologia “morrido”? Essa fase crítica criou uma lacuna estrutural entre a crescente demanda por dados de solo e a capacidade instalada para produzi-los, tanto em escala quanto em diversidade analítica.

Outra questão central diz respeito à forma de apresentação e interpretação dos mapas pedológicos pela sociedade. Até hoje, esses mapas não são de fácil compreensão, o que gera resistência ao seu uso, apesar de conterem uma riqueza de informações inquestionável. Há, portanto, um descompasso entre os dados oferecidos pelos mapas pedológicos e as informações que os usuários realmente necessitam para suas decisões cotidianas. Por exemplo, é amplamente reconhecida a importância da textura e da mineralogia na dinâmica da água e dos solutos no solo, com impactos diretos sobre as plantas e a produtividade agrícola. Trata-se de um conhecimento consolidado, fruto de décadas de pesquisa, com destaque internacional para a contribuição brasileira no estudo de solos tropicais. No entanto, até que ponto esse conhecimento foi efetivamente traduzido em informações acessíveis para o agricultor? Será que ele é aplicado, por exemplo, nas recomendações de adubação e manejo da fertilidade com base nesses atributos, ou, mais distante ainda, a partir da simples informação da classe de solo?

Em geral, os atributos e tipos de solos ainda são utilizados de forma empírica, não quantitativa, muitas vezes por atores que detêm conhecimento local valioso, e que não pode ser negligenciado ou perdido. É necessário resgatar esse saber, tanto tradicional quanto científico, e colocá-lo a serviço da sociedade. Afinal, qual projeto científico hoje não demanda a vinculação entre seu produto final e a comunidade? Nesse sentido, a inteligência artificial (IA) pode oferecer soluções promissoras para esse desafio de tradução e aplicabilidade do conhecimento pedológico.

A agricultura de precisão, por exemplo, conseguiu integrar o conhecimento da fertilidade do solo com ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), associando propriedades do solo ao georreferenciamento para otimizar o manejo agrícola. Pode-se dizer que a área de fertilidade do solo “fez sua lição de casa” e conseguiu estabelecer uma comunicação mais direta com os usuários. Por outro lado, ainda são raros os trabalhos que relacionam mapas pedológicos com ambientes de produção, zonas de manejo, épocas de plantio e colheita, produtividade, escolha de terras e planejamento conservacionista, como é o caso do ZARC (Zoneamento de Risco Climático). Tampouco se encontram abordagens

integradas entre mineralogia, adubação, planejamento de irrigação, temperatura da superfície do solo e impactos climáticos. Diante do avanço das geotecnologias, a pedologia tem hoje a oportunidade de ampliar significativamente sua interface com a sociedade, como fez em seus primórdios. Nesse cenário, a IA desponta não como uma ruptura com o passado, mas como um desdobramento coerente de sua trajetória científica. A IA surge como uma evolução natural, capaz de amplificar a capacidade analítica da disciplina e fortalecer sua interface com a prática.

Assim, a pedologia encontra-se em um momento de mudança paradigmática, em que poderá integrar décadas de conhecimento acumulado com ferramentas computacionais avançadas, mantendo sua essência científica enquanto expande exponencialmente sua capacidade de contribuição à sociedade. Os dados de solos oferecem informações técnicas que permitem inferências sobre sua variabilidade espacial, além de fornecer subsídios para novas soluções em contextos agroambientais. Mapas pedológicos em escalas mais detalhadas permitem observar a distribuição de atributos intrínsecos do solo que afetam diretamente o desempenho das lavouras e a resiliência dos ecossistemas. No entanto, essa perspectiva foi pouco explorada ao longo da trajetória da pedologia brasileira (Figura 1).

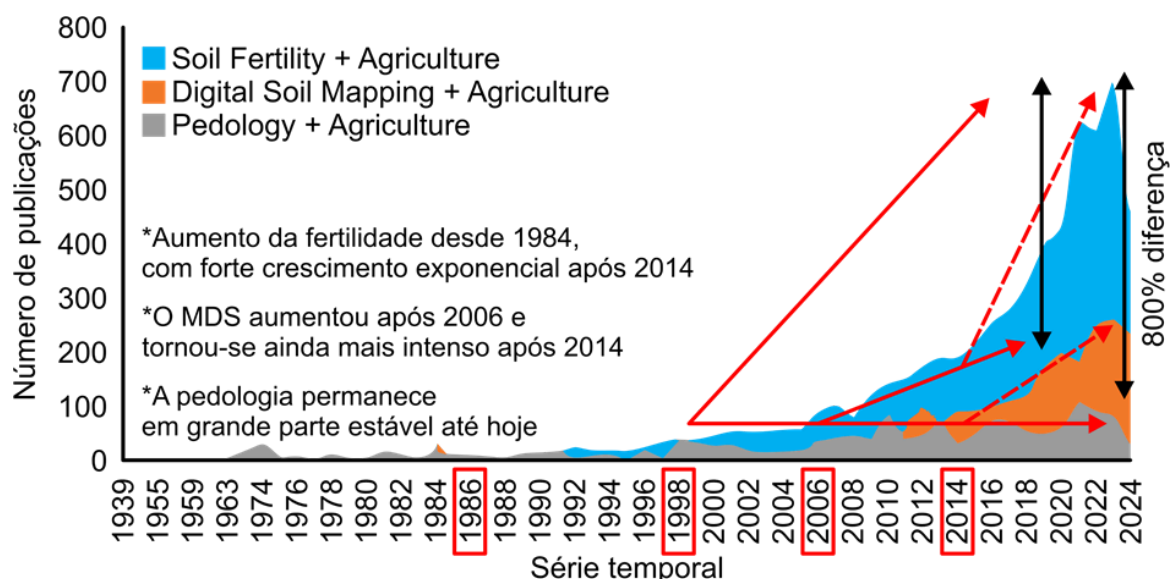


Figura 1. Evolução do número de publicações científicas relacionando Agricultura com três diferentes enfoques da Ciência do Solo: Fertilidade do Solo (azul), Mapeamento Digital de Solos (laranja) e Pedologia (cinza), no período de 1939 a 2024. Fonte: Modificado de Demattê et al. (2025).

Observa-se, inclusive, um descompasso marcante entre a produção de conhecimento pedológico e sua transferência à sociedade, tendo como exemplo quando comparada à área de fertilidade do solo. Esta última soube compreender os anseios sociais e se manteve à frente da demanda, consolidando-se como referência técnica aplicada. Evidência disso é que as publicações científicas com os termos fertilidade + agricultura superaram em até 700% aquelas com pedologia + agricultura nos anos mais recentes (Figura 1). Esse distanciamento não se limita à quantidade de publicações, mas também revela a capacidade de diálogo da ciência com as demandas do campo.

Por outro lado, é interessante notar que a chegada da pedometria ao cenário brasileiro, a partir de 2002, marca um ponto de inflexão. A partir de 2014, observa-se um crescimento expressivo nas publicações envolvendo mapeamento digital de solos (DSM) e agricultura, justamente o período em que se acentuou a adoção de geotecnologias e algoritmos preditivos. A Figura 1 evidencia esse salto, indicando que a incorporação de abordagens quantitativas vem servindo como vetor de renovação da pedologia, aproximando-a novamente dos desafios contemporâneos da agricultura e da sustentabilidade ambiental.

Transformações digitais na pedologia: o papel estratégico da inteligência artificial

A incorporação da inteligência artificial (IA) na pedologia representa uma mudança paradigmática que vai além da modernização tecnológica. A visão holística do solo, que considera forma, função, gênese e paisagem, torna-se ainda mais relevante diante da demanda por soluções sustentáveis, integradas e baseadas em dados. Ferramentas de IA passaram a processar grandes volumes de informação, identificar padrões complexos e propor inferências sobre gênese, diferenciação de horizontes, agrupamentos morfológicos e até padrões espaciais dificilmente perceptíveis ao olhar humano.

Essas inovações promovem uma aceleração significativa de análises, redução da subjetividade, como na leitura de cor e estrutura do solo (Gómez-Robledo et al., 2013; Han et al., 2016; Mancini et al., 2020; Stiglitz et al., 2016), e maior capacidade de integração de múltiplas fontes de dados, como imagens de satélite, sensores próximos, modelos digitais de elevação, dados climáticos e observações de campo. Isso resulta em sistemas de decisão mais robustos e abrangentes. Nenhum desses pressupostos, entretanto, substitui as incursões a campo, que seguem sendo indispensáveis para a observação direta, coleta de amostras e validação das predições.

Algoritmos de machine learning, e mais recentemente de deep learning, conseguem identificar padrões espectrais sutis que correspondem a propriedades químicas específicas. Redes neurais convolucionais já analisam imagens de micromorfologia com precisão superior à interpretação visual humana. Outros algoritmos integram dados de sensores próximos, imagens orbitais e séries temporais climáticas para prever propriedades do solo em escala de paisagem. Esse avanço amplia a capacidade analítica da pedologia na compreensão e modelagem de sistemas edáficos.

Em termos metodológicos, esse novo contexto da pedologia pode ser sintetizado por uma cadeia lógica fundamental: sensor → modelo → propriedade estimada. Trata-se de um fluxo inferencial no qual os dados gerados por sensores (de reflectância, relevo, clima, etc.) são processados por algoritmos de aprendizado de máquina, que por sua vez produzem estimativas de atributos do solo, como textura, carbono orgânico, cor ou classe taxonômica. Essa estrutura, embora tecnologicamente sofisticada, exige os mesmos princípios da boa ciência: rigor amostral, validação estatística e, sobretudo, interpretação pedológica.

A eficácia dos modelos depende, portanto, tanto da qualidade dos dados quanto da capacidade de julgamento dos profissionais envolvidos. Os modelos permitem, ainda, quantificar incertezas associadas aos mapeamentos convencionais, nos

quais o fator humano, ao mesmo tempo que é essencial, carrega percepções muitas vezes enviesadas. Assim, os modelos representam um avanço significativo sobre o mapeamento tradicional, viabilizando mapas mais confiáveis, informativos e passíveis de atualização contínua diante de novas informações ou avanços computacionais.

Além da predição de atributos, a IA já vem sendo aplicada em delimitação de zonas de manejo, previsão de classes taxonômicas, detecção de outliers em bancos de dados de solos e no planejamento amostral guiado por incerteza, com resultados promissores. Tais aplicações reforçam sua utilidade não apenas como ferramenta de análise, mas como elemento ativo no processo decisório agroambiental.

Por fim, cabe reconhecer que o uso de IA na pedologia também impõe novos desafios epistemológicos. Exige formação técnica sólida, domínio de estatística e programação, mas, principalmente, a manutenção da lógica pedológica como eixo de interpretação dos resultados. Há ainda limitações metodológicas relevantes: modelos treinados com dados localizados tendem a falhar em extrapolações geográficas amplas, e algoritmos mal calibrados podem reforçar os mesmos vieses que se busca superar. Ou seja, a IA não substitui o pedólogo, mas amplia exponencialmente seu alcance, desde que bem orientada e interpretada. A IA não substitui as incursões de campo, que permanecem insubstituíveis para revelar, em sua plenitude, a variabilidade dos solos e ancorar as interpretações em observações diretas da paisagem.

Riscos e desafios críticos

O principal risco da aplicação da inteligência artificial à pedologia não reside na tecnologia em si, mas no uso acrítico de seus resultados. Quando modelos automatizados são tomados como verdades absolutas, sem a mediação do julgamento pedológico, corre-se o risco de padronizar a paisagem, ignorar singularidades morfológicas e tomar decisões baseadas apenas no que é mais fácil de medir ou modelar, e não necessariamente no que é mais relevante do ponto de vista pedológico. Daí a importância da presença de um profissional com sólida compreensão das relações entre os fatores de formação dos solos e sua expressão no campo.

Além disso, assim como a pedologia tradicional, a própria lógica da IA pode induzir a vieses metodológicos. O que se considera um “dado relevante” tende a ser definido pela disponibilidade digital, e não pela representatividade científica. Isso se torna especialmente crítico em regiões pouco amostradas ou com escassez de dados legados. Por outro lado, a subjetividade inerente à interpretação humana, sem apoio das tecnologias disponíveis, frequentemente mais objetivas e replicáveis, também pode gerar julgamentos de alta variabilidade, como ocorre em atributos sensíveis à percepção, como a cor do solo, historicamente determinada por observação visual direta.

Um estudo clássico de Campos & Demattê (2004) revelou que quatro pedólogos experientes, ao analisarem as mesmas amostras, chegaram a classificações divergentes. As diferenças não se deviam apenas a critérios interpretativos, mas também a fatores fisiológicos, como a idade dos nervos ópticos, que afetam a percepção visual da cor. Esse exemplo evidencia o grau de subjetividade

envolvido, mesmo entre especialistas, e reforça o papel dos sensores ópticos como aliados na busca por maior objetividade, desde que acompanhados de interpretação contextual. Esse desafio é ainda mais relevante no Brasil, onde o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) adota a cor como critério central de distinção taxonômica em níveis hierárquicos como o de subordem e, indiretamente, até mesmo no nível de ordem, como na definição de horizonte A chernozêmico. Assim, a cor, embora acessível e historicamente útil, também carrega uma carga subjetiva que precisa ser tecnicamente qualificada, especialmente frente às exigências contemporâneas de padronização e rastreabilidade.

Outro estudo ilustra bem a tensão entre julgamento técnico e ferramentas digitais. Em Bazaglia Filho et al. (2013), cinco pedólogos experientes realizaram um mapa pedológico de uma mesma área com acesso às mesmas ferramentas, resultando em mapas com graus de variação, ainda que coerentes entre si. No entanto, quando um único pedólogo elaborou um novo mapa para a mesma área, agora com apoio intensivo de geotecnologias e dados digitais, mas mantendo o julgamento pedológico como instância final, a acurácia da validação aumentou consideravelmente.

Esse é um exemplo eloquente de como as novas tecnologias, longe de substituírem o pedólogo e o campo, ampliam sua capacidade interpretativa e reduzem parte importante da subjetividade. Mais do que automatizar, trata-se de potencializar a decisão técnica, com base em dados e modelos, mas sem renunciar à lógica pedológica que sustenta o conhecimento do solo como corpo natural.

Ainda que os mapas pedológicos tradicionais representem um patrimônio técnico e científico inestimável, é preciso reconhecer que historicamente carecem de métricas formais de acurácia ou incerteza, tanto em escala global quanto espacial. As associações entre classes de solo e unidades de mapeamento foram, via de regra, baseadas na experiência e julgamento do pedólogo, o que, embora valioso, é fundamentalmente subjetivo e raramente passível de validação quantitativa. Em geral, a incerteza dessas associações nunca foi estimada nem comunicada ao usuário final.

Com a pedometria, abre-se a possibilidade de quantificar o grau de confiança nas estimativas, utilizando ferramentas como intervalos de predição, bandas de confiança ou métodos mais recentes, como o *conformal prediction* (Balasubramanian et al., 2014; Kakhani et al., 2024) ou a área de aplicabilidade dos mapas (area of applicability, AOA) (Meyer & Pebesma, 2021). Esses recursos permitem informar, ponto a ponto, onde o modelo é mais seguro e onde exige cautela, promovendo maior transparência e utilidade dos produtos gerados. Esse avanço representa não uma ruptura com a tradição, mas uma complementação metodológica essencial para tornar os mapas pedológicos mais robustos, auditáveis e aderentes às exigências atuais de planejamento territorial, monitoramento ambiental e governança de recursos.

No entanto, a dependência excessiva de dados digitais pode criar vulnerabilidades metodológicas significativas. A transparência nos processos de inferência exige mais do que acurácia: exige a incorporação explícita de métricas de incerteza.

Mapas que indicam não apenas o que se estima, mas com que grau de confiança, são fundamentais para decisões prudentes em planejamento territorial, agrícola ou ambiental.

No contexto brasileiro, marcado por uma diversidade pedológica extrema e forte desigualdade na distribuição espacial de dados, existe o risco de se construírem modelos que apresentam desempenho robusto em algumas regiões, mas falham de forma crítica em outras. Portanto, há nesse cenário amplo espaço para pesquisa e desenvolvimento de metodologias adaptadas às condições tropicais, tal como ocorreu com a criação e evolução do SiBCS. A inteligência artificial, nesse sentido, pode acelerar respostas e apontar caminhos para modelos mais consistentes, desde que orientada por critérios técnicos sólidos e sensíveis ao contexto.

A história da pedologia mostra que sua força reside justamente na capacidade de incorporar inovações técnicas sem abrir mão da análise crítica. Nenhuma transição, do campo à aerofotogrametria, das cartas topográficas aos mapas digitais, ou do uso de imagens de radar, substituiu o pedólogo como intérprete da distribuição dos solos na paisagem, tampouco o trabalho de campo como etapa essencial para a execução e validação dos mapeamentos.

Esse papel mediador é antigo. Um exemplo marcante está no manual do SNLCS (Embrapa, 1988), que orientava a conversão dos estoques de carbono orgânico estimados por suas diretrizes para os valores compatíveis com o Soil Conservation Service (SCS), utilizando o fator 1,724, o inverso de 0,58, como coeficiente de correção. Tal ajuste não era meramente matemático: demandava julgamento técnico sobre a origem dos dados, seu método de obtenção e a finalidade do uso. Com a inteligência artificial, o princípio permanece: ela deve ampliar a atuação do pedólogo, jamais substituí-lo.

Críticas epistemológicas e desafios conceituais

A integração da inteligência artificial na pedologia suscita questionamentos epistemológicos fundamentais sobre a natureza do conhecimento científico do solo. Como em toda área com práticas consolidadas, é natural que abordagens tecnológicas encontrem resistência. Esse ceticismo, quando fundamentado, é saudável: obriga o novo a se provar útil e tecnicamente robusto. O problema surge quando essa resistência é movida por desconhecimento ou apego cego à tradição. Há, por exemplo, quem ainda desconheça a possibilidade de visualizar imagens de satélite em 3D, recurso já trivial em diversos softwares. Negar isso ou desqualificar um mapa pedológico digital sem indicar a origem dos dados ou conhecer a metodologia aplicada é, no mínimo, um erro conceitual, e não contribui em nada para o debate científico.

A recusa automática de novas ferramentas, apenas porque representam mudança, não se sustenta. Técnicas distintas, aplicadas a escalas, dados e propósitos diferentes, podem gerar representações diversas do solo, todas cientificamente válidas. Ignorar isso é confundir rigor técnico com rigidez. O tradicionalismo, quando se recusa a admitir a legitimidade de métodos alternativos bem fundamentados, deixa de ser prudência e passa a ser obstáculo.

Esse conflito se expressa com clareza na classificação automatizada de solos. Algoritmos de machine learning categorizam perfis com base em grandes volumes de dados espectrais, morfológicos e legados. No entanto, operam por correlações estatísticas, não pela compreensão dos processos pedogenéticos. Isso significa que uma classificação pode estar estatisticamente correta e pedologicamente equivocada, especialmente quando fatores não mensuráveis, como história da paisagem, transições abruptas ou processos específicos, são fundamentais. A ilusão da objetividade algorítmica pode, assim, mascarar interpretações erradas.

A discussão vai além da técnica. Ela atinge o coração epistemológico da pedologia. A ciência do solo sempre se baseou na articulação entre observação sistemática, conhecimento teórico e interpretação contextual. Esse processo, muitas vezes acusado de “subjetivo”, constitui uma forma avançada de análise, baseada na experiência acumulada e sensível à complexidade dos ambientes naturais. A modelagem digital, ao invés de suprimir esse saber, deveria se beneficiar dele. Mas para isso, é preciso que o conhecimento pedológico não seja tratado como herança passiva, e sim como ativo interpretativo fundamental.

Modelos de aprendizado profundo, ao revelarem padrões ocultos entre espectros, variáveis ambientais e atributos do solo, têm sugerido agrupamentos que não coincidem com as classes da SiBCS. Em outros casos, inferem processos pedogenéticos não descritos anteriormente, com base na modelagem integrada de covariáveis. A IA, nesse sentido, vai além de aplicar conhecimento: ela sugere hipóteses, antecipa perguntas, desafia paradigmas. Isso não deve ser temido, mas compreendido. Trata-se de um convite ao diálogo entre formas distintas de produzir ciência, e não de uma substituição.

Se a pedologia quiser manter sua relevância, deve assumir essa provocação com espírito crítico e abertura. O conhecimento acumulado pelos pedólogos, sobre gênese, morfologia, padrões espaciais e transições não lineares, pode ser essencial em diversas etapas da modelagem: escolha de variáveis, construção de camadas interpretadas, definição de regras baseadas em conhecimento (RBS), validação contextual de mapas. Ignorar esse saber é ceder espaço a heurísticas automatizadas que, embora eficientes, muitas vezes operam sem qualquer noção dos processos que realmente formam o solo.

O maior risco está na formação das novas gerações. Se os currículos priorizarem apenas competências computacionais, em detrimento da vivência de campo e da reflexão conceitual, pode ocorrer uma ruptura preocupante entre inovação tecnológica e saber pedológico. A IA, por mais avançada que se torne, continuará dependente da análise crítica humana para validar, interpretar e contextualizar seus resultados.

A saída não está em rejeitar a tecnologia nem em conservar métodos antigos por nostalgia. O desafio é construir uma ciência híbrida, onde conhecimento empírico, teórico e computacional se encontrem de forma complementar. A precisão dos algoritmos não deve apagar a experiência do campo. Ao contrário: deve potencializá-la. Só assim a pedologia continuará sendo uma ciência capaz de explicar o solo, e não apenas descrevê-lo por correlação.

Perspectiva de integração

Observa-se hoje uma multiplicidade de sensores, métodos matemáticos e algoritmos de inteligência artificial que ampliam as possibilidades de aquisição, análise e interpretação de dados sobre o solo. Esses sensores podem estar no campo ou no laboratório, na mão do pedólogo, embarcados em drones, aviões ou satélites, fornecendo, de forma rápida e massiva, informações sobre o tipo de solo, localização e até análises indiretas de seus atributos. É fundamental, contudo, reforçar que tais técnicas exigem verificação, padronização e validação em campo, este último ainda o melhor meio de compreender a realidade pedológica. A técnica digital, quando acoplada à IA, permite estudar o solo em múltiplas escalas, do detalhamento local ao mapeamento regional, sempre de acordo com o objetivo e as perguntas do estudo.

Além disso, a IA tem a capacidade de integrar profissionais de diferentes disciplinas. Por ser uma tecnologia transversal, ela permite a análise de um mesmo conceito a partir de dados e métodos oriundos de campos diversos. Essa conexão se evidencia, por exemplo, no estudo da reflectância do solo e sua relação com os minerais presentes, com propriedades físico-químicas e com processos biológicos que afetam diretamente o ciclo do carbono e, em escala maior, o clima. A temperatura da superfície, grandeza medida por sensores remotos, também está fortemente relacionada ao uso e manejo do solo, à sua mineralogia e estrutura. Só nessa cadeia de raciocínio se entrelaçam pedologia, sensoriamento remoto, microbiologia, física do solo, ecologia e climatologia. São relações que dificilmente emergiriam de abordagens isoladas ou puramente empíricas. A IA tem o potencial de antecipar essas interações, revelar padrões ocultos e fornecer diretrizes iniciais para a investigação. Mas é o ser humano quem interpreta, formula hipóteses e decide o rumo. A criatividade e a capacidade de compreender exceções permanecem insubstituíveis. A IA pode sugerir caminhos; quem traça o percurso é o pedólogo.

Nesse sentido, iniciativas como o PronaSolos representam uma inflexão institucional promissora, voltada à organização sistemática de dados de solos em escala nacional. No entanto, para que cumpram seu potencial, precisam estar inseridas em um ecossistema digital mais amplo, interoperável e conectado com iniciativas internacionais, como o SoilGrids (Hengl et al., 2017; Poggio et al., 2021), o LUCAS Soil na União Europeia, ou o emergente conceito de SoilPrint (Gobezie & Biswas, 2024), que propõe mecanismos de rastreabilidade e autenticação criptográfica de dados pedológicos. O avanço da pedologia digital não depende apenas da quantidade e qualidade dos dados, mas de uma infraestrutura institucional que os organize, documente, compartilhe e proteja. Isso inclui formatos abertos, metadados padronizados e diretrizes éticas para o uso de informações sensíveis, como dados de propriedades privadas ou terras indígenas. Sem essa governança, comprometem-se não apenas a confiabilidade científica dos produtos gerados, mas também sua legitimidade social.

Nesse cenário, o Brasil já apresenta avanços significativos. Um exemplo notável é o SoilData, repositório público desenvolvido pelo MapBiomass em parceria com o Laboratório de Pedometria da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, alimentado em grande parte pelo projeto FEBR (Repositório Brasileiro Livre para Dados do Solo). Essa iniciativa reúne e harmoniza milhares de análises físico-químicas de solos, atualmente com mais de 11 mil pontos de textura e 12,5 mil de carbono orgânico, todos georreferenciados, padronizados e disponíveis em

formato aberto. Esses dados alimentam diretamente os produtos da plataforma MapBiomass Solo, como os mapas anuais de carbono de 1985 a 2023 e os mapas estáticos de propriedades granulométricas. Trata-se de um exemplo concreto da ciência aberta aplicada à pedologia: com controle de versão, rastreabilidade, licenciamento transparente (CC-BY) e integração com padrões internacionais como o Dataverse. O SoilData não é apenas uma base técnica robusta, é um modelo de governança pública de dados do solo, com potencial de se tornar referência institucional no país e canal de diálogo direto com iniciativas globais.

Exemplo similar é a Biblioteca Espectral de Solos do Brasil (BESB), que atualmente reúne mais de 50 mil amostras espectrais doadas por 81 colaboradores de 69 instituições, abrangendo todos os 26 estados brasileiros e o Distrito Federal. Trata-se da maior biblioteca espectral pública do mundo, composta por dados nas faixas do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (VIS-NIR-SWIR), também na faixa do infravermelho médio (Mid-IR). Essa amplitude espectral, aliada à diversidade pedoclimática representada, fornece uma base única para o treinamento de modelos de aprendizado de máquina voltados à predição de atributos pedológicos, ampliando a aplicabilidade da espectroscopia em escalas regionais e nacionais. Mais do que um repositório técnico, a BESB reflete um esforço coletivo de ciência colaborativa, integrando dados de instituições de pesquisa, universidades e agências públicas. Em sinergia com o SoilData, constitui um alicerce da pedometria nacional e um ponto de partida essencial para iniciativas estruturantes que buscam consolidar a ciência do solo digital no país.

Em 2025, outro avanço institucional importante foi a aprovação do primeiro Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) dedicado aos solos, o INCT Solos do Brasil, com foco na caracterização e modelagem de atributos pedológicos em múltiplas escalas. O projeto articula laboratórios e universidades de diferentes regiões, promovendo inovação metodológica e formação de pessoal qualificado. Seu escopo inclui o uso de espectroscopia, mapeamento digital, aprendizado de máquina e integração com redes internacionais, aproximando diretamente a agenda científica brasileira das reflexões discutidas neste trabalho. Trata-se de uma oportunidade concreta para operacionalizar a pedologia digital com base em dados de alta qualidade, protocolos harmonizados e articulação entre tradição e tecnologia.

Um desdobramento particularmente promissor da pedologia digital é a mobilidade tecnológica, viabilizada pelo avanço de sensores em dispositivos móveis e da chamada TinyML, aprendizado de máquina embarcado em microcontroladores de baixo consumo. Tecnologias que antes eram restritas a laboratórios ou servidores dedicados agora chegam ao campo, operando em tempo real e com custos acessíveis. Aplicativos móveis capazes de capturar espectros, interpretar imagens de perfis ou estimar atributos com base em modelos pré-treinados estão em desenvolvimento e podem transformar radicalmente a extensão rural, o monitoramento participativo e a coleta cidadã de dados. Essa descentralização amplia o alcance da pedologia digital para além dos centros de pesquisa, tornando-a uma ferramenta concreta para agricultores, técnicos de campo, escolas e comunidades. Conectividade, interoperabilidade e ciência cidadã passam a caminhar juntas.

À medida que essa nova pedologia se estrutura, a governança dos dados torna-se um desafio ético central. A coleta, modelagem e disseminação de informações do solo envolve temas sensíveis: propriedade, consentimento, territorialidade e acesso. É urgente que o Brasil discuta o conceito de “direito ao dado pedológico”, reconhecendo o solo como um bem comum, mas com usos e contextos localmente específicos. Surge, inclusive, a noção de privacidade espectral, o direito de agricultores, comunidades tradicionais ou povos indígenas de controlar a inferência sobre seus solos a partir de dados públicos, especialmente os espectrais. Em muitos casos, o solo é inferido, mapeado e interpretado sem qualquer consulta às populações locais. Isso exige mecanismos de governança participativa, rastreabilidade dos algoritmos, transparência nas inferências e diretrizes claras de anonimização e licenciamento. Sem essas salvaguardas, corre-se o risco de construir uma infraestrutura tecnocientífica poderosa, mas alheia a princípios de justiça territorial, soberania e equidade.

Conclusão: um chamado à formação integrada

A inteligência artificial não substitui a inteligência humana, ela depende dela. Pode processar dados, mas não compreende paisagens. Pode identificar padrões, mas não formula perguntas relevantes. Pode aprender com milhões de observações, mas não interpreta processos nem julga contextos. O verdadeiro desafio, portanto, não é tecnológico, é formativo.

Precisamos preparar pedólogos capazes de dialogar com algoritmos sem abrir mão do pensamento pedológico. Profissionais que dominem tanto o campo quanto o código. Que saibam ler o solo com a faca pedológica e com o pixel. Persistir em práticas tradicionais apenas para manter o status quo, ignorando as tecnologias hoje disponíveis, é negligência. Mas seguir cegamente o que a máquina sugere, sem leitura crítica nem compreensão pedológica, é flertar com a ingenuidade, ou com a má-fé.

O desafio está em formar pedólogos letrados em IA e cientistas de dados letrados em pedologia. Só assim será possível garantir que os solos continuem a ser compreendidos em sua complexidade, com rigor técnico, sensibilidade interpretativa e compromisso com o território. A IA deve ser vista como ferramenta poderosa, mas delicada em sua aplicação: em mãos bem formadas, amplia a visão, revela relações ocultas e fortalece a ciência pedológica. Como qualquer ferramenta, depende da formação de quem a opera.

O futuro da pedologia não está em escolher entre tradição ou inovação, mas em formar profissionais que dominem ambas. Isso inclui investir em programas nacionais diretamente conectados aos anseios da população, com linguagem acessível e foco na aplicabilidade. Como já se disse: “um mapa de solos pode ser bonito, mas se ficar pendurado na parede, de nada servirá”. A criação e o financiamento de iniciativas que dialoguem com as demandas sociais são fundamentais, pois o conhecimento sobre os solos impacta diretamente a agricultura, o clima, a conservação e o ordenamento territorial.

A criação do PronaSolos teve esse propósito: criar demanda e transformar o conhecimento pedológico em política pública. No entanto, seu avanço tem sido limitado, em grande parte pela falta de financiamento para levantamentos em escalas detalhadas, imprescindíveis para a tomada de decisão. Atualmente,

apenas cerca de 5% do território nacional possui mapeamento em escalas iguais ou maiores que 1:100.000. Paralelamente, a evolução do SiBCS e projetos específicos, como os da FINEP e do CNPq, têm contribuído para a padronização de protocolos e metodologias.

Na formação de pessoal, destaca-se a Rede UNISOLOS (<https://unisolos.ufrrj.br/> (<https://unisolos.ufrrj.br/>)), composta por quatro universidades com sólida experiência em solos e geoprocessamento: UFRRJ, UFMG, UFV e UFRA. Essa rede ofereceu o primeiro curso de especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos, na modalidade a distância, pelo sistema CAPES/UAB, uma iniciativa estratégica para ampliar o alcance e a qualificação técnica nacional.

O Projeto Radam representou um divisor de águas em sua época. Por que não avançar, agora, em uma nova empreitada comum, que una tradição e tecnologia, campo e algoritmo? A ciência do solo precisa estar a serviço da sociedade, compreendendo suas necessidades e devolvendo conhecimento útil, claro e aplicável.

Em 2025, após mais de três décadas de avanços em inteligência artificial, não se pode mais ignorar o impacto transformador dessas tecnologias na pedologia. Talvez seja hora de reconhecer que a ciência do solo de hoje não é apenas uma versão moderna da disciplina tradicional, tampouco uma ruptura completa. Ela é uma ciência em movimento, que historicamente sempre incorporou as melhores ideias, ferramentas e conceitos disponíveis. A IA não é seu fim, mas seu novo capítulo.

Considerações finais

Esta reflexão pretende contribuir para um debate necessário e urgente na comunidade pedológica brasileira. A transformação tecnológica já está em andamento, e cabe aos profissionais do solo direcioná-la com criticidade, responsabilidade e visão estratégica. A pedologia do futuro será aquela capaz de integrar inovação e tradição, ampliando suas ferramentas analíticas sem renunciar a seus fundamentos conceituais e de seu compromisso com o território.

O desafio desta geração é formar pedólogos e pedometristas que atuem como guardiões do conhecimento acumulado, mas também como protagonistas na construção da pedologia agregada a técnicas digitais. Profissionais preparados para operar entre o campo e o código, entre o perfil e o algoritmo, capazes de dialogar com diferentes áreas do conhecimento, da geoinformação à microbiologia, da ecologia à ciência de dados, com domínio técnico e postura crítica.

Essa nova pedologia, ancorada na pedometria, deve assumir seu papel estratégico na sociedade brasileira: contribuir com diagnósticos confiáveis, apoiar políticas públicas fundamentadas, subsidiar ações de planejamento territorial e promover a governança ambiental. Mas precisa também ser ética, transparente e soberana no uso das tecnologias e dos dados que manipula.

O futuro da pedologia não está em escolher entre tradição ou inovação, mas em cultivar profissionais que saibam combinar ambas com inteligência, consciência e propósito público.

Sobre os autores: ¹Universidade de São Paulo (USP) | Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) | GEOCiS – Grupo de Geotecnologias em Ciência do Solo – Pedologia e Geotecnologias; ²Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) – Pedologia; ³EMBRAPA Solos | Rio de Janeiro, RJ – Pedometria; ⁴Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) | Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Seropédica, RJ – Pedologia; ⁵Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) | GEPEd – Grupo de Estudos em Pedologia e Pedometria; ⁶Universidade de São Paulo (USP) | Departamento de Geografia; Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro; Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Agrícola e Instituto de Geociências, Pedologia e Geomorfologia; ⁷Universidade Federal de Viçosa (UFV) | Laboratório de Pedometria e Geoprocessamento (LabGeo) – Pedometria e Geoprocessamento; ⁸Universidade Federal de Viçosa (UFV) – Pedologia; ⁹Universidade Federal de Lavras (UFLA), Escola de Ciências Agrárias de Lavras (ESAL) – Pedologia; ¹⁰Engenheiro Agrônomo- Pedologia.

Referências

- Balasubramanian, V., Ho, S. S., & Vovk, V. (2014). Conformal Prediction for Reliable Machine Learning: Theory, Adaptations and Applications. In *Conformal Prediction for Reliable Machine Learning: Theory, Adaptations and Applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-00234-7>
- Bazaglia Filho, O., Rizzo, R., Lepsch, I. F., do Prado, H., Gomes, F. H., Mazza, J. A., & Demattê, J. A. M. (2013). Comparação entre mapas de solos detalhados obtidos pelos métodos convencional e digital em uma área de geologia complexa. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 37(5), 1136–1148. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500003>
- Campos, R. C., & Demattê, J. A. M. (2004). Soil color: Approach to a conventional assessment method in comparison to an automatization process for soil classification. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 28(5), 853–863. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832004000500008>
- Embrapa. (1988). *Definição e notação de horizontes e camadas do solo*. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/338493/1/SNLCS-DOC-3-1988.pdf>
- Embrapa. (2025). *Embrapa Solos – Portal Embrapa*. <https://www.embrapa.br/solos>
- Gobezie, T. B., & Biswas, A. (2024). Preserving soil data privacy with SoilPrint: A unique soil identification system for soil data sharing. *Geoderma*, 442, 116795. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2024.116795>
- Gómez-Robledo, L., López-Ruiz, N., Melgosa, M., Palma, A. J., Capitán-Vallvey, L. F., & Sánchez-Marañón, M. (2013). Using the mobile phone as munsell soil-colour sensor: An experiment under controlled illumination conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99, 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.002>
- Han, P., Dong, D., Zhao, X., Jiao, L., & Lang, Y. (2016). A smartphone-based soil color sensor: For soil type classification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 232–241. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.024>

Hengl, T., De Jesus, J. M., Heuvelink, G. B. M., Gonzalez, M. R., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*, 12(2), e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>

Jenny, H. (1945). Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. *Geographical Review*, 35(2), 336. <https://doi.org/10.2307/211491>

Kakhani, N., Alamdar, S., Kebonye, N. M., Amani, M., & Scholten, T. (2024). Uncertainty Quantification of Soil Organic Carbon Estimation from Remote Sensing Data with Conformal Prediction. *Remote Sensing 2024*, Vol. 16, Page 438, 16(3), 438. <https://doi.org/10.3390/RS16030438>

Mancini, M., Weindorf, D. C., Monteiro, M. E. C., de Faria, Á. J. G., dos Santos Teixeira, A. F., de Lima, W., de Lima, F. R. D., Dijair, T. S. B., Marques, F. D. A., Ribeiro, D., Silva, S. H. G., Chakraborty, S., & Curi, N. (2020). From sensor data to Munsell color system: Machine learning algorithm applied to tropical soil color classification via NixTM Pro sensor. *Geoderma*, 375, 114471. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114471>

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](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)

Meyer, H., & Pebesma, E. (2021). Predicting into unknown space? Estimating the area of applicability of spatial prediction models. *Methods in Ecology and Evolution*, 12(9), 1620–1633. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13650>

Poggio, L., De Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil*, 7(1), 217–240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>

Stiglitz, R., Mikhailova, E., Post, C., Schlautman, M., & Sharp, J. (2016). Evaluation of an inexpensive sensor to measure soil color. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.014>

Tags: [ciência do solo](https://www.sbcs.org.br/tag/ciencia-do-solo/) (<https://www.sbcs.org.br/tag/ciencia-do-solo/>).



International
Union of
Soil Sciences



Sociedad
Latinoamericana
de La Ciencia
del Suelo
S L C S



Sociedade
Brasileira para o
Progresso da Ciência