



## Pedogênese e taxonomia: retrospectiva histórica e cenários futuros

*Pedogenesis and taxonomy: historical retrospective and future scenarios*

Joaquim Ernesto Bernardes Ayer<sup>1</sup> ; Luca Lämmle<sup>2</sup> ; Archimedes Perez Filho<sup>2</sup> ; Bruno Araújo Torres<sup>2</sup> ; Felipe Gomes Rubira<sup>3</sup> ; Guilherme Henrique Expedito Lense<sup>3</sup> ; Derielsen Brandão Santana<sup>3</sup> ; Vinícius Borges Moreira<sup>4</sup> ; Ronaldo Luiz Mincato<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro Universitário de Paulínia (UNIFACP), Paulínia, SP, Brasil.

<sup>2</sup>Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, Brasil.

<sup>3</sup>Instituto de Ciências da Natureza, Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL), MG, Brasil.

<sup>4</sup>Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, Brasil.

E-mail: lucalamml@ige.unicamp.br (LL); archi@ige.unicamp.br (APF);

b229463@dac.unicamp.br (BAT); felipe.rubira@unifal-mg.edu.br (FGR);

guilherme.lense@sou.unifal-mg.edu.br (GHEL); derielsen.santana@sou.unifal-mg.edu.br (DBS);

vinicius.moreira@unesp.br (VBM); ronaldo.mincato@unifal-mg.edu.br (RLM).

\*Email para correspondência: joaquimeba@gmail.com

Recebido (Received): 02/10/2023

Aceito (Accepted): 05/04/2024

**Resumo:** Os solos podem ser categorizados, hierarquizados e classificados pelas características físicas, químicas, biológicas e morfológicas comuns. Os sistemas de classificação evoluíram de agrupamentos baseados em critérios diagnósticos comparativos para técnicas de taxonomia menos rígidas, as quais permitiriam a introdução de qualificadores de forma livre. De modo geral, os sistemas de taxonomia de solos evoluíram à medida que os métodos e equipamentos de análises e de coletas de dados ambientais foram aprimorados. Tais avanços propiciaram classificações mais dinâmicas, com agrupamentos cada vez mais específicos e acurados, tornando-as ferramentas indispensáveis à gestão dos recursos naturais de forma eficaz e sustentável. Desta forma, nesta revisão foram destacadas as principais teorias da taxonomia e os processos fundamentais atuantes nos solos nas zonas pedogenéticas mais importantes do mundo. Adicionalmente, as arquiteturas dos principais sistemas de classificação de solos foram comparadas, visando estabelecer relações, diferenças e correspondências. Também foram avaliadas suas aplicações para melhoria das práticas sustentáveis de uso e manejo dos recursos pedológicos. Assim, foi apontado que os sistemas de classificação são ferramentas que devem ser empregadas com uso de padrões internacionais, para suscitar, fiscalizar e promover mudanças sustentáveis de uso e manejo dos solos, pois os impactos ambientais são cada vez mais globais e heterogêneos, e demandam esforços coordenados e coletivos entre os diferentes países.

**Palavras-chave:** Soil Taxonomy; World Reference Base for Soil Resource; Sistema Brasileiro de Classificação de Solo; Référentiel Pédologique.

**Abstract:** Soils can be categorized, ranked, and classified by common physical, chemical, biological, and morphological characteristics. Classification systems have evolved from grouping based on comparative diagnostic criteria to less rigid taxonomy techniques, which allow the introduction of free-form qualifiers. In general, soil taxonomy systems have evolved as methods and equipment for analyzing and collecting environmental data have improved. Such advances provided more dynamic classifications, with increasingly specific and accurate groupings, making them indispensable tools for the management of natural resources in an effective and sustainable way. Thus, in this review, the main theories of taxonomy and the fundamental processes operating in soils at the most important pedogenetic zones in the world were highlighted. Additionally, the architectures of the main soil classification systems were compared, aiming to establish relationships, differences, and correspondences. Their applications for improving sustainable practices in the use and management of pedological resources were also assessed. Thus, it was pointed out that classification systems are tools that must be applied using international standards, to raise, monitor and promote sustainable changes in land use and management, as environmental impacts are increasingly global and heterogeneous, and demand coordinated and collective efforts among different countries.

**Keywords:** Soil Taxonomy; World Reference Base for Soil Resource; Brazilian System of Soil Classification; Référentiel Pédologique.

---

## 1. Introdução

Os solos são formados em distintas condições biofisiográficas e podem ser definidos como uma coleção de corpos naturais dinâmicos, trifásicos e tridimensionais compostos de água, ar e sólidos minerais e orgânicos (EMBRAPA, 2006). São resultados da ação do clima e da biosfera sobre o material de origem, cuja transformação demanda tempo e é influenciada pelo relevo (BRADY; WEILL, 2013, MOREIRA *et al.*, 2022). Os solos podem ser categorizados e hierarquizados em grandes ordens, grupos, famílias e séries de acordo com suas características físicas, químicas e morfológicas comuns (EMBRAPA, 2006).

A humanidade depende dos solos para a produção de alimentos, o estabelecimento de infraestrutura e para a ciclagem biogeoquímica dos elementos e para a manutenção dos ecossistemas terrestres. Ainda, o aumento da população mundial e da demanda por *commodities* da agropecuária causarão maior pressão antrópica sobre os solos (UNFPA, 2013). Dessa forma, o conhecimento e classificação dos solos permite avaliar suas fragilidades e potencialidades em diferentes cenários. A classificação dos solos a partir do agrupamento de critérios diagnósticos sob a perspectiva sistêmica, pode favorecer a compreensão dos fatores que envolvem a sua formação e interação nas diferentes paisagens (CHRISTOFOLETTI, 1999).

O alemão Friedrich Albert Fallou foi o introdutor do termo *Pedologie* na literatura, utilizando-o para investigações sobre os solos em ampla abrangência, onde já empregava sistemas de classificação embasado na natureza dos substratos, demonstrando a maturidade de suas discussões ainda naquele período (FALLOU 1862). De acordo com Espindola (2014) o trabalho pioneiro de Fallou ficou restrito à língua alemã, não sendo divulgado o grande público, somente sendo traduzido décadas mais tarde para o francês e muito recentemente tendo uma versão em português.

O geógrafo e naturalista Vasily Vasil'evich Dokuchaev (1846-1903) foi quem estabeleceu com maior clareza a correlação entre os solos e seus fatores de formação, sistematizando as bases para a classificação pedogenética (DOKUCHAEV, 1879; 1891; 1899; RUSAKOVA; SUKHACHEVA; HARTEMINK, 2022). Tal princípio de agrupamento de processos e tipos pedológicos facilita a manipulação e a interpretação de dados ambientais e permitiu o desenvolvimento de outros sistemas de classificação de solos. Isto melhorou o entendimento da pedogênese, facilitando estabelecer diferentes tipologias, o que se refletiu em melhores práticas agronômicas que passaram a ser receitadas de acordo com sua taxonomia (RUSSELL, 1969; BOCKHEIM; GENNADIYEV, 2000; PATON; HUMPHREYS, 2007; KUHN, 2011; HARTEMINK; BOCKHEIM, 2013).

A criação de sistemas de classificação de solos, como a *Soil Taxonomy* (ST) dos Estados Unidos da América (USDA, 2022), a *World Reference Base for Soil Resource* (WRB) da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO-IUSS, 2014), o *Référentiel Pédologique* da França (AFES, 2008) e o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS) (SANTOS *et al.*, 2018), buscou definir um sistema hierárquico e multicategórico para identificar as características e os padrões de distribuição das zonas de pedogênese. Esse conhecimento surge como resposta para mitigar os impactos ambientais promovidos pelo manejo inadequado dos solos por todo o globo. Manejo que levou, nos EUA, à formação de grandes tempestades de poeira oriundas da erosão, causando sérios prejuízos e que culminou na criação do serviço nacional de proteção do solo (USDA, 1999). De tal modo, esses sistemas permitiram a utilização mais sustentável dos recursos pedológicos, tanto no que diz respeito às características edafológicas, melhorando a produtividade agropecuária, quanto do ponto de vista da conservação dos processos e serviços ambientais prestados pelos solos, como no controle de erosão, manutenção e recarga dos aquíferos e de áreas úmidas, crescimento da vegetação, regulação climática, entre outros (BRADY; WEIL, 2013; ESPÍNDOLA, 2014; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017).

Neste trabalho, as classificações mencionadas foram utilizadas como base para uma revisão e análise comparativa, por considerar que estas propostas são as principais sistematizações no âmbito da classificação de solos mundiais e as demais são derivações destes sistemas. Em virtude disso, o objetivo do presente trabalho é fornecer um panorama histórico da evolução epistemológica da estrutura taxonômica dos principais sistemas de classificação pedológica.

## 2. Metodologia

Este estudo busca destacar as bases teóricas e metodológicas que levaram à criação e desenvolvimento dos sistemas de taxonomia dos solos. Para tanto, foram levantados estudos teóricos e epistemológicos entre artigos, livros e metadados sobre a ciência do solo, obtidos de repositórios científicos e de bancos de dados, como *Scopus*, *Web of Sciences*, *Scielo*, *International Soil Reference and Information Centre* (ISRIC), Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO-ONU) e Programa Nacional de Solos do Brasil (PronaSolos - Embrapa). Foram elencadas as influências históricas das diversas ciências que contribuíram para a sistematização do conhecimento sobre a pedologia, destacando sua evolução de sistemas rudimentares para sistemas de classificação baseados em atributos diagnósticos resultantes da dinâmica entre os fatores pedogenéticos do clima, relevo, uso e manejo e material de origem. Assim, foi destacada a relação das zonas climáticas e geoquímicas com as diferentes classes taxonômicas dos solos, e promovidas discussões teóricas e metodológicas sobre o uso e correspondência entre os diferentes sistemas taxonômicos. Por fim, foi abordada a importância deste tipo de conhecimento para o uso sustentável dos solos, considerando um futuro de mudanças ambientais e crescimento demográfico.

## 3. Panorama histórico da ciência do solo e da sistematização do conhecimento científico

O conhecimento acerca dos solos ocorre de maneira intuitiva desde o início da humanidade. Porém, as bases epistemológicas, que levaram à sistematização do conhecimento sobre o tema, demoraram milhares de anos para serem estabelecidas. Antes da consolidação do conhecimento científico, a compreensão dos processos naturais responsáveis pela elaboração da paisagem era baseada em explicações catastróficas, mitológicas e religiosas, sem embasamento teórico-metodológico e sem validação (RUSSELL, 1969). Existia uma concepção sensorial do mundo, que objetivava uma coordenação de ações, destinadas à procura da satisfação de elementos básicos à vida humana (CHAUI, 2000). Assim, o uso indiscriminado e exploratório deste recurso, desde a revolução agrícola, causou diversos processos de degradação ambiental, com impactos catastróficos sobre as populações humanas, tendo inclusive influenciado processos políticos, sociais e econômicos (DIAMMOND, 2007).

Com o Renascimento, surgiram grandes centros científicos e culturais e ocorreu a ampliação dos centros acadêmicos, fazendo com que as ciências exatas e aplicadas (Física, Matemática e Química) se transformassem em chaves para o progresso, consolidando a ciência como método de análise e de aproveitamento ambiental, proporcionando ao homem elementos para a adaptação e exploração da natureza ao seu bem-estar. A partir do surgimento do método científico, sistematizado e aplicado por Galileu Galilei (1564-1642) e por pensadores como Johannes Kepler (1571-1630) no âmbito da astronomia, levou a sistematização dos processos físicos e ambientais (GALILEI, 1953; RUSSELL, 1969; KOYRÉ, 1986; KEPLER, 1995), o que levou a representações e modelos dos processos físicos, químicos, biológicos e dos ambientes cada vez mais precisos e acurados (CHAUI, 2000).

Esse desenvolvimento científico acelerado propiciou o crescimento demográfico e a evolução tecnológica da humanidade e, em contrapartida, resultou no surgimento de problemas mais complexos para os agrupamentos humanos. Os resultados das pesquisas científicas aconteceram de maneira gradual e não tiveram aplicação global, fazendo com que aqueles que possuíam o controle político ou administrativo dos centros emergentes se aproveitassem do trabalho contínuo que vinha sendo realizado nos primeiros “laboratórios” ou pelos grupos intelectuais no decorrer da história. Naquela conjuntura, surgiram centros de produção e inovação tecnológica, que possuíam como função responder à necessidade crescente de buscar respostas às novas perguntas e anseios da sociedade, diante do avanço científico (KUHN, 1997; CHAUI, 2000).

A Pedologia, contudo, é uma ciência que surgiu da síntese de diversas teorias. Nesta linha, podemos destacar diversos estudos como o princípio do uniformitarismo de James Hutton (1726-1797), que estabeleceu e apresentou conceitos sobre a formação geológica da Terra, camadas, horizontes e tempo geológico (HUTTON, 2004), os trabalhos de Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), que a partir da lei de conservação das massas e dos princípios da termodinâmica, estabeleceu um dos marcos modernos da ciência química (LAVOISIER, 2009). Além destes, Alexander von Humboldt (1769-1859) foi um dos primeiros naturalistas a estabelecer relação entre os diferentes fatores ambientais como o clima sobre a composição de uma paisagem (HUMBOLDT, 2005). Por sua vez, Charles Robert Darwin (1809-1882) associou a distribuição das espécies segundo a seleção natural de indivíduos mais adaptados a determinadas condições ambientais, demonstrando a grande influência da natureza sobre a vida (DARWIN, 1998); e, além destes, destaca-se Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834-1907), que criou o primeiro sistema taxonômico de elementos químico conhecido como tabela periódica (MENDELEEV, 2016). Desta forma, os autores

supracitados, de forma direta e indireta, contribuíram para uma compreensão mais detalhada dos ambientes e solos (RUSSELL, 1969; BOCKHEIM; GENNADIYEV, 2000; PATON; HUMPHREYS, 2007; KUHN, 2011; HARTEMINK; BOCKHEIM, 2013).

Neste contexto, Fallou (1794–1877) e Dokuchaev (1846-1903) foram os responsáveis por estabelecer as bases da ciência do solo (ESPÍNDOLA, 2018). Dokuchaev, como professor, influenciou diretamente Sukachev (1880-1967), criador do conceito de biogeocenose e que, posteriormente, foi professor de Sotchava (1977), criador da Teoria dos Geossistemas, publicada na década de 1960, e que exerce grande influência sobre o pensamento moderno das ciências naturais (RODRÍGUEZ; SILVA, 2019; RUSAKOVA, 2022).

A partir do conceito de pedogênese, estabelecido por Dokuchaev, os solos passaram a ser diferenciados em função da associação entre os diferentes fatores de formação pedogenéticos que envolvem o clima, relevo, vegetação, material de origem e tempo de exposição. Esta teoria estabeleceu critérios para diagnosticar e agrupar os solos em função das variações das paisagens, pela comparação entre diferentes horizontes e perfis diagnósticos de solos. Ficou estabelecida a conexão entre os tipos de solos de um determinado local com as características do clima, da vegetação e do relevo que atuam sobre o material de origem, desenvolvendo diferentes sistemas morfogênicos e pedológicos no tempo (BOCKHEIM; GENNADIYEV, 2000; PATON; HUMPHREYS, 2007; HARTEMINK; BOCKHEIM, 2013; RODRÍGUEZ; SILVA, 2019).

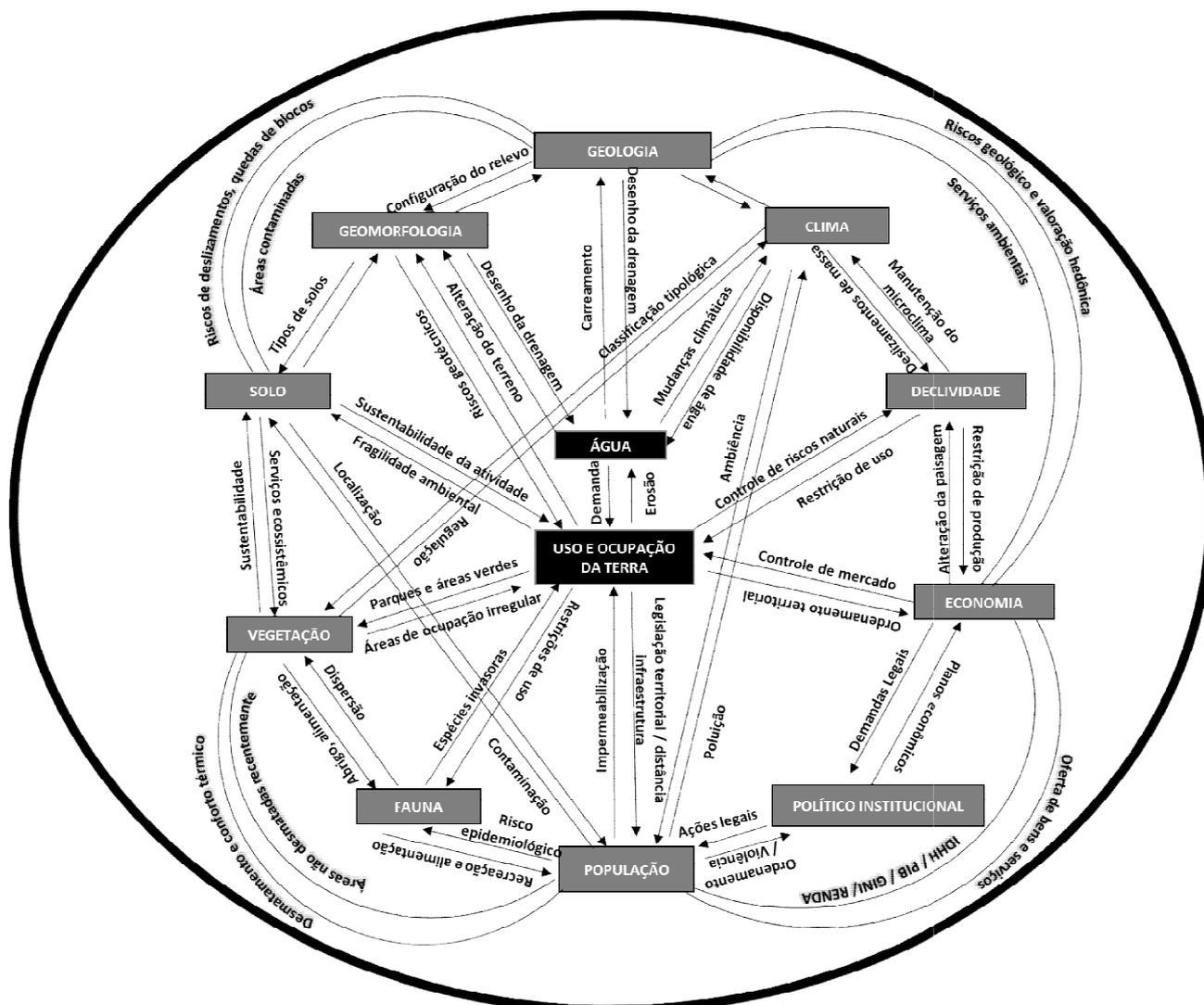
A pesquisa sistemática e periódica voltada a aplicação agrônômica teve início no século XX nos Estados Unidos da América (EUA) e na Europa, impulsionada pela revolução industrial, que demandou a ocupação e o desmatamento de novas áreas para a produção de alimentos e bens de consumo, acelerando os processos de degradação dos solos e dos sistemas naturais em geral (BOCKHEIM; GENNADIYEV, 2000; PATON; HUMPHREYS, 2007; HARTEMINK; BOCKHEIM, 2013). Em 1907, cerca de 20% dos solos nos EUA estavam seriamente degradados, o que o levou o *United States Department of Agriculture* a declarar uma política oficial de proteção dos solos. Esta medida levou ao aprofundamento das pesquisas, à instalação de estações hidrossedimentológicas e às campanhas de reconhecimento pedológico em todo o país, que foram intensificadas após as tempestades de areias conhecidas como “*Dust Bowl*”, que atingiram os Estados Unidos na década de 1920 (USDA, 1999, SANDER *et al.*, 2005).

A Teoria Geral dos Sistemas (TGS), de Bertalanffy (1952), influenciou também os sistemas de taxonomia dos solos. Todavia, ela não se resume ao mundo convencional das ciências geofísicas e biológicas, mas se estende as diferentes áreas do conhecimento (MENDONÇA, 2001). É considerada multidisciplinar, capaz de transcender problemas específicos de cada área do conhecimento e propor princípios gerais e modelos. Apesar da grande quantidade de conhecimento sobre a natureza gerado até então, foi com a TGS, que trata do dinamismo e interação dos sistemas aplicados em diferentes campos da ciência, que a questão ambiental foi compreendida de forma dinâmica e integrada. O desenvolvimento da TGS remonta à década de 1930 e utiliza como base a análise interdisciplinar e as leis da termodinâmica, o que possibilitou, no âmbito dos estudos da paisagem, gerar uma grande diversidade de teorias e concepções sobre os sistemas de morfogênese e pedogênese, distribuição biogeográfica e ecossistêmica, tais como: Milne (1935), Jenny (1941), Odum, (1953), Erhart (1955), Strahler (1954), Wischmeier e Smith, (1959), Chorley (1962), Sotchava (1963), Bertrand (1968), Tricart (1977), Berutchachvili (1978) e Boulet (1978). No Brasil, podemos citar os trabalhos realizados por Ab’Sáber (1956); Almeida (1964); Azevedo (1968); Bigarella (1964; 1994), Christofoletti (1980; 1999), Troppmair (1983), Bertoni e Lombardi Neto (1985), Barros Neto (1986), Monteiro (1987), Castro (1989), Queiroz Neto (2000), Furquim *et al.* (2013), Marques Neto *et al.* (2014), Dias e Perez Filho (2017), Cavalcanti *et al.* (2016; 2019).

De acordo com Bertalanffy (1952), os sistemas são regidos por quatro conceitos principais, sendo eles: I – Interação; II – Totalidade; III – Organização; e IV – Complexidade. O primeiro está relacionado à dependência entre elementos (variáveis) para o funcionamento de um sistema e a ideia de retroalimentação; o segundo diz respeito à totalidade, em que o sistema não é a soma dos elementos, mas sim um todo não redutível às suas partes; já o terceiro é sobre como a organização pode ser caracterizada pelo arranjo das relações dos elementos de um sistema e o estabelecimento de níveis hierárquicos em seu funcionamento; e, por fim, a ideia de complexidade, está associada à quantidade e qualidade dos tipos de inter-relações. Com esta abordagem, sistemas naturais, antes analisados de forma linear e reducionista, passaram a ser estudados não apenas por meio dos componentes elementares (pois estes não contêm todas as características do sistema), mas também são consideradas as inter-relações, trocas de energia e matéria, evidenciando uma característica inerente aos sistemas: a complexidade dos processos e dinâmicas que variam em diferentes escalas. Desta nova abordagem, que considera o balanço entre os componentes de energia e matéria que fluem num sistema, derivaram diversas concepções teóricas e metodológicas importantes para os estudos da

paisagem, os quais foram pautados principalmente nos diferentes estágios de equilíbrio existente entre os distintos sistemas econômicos, sociais e ambientais (SANTOS, 2004; LÄMMLE *et al.*, 2020; 2022).

Por meio do paradigma da complexidade, a ciência moderna preconiza que o foco de estudo deve ser o sistema, independentemente da área de conhecimento. Assim, o universo não deve ser concebido como agrupamento de objetos isolados, mas formado por sistemas que se inter-relacionam, constituídos por subsistemas num grau infinito de complexidade (**Figura 1**) (MORIN, 1977). Na perspectiva da complexidade, sistema ambiental é definido como uma organização espacial, ou seja, uma entidade organizada na superfície terrestre, formada pelos subsistemas físico-naturais e socioeconômicos e suas interações (**Figura 1**) (CHRISTOFOLETTI, 1999). Assim, as causas e os efeitos gerados em um sistema podem ser compreendidos como um modelo composto a partir de variáveis independentes, que controlam os fluxos de energia e matéria, e variáveis dependentes, aquelas que são controladas, de modo que estas só sofrem modificações caso aquelas se alterem (RUSSELL, 1969; KUHN, 2011).



**Figura 1:** Ilustração de possíveis interações entre temas e funções ocorrentes em um território. Fonte: Adaptado de Santos (2004).

Diante disso, os sistemas pedológicos são de fato subsistemas do Planeta Terra e, de tal modo, estão sujeitos a algumas possíveis interações entre temas e funções em um sistema territorial como ilustradas por Santos (2004) na **Figura 1**. Portanto, a visão sistêmica do fenômeno natural corta arestas da realidade e a analisa como um modelo. Este deve, portanto, identificar e sintetizar as principais variáveis que constituem e condicionam o processo avaliado, de forma a garantir que sejam possíveis avaliações de causa e efeito entre os diferentes temas e funções que regulam a dinâmica quantitativa e qualitativa da energia e da matéria que flui no sistema (**Figura 1**).

Neste contexto, a sistematização do conhecimento levou ao desenvolvimento de diversas tecnologias utilizadas na classificação e avaliação das condições naturais e de manejo dos solos, como a *Soil Taxonomy*,

a Equação Universal de Perda de Solo, métodos e equipamentos sofisticados de análises físicas e químicas, como a difratometria de raios-X, práticas de manejos mais eficientes com controle dos fluxos hidrossedimentológicos, como o plantio direto e em nível, seleção genética e integração de culturas, mecanização, zoneamentos de risco agroclimático, entre outros aprimoramentos agrônômicos (RENARD *et al.*, 1997; SANDER *et al.*, 2005; BRADY; WEILL, 2013, ESPINDOLA, 2014).

No Brasil, a ciência do solo teve início com pesquisadores e instituições diversas. Dentre estas, destacamos a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz (ESALQ) da USP, idealizada e iniciada por Luz Vicente de Souza Queirós (1849-1898), que ajudou a promover profundas transformações técnicas e sociais no campo, entre elas a luta abolicionista a escravidão. Destaca-se, ainda, a criação dos institutos agrônômicos, como o de Campinas (IAC), o Sul Riograndense e o da Bahia, que desde a época do império foram palco de diversos experimentos para melhora das práticas agrônômicas do país. As Escolas de Agricultura e Agronomia de Lavras (ESAL) e da Amazônia (EAA), as Universidades Federais de Viçosa (UFV), Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Santa Maria (UFSM), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), fundada e expandida por Alysson Paolinelli, conjuntamente as Agências de Inovação Rural dos estados (EMATER), promoveram melhorias nas práticas agrícolas, adaptando as culturas agrícolas e os manejos aos solos ácidos tropicais. Estas autarquias associadas à iniciativa privada, permitiu assim que o Brasil na década de 1970 passasse de importador para exportador de alimentos, o que promove até os dias atuais uma ampla transformação no país (ESPÍNDOLA, 2008).

Como exemplo de pesquisadores e obras, cumpre citar, entre outros, Machado (1953), Guerra (1954), Barros *et al.* (1958), Bertoni (1959); Lemos e Santos (1963); Ranzani (1965, 1969); Lepsch (1987); Cerri *et al.* (1985, 2004); Curi *et al.* (1993); Vidal-Torrado (1999) e Silva (1999).

No contexto atual, o avanço das geotecnologias e o emprego dos sistemas de informação geográfica, de técnicas geoestatísticas e de geofísica nos estudos pedológicos permitiram o acesso a áreas antes remotas e inacessíveis, o que possibilitou a aquisição de uma grande quantidade de dados e propiciou uma visão ainda mais sistêmica dos macros compartimentos ambientais da Terra, revolucionando a Ciência do Solo (BRADY; WEILL, 2013). No Brasil, é possível destacar trabalhos realizados principalmente a partir do século XXI, que vêm empregando diversos tipos de análises integradas mediante utilização de geotecnologias nos estudos pedológicos (AYER *et al.*, 2015; 2020; BAHIA *et al.*, 2015; RUBIRA *et al.*, 2019; MOREIRA *et al.*, 2021; LÄMMLE *et al.*, 2020; 2022; LOURENÇO *et al.*, 2022; LENSE *et al.*, 2023; ROSIN *et al.*, 2023; De SOUZA *et al.*, 2023).

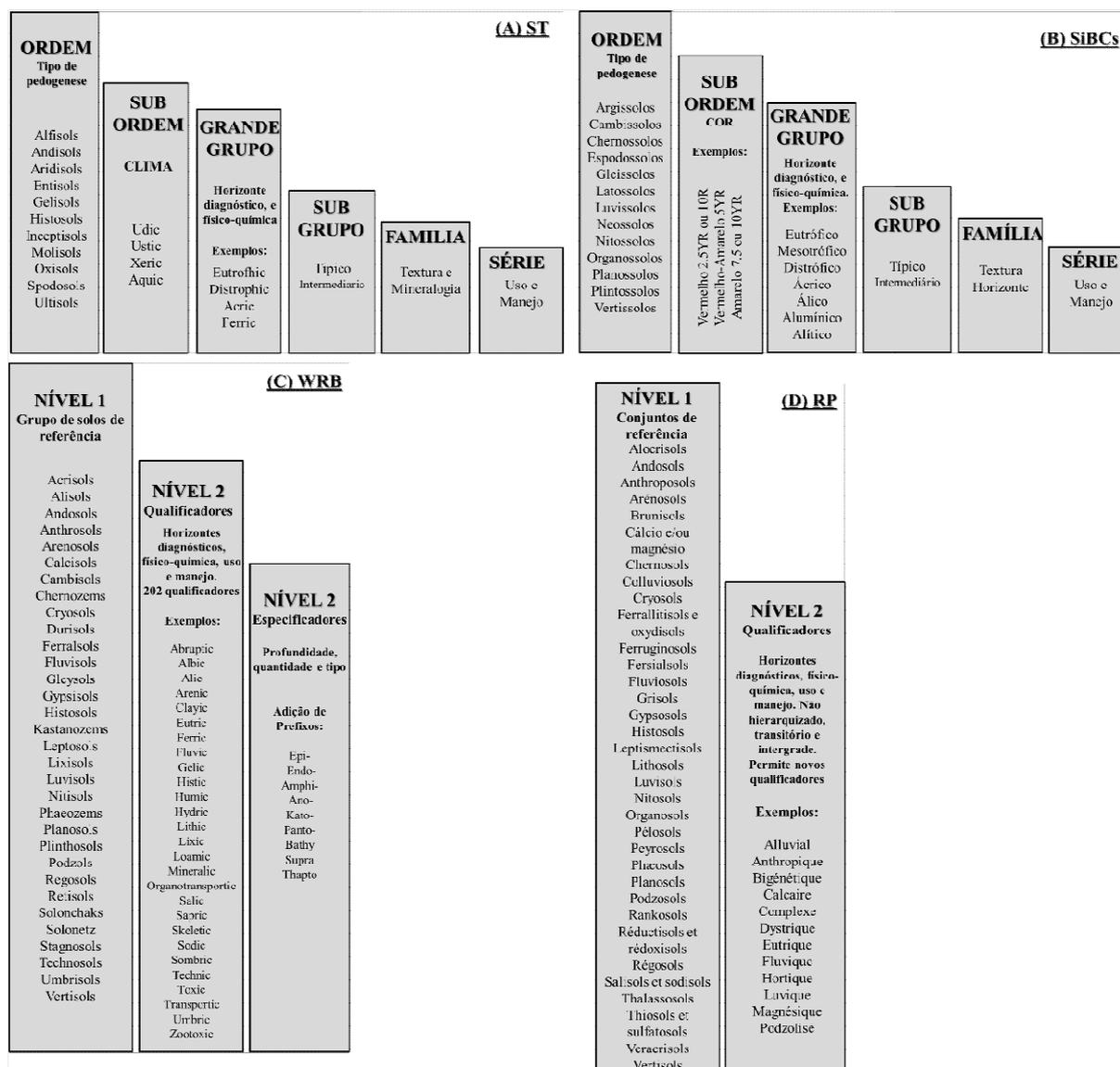
#### 4. Taxonomia dos solos e zonas pedogenéticas

Os sistemas de classificação visam categorizar e hierarquizar os solos e foram idealizados na primeira metade do século 20, a partir dos princípios estabelecidos por Dokuchaev (1899). Os principais e mais recentes sistemas de classificação de solos (**Figura 2**) derivam, em partes, do antigo sistema de classificação de solos norte americano, formulado por Baldwin *et al.* (1938), e modificada por Thorp e Smith (1949), que, entre 1960 e 1974, serviu de referência para uma série de aproximações, culminando na publicação da *Soil Taxonomy* (ST) em 1975 (**Figura 2A e 3A**) (PATON; HUMPHREYS, 2007; ESPINDOLA, 2008; BOCKHEIM; GENNADIYEV, 2000; HARTEMINK; BOCKHEIM, 2013). Atualmente, a ST está na 13ª edição, com a última versão lançada em 2022, sendo a principal referência para os demais sistemas de taxonomia pedológica.

Já, O WRB foi desenvolvido como um substituto ao sistema de classificação de solos anterior, o FAO-Unesco *Soil Map of the World* (FUSMW), criado em meados do século XX. Foi projetado para ser um sistema mais flexível e dinâmico que pudesse acomodar novos conhecimentos e desenvolvimentos no campo da ciência do solo. Tais sistemas também foram utilizados como referência pela Sociedade Internacional de Ciência do Solo, que recomendou a publicação da carta de classes de solos do mundo na escala de 1:5.000.000 (FAO-UNESCO, 1969; ESPINDOLA, 2008) (**Figuras 2 e 3**). Cabe destacar que, como o mundo passava pela chamada Guerra Fria, a construção de um sistema de classificação de solo internacional e multilateral buscava facilitar e integrar os estudos e o esforços relacionados ao desenvolvimento da ciência do solo.

O WRB possui mais ordens (Grandes grupos) do que o ST, visto que engloba solos de todo o mundo e usa bases taxonômicas mais amplas, empregando características tanto do ST quanto da pedologia russa. Este referencial internacional foi revisado em 1994 e publicado em 1998 pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO). A versão atual, de 2014-2015 conhecida como *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) (**Figura 2C e 3B**), é derivada do *World Soil Information* (ISRIC), considerado maior banco de dados pedológicos do mundo (FAO-IIASA, 2023). O WRB é o padrão

internacional para o sistema de classificação de solo utilizado pela União Internacional de Ciências do Solo (International *Union of Soil Science* – IUSS) e foi desenvolvido em colaboração internacional coordenada pelo IUSS Working Group (ESPINDOLA, 2008; FAO-IUSS, 2014).

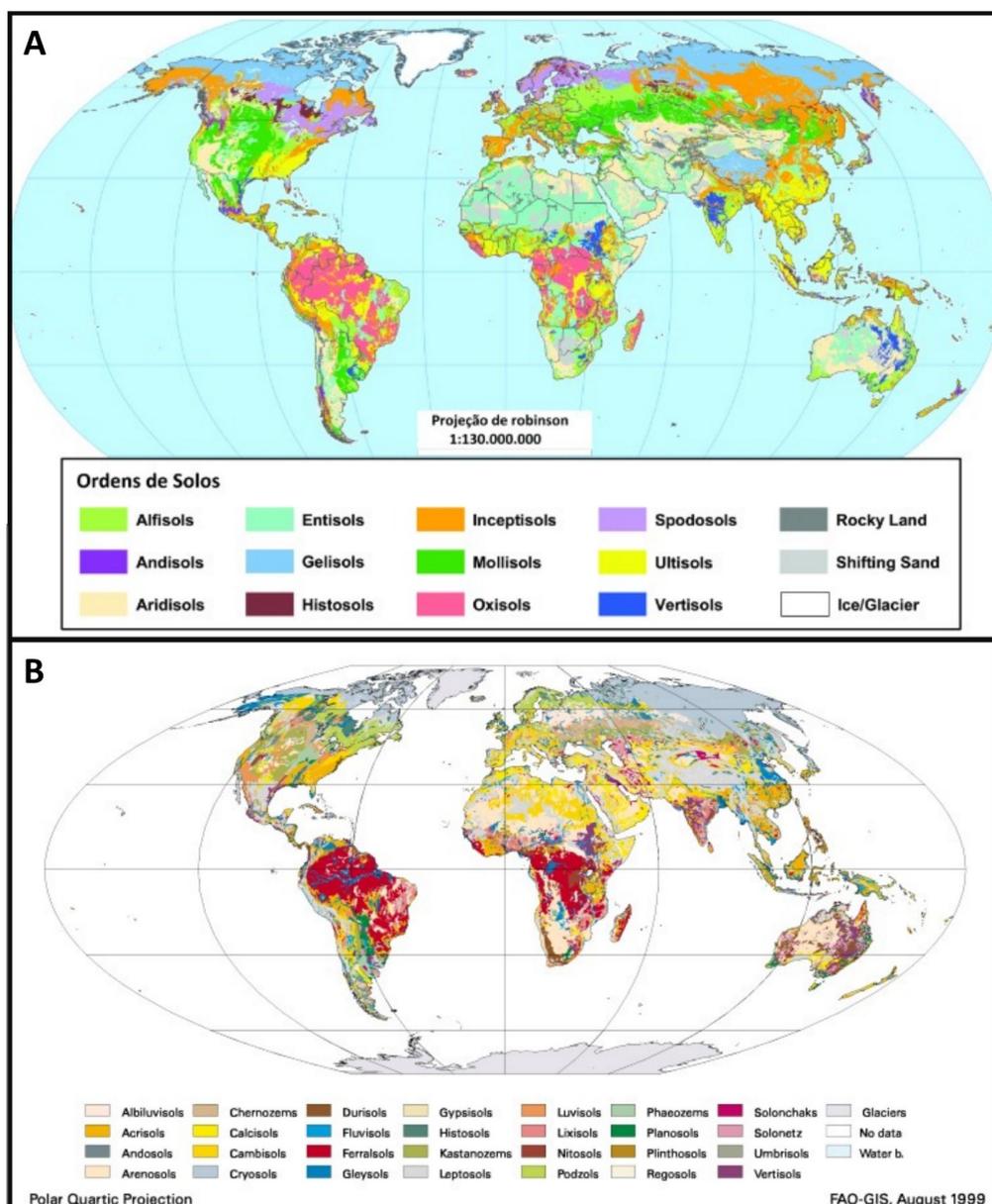


**Figura 2:** Níveis hierárquicos e de agrupamento dos solos segundo: (A) Soil Taxonomy (USDA, 1999), Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018) e World Reference Base for Soil Resource (FAO - IUSS, 2014) *Référentiel Pédologique* (AFES, 2008).

O SiBCS, assim como a ST, é hierarquizado e categorizado obedecendo aos seguintes táxons: Ordem, Subordem, Grande Grupo, Sub Grupo, Família e Série (**Figura 2B**). Essa hierarquia classifica os solos de acordo com características pedogenéticas similares e como estas se refletem nos atributos e horizontes diagnósticos, que são utilizadas para criar subordens e subgrupos de classificação. Este agrupamento pode envolver várias características, dependendo do objetivo do sistema de classificação utilizado. Portanto, características como atividade da fração argila, saturação por bases, mudança textural, caráter orgânico, mineral, ácrico, sódico, carbonático, salino, flúvico, ação antrópica, presença, ausência e composição dos horizontes dos solos, entre outros atributos, podem ser utilizados (SANTOS *et al.*, 2018; USDA, 2022).

A classificação WRB compreende dois níveis (**Figura 2C**): o primeiro compreende 32 Grupos de Solos de Referência (GSR), agrupados pela combinação de horizontes de diagnósticos, propriedades e materiais. No segundo nível, para maior diferenciação, há um conjunto de 202 qualificadores subdivididos em principais ou suplementares, classificados e descritos em ordem de importância. Os qualificadores principais refletem as propriedades que influenciam fortemente na funcionalidade do solo e são as principais subdivisões GSR. Estes são identificados pela combinação descrita de horizontes diagnósticos, propriedades e materiais que são comparados à chave WRB, que possui as descrições pedogenéticas. Os qualificadores

suplementares correspondem às descrições de menor ocorrência no perfil (matriz) avaliado, podendo envolver características físicas, químicas, biológicas, tipo de manejo e cobertura superficial. Além destes, a nomenclatura pode utilizar especificadores pela presença de prefixos que indicam a profundidade e a intensidade de processos tais como, composição granulométrica e ou química predominante do horizonte avaliado (FAO-IUSS, 2014).



**Figura 3:** A - Mapa mundial de solos: *Soil Taxonomy* Fonte: USDA (2005); B - Mapa de referência mundial de solos, FAO-UNESCO Fonte: FAO-IUSS (1998).

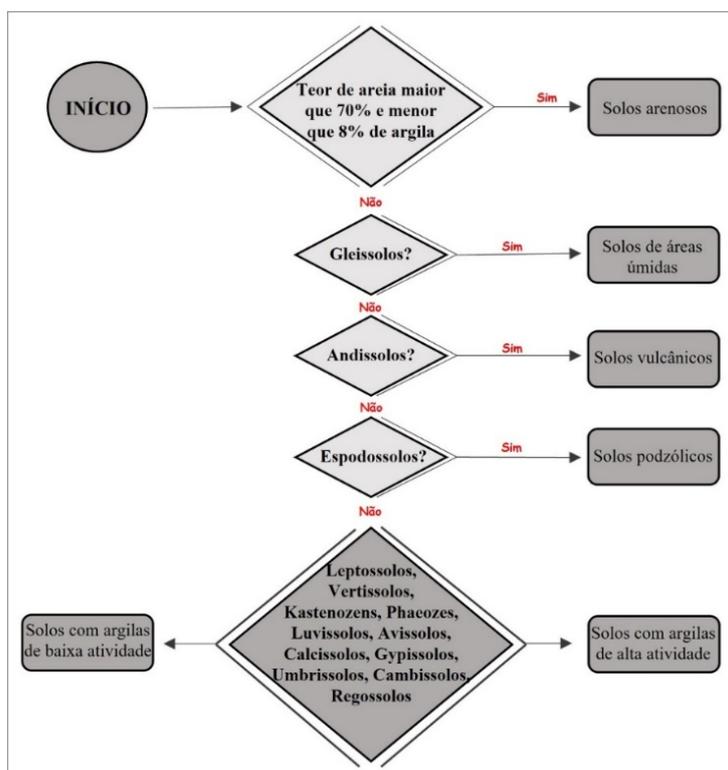
O moderno *Référentiel Pédologique* (**Figura 2D**), desenvolvido pela *Association française pour l'étude des sols* (AFES, 2008), utiliza apenas duas categorias - as de referência e os tipos (subdivisões de uma referência por adição de um ou mais qualificadores). O sistema é aberto, concebido como um espaço tipológico N-dimensional, no qual são identificadas referências sem a necessidade de associá-la à hierarquia. Desta forma, apresenta uma coleção de conjuntos de solos de referência, que corresponde às ordens no ST ou SiBCS e níveis do WRB, porém, com tendência de aumento progressivo pelo fato de permitir a inserção de novos tipos de solos. Os agrupamentos são estabelecidos em função de correlações regionais, nacionais ou internacionais, permitindo classificar e especificar solos pela adição de qualificadores.

Existem, ainda, sistemas de classificação desenvolvidos para representar de forma mais acurada diferentes regiões do globo e distintos objetivos de avaliação dos solos, os quais possuem arquiteturas similares ao ST e/ou WRB. Dentre eles, destacam-se: (i) *Canadian System of Soil Classification* (AGRICULTURE CANADA, 1974); (ii) *Classification and Diagnostics of Soils of the USSR*

(TOKONOGOV, 1977); (iii) *New Zealand Soil Classification* (WHENUA,1992); (iv) *Australian Soil Classification* (ISBELL, 1996); (v) *Soil classification a binomial system for South Africa* (DATSRSA, 1977), e (vii) *Nordic Reference Soils* (TIBERG, 1998) e (viii) *Chinese Soil Taxonomy* (LI FERG, 2001).

Além das classificações pedogenéticas, existem vários tipos e funções para os sistemas de classificação de solos, como a classificação de riscos (MANZATTO *et al.*, 2009), para uso na engenharia e geotecnia (BRASIL, 1994), avaliações de fragilidades e potencialidades ambientais (RAMALHO; BEEK, 1994) e a classificação de solos do IPCC (2006) (**Figura 4**), que considera a textura e os processos de degradação da matéria orgânica para agrupar diferentes tipos de solos, com vistas a estabelecer os de maior risco à emissão de carbono e contribuir com a agenda da sustentabilidade.

A classificação de solos do IPCC leva em consideração o agrupamento mineral dos solos baseados no WRB e possui uma chave de classificação (**Figura 4**) que permite agrupá-los em classes de risco de emissão dos estoques de carbono armazenados. A partir desta classificação, são atribuídos valores padrões para o cálculo das emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa), valores também utilizados nos inventários de ciclo de vida para diversos sistemas de produção (IPCC, 2006).



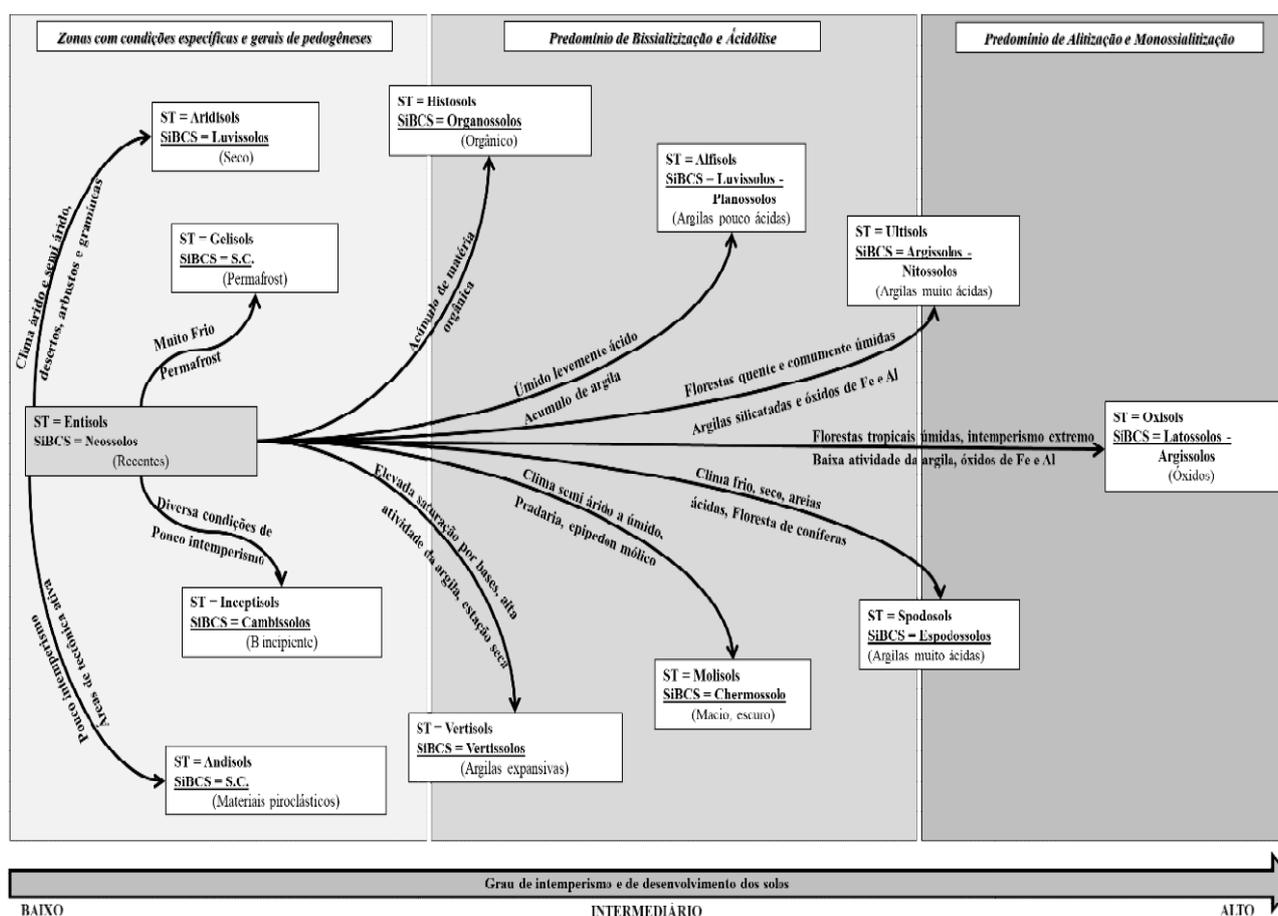
**Figura 4:** Chave de classificação IPCC Tier I, esquema para agrupamento mineral dos solos. Fonte: Batjes (2010).

Cumpra destacar que os sistemas de classificação de solos e do ambiente estão em constante evolução. Atualmente, o uso de novos métodos de coleta de dados tanto em campo quanto a partir de sensores remotos, somados ao uso de big data, aprendizado de máquina, trabalhados em sistemas georreferenciados, possibilitam o monitoramento em tempo real do ambiente, e têm possibilitado um conhecimento mais amplo e integrado da natureza. Isso tem reflexo em novas teorias e sistemas taxonômicos de avaliação espaço-temporal que visam combater os impactos resultantes do uso e manejo territorial, cada vez mais rápidos e intensos (SANTOS, 2004). Diante disso, a busca por sistemas de classificação mais dinâmicos, individualizados e que permitem utilização *intergrade*, ou seja, seu agrupamento em múltiplas categorias, é interessante quando pensamos em esforços internacionais para conservação dos solos.

Diante do exposto, os atuais sistemas de classificação são baseados em critérios químicos, físicos, biológicos e de uso e manejo, sendo que os grandes grupos ou ordens correspondem principalmente às zonas de pedogênese. Estas zonas, também denominadas de zonas morfoclimáticas, resultam da forma de geoide da terra, que faz com que os raios solares incidam sobre diferentes ângulos dependendo da latitude. Assim, regiões de baixa latitude, recebem uma incidência de raios solares predominantemente perpendiculares, resultando em maior energia solar por área de superfície. Nas altas latitudes, devido aos baixos ângulos de incidência dos raios solares, a energia solar recebida por área de superfície é menor, o que leva a perdas por

absorção e refração maiores de energia e resulta em temperaturas e precipitações menos abundantes e pressões atmosféricas maiores. Desta forma, as condições climáticas gerais e de vegetação, nas quais as ordens de solos são formadas, são amplamente distintas (CHRISTOPHERSON, 2011). As **Figuras 3 e 5** ilustram como as ordens de solos são definidas principalmente em função das faixas de latitude.

A litosfera terrestre é formada principalmente por minerais e rochas compostas em média por oxigênio (46%), sílica (28%), alumínio (8%), ferro (6%), magnésio (4%), cálcio (2,4%), potássio (2,3%), sódio (2,1%) e menos de 1% dos demais elementos (POMEROL, 2012). Os minerais reagem de maneiras distintas ao intemperismo, portanto, a variação ambiental que ocorre nas diferentes faixas de latitude irá diferenciar em grande escala os grandes grupos e ordens de solos (CHRISTOPHERSON, 2011; POMEROL, 2012; BRADY; WEILL, 2013). Dessa forma, podemos classificar os processos pedogenéticos e a sua distribuição espacial em função destas interações. Essa característica permite dividir o globo em sete grandes zonas de intemperismo e pedogênese, que variam principalmente em função da latitude e do clima, que são descritas na **Figura 1** e na **Tabela 1** (BRADY; WEILL, 2013). Destaca-se que estes formam os mesmos princípios que serviram de base para a formulação do primeiro mapa de solos do hemisfério norte e do mundo, advinda das observações e interpretações da escola soviética (ESPINDOLA, 2018).



**Figura 5:** Diagrama mostrando as condições climáticas gerais e de vegetação nos quais os solos (Soil Taxonomy - ST) de cada ordem são formados, e seus correspondente no Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS); S.C.= sem correspondência no SiBCS. Fonte: Adaptado de Brady e Weill (2013).

Apesar de suas diferenças com relação aos táxons, os sistemas de classificação possuem muitas semelhanças e, por isto, podem ser correlacionados. Estabelecer a correspondência entre os dois principais sistemas de classificação de solos mundiais, o ST e o WRB, possibilita a complementação de ordens de solos não existentes no SiBCS, permitindo uma visão mais ampla e completa sobre este recurso. Além disso, para simplificar a aplicação dos modelos de balanço de Carbono e geração de Inventários de Ciclo de vida (ICV), foi feita a correspondência entre o agrupamento mineral de solos do IPCC (2006) com o SiBCS. Estes grupos servem de parâmetros para atribuição de valores *default*, para os cálculos de emissão GEE, gerados pelos diversos tipos de usos e manejos agrosilvopastoris. Por último, foi inserida a correspondência com Sistema Francês de Classificação que possui a estrutura taxonômica mais aberta (**Tabela 2**).

**Tabela 1:** Características biofisiográficas das principais zonas de intemperismo e pedogenéticas do mundo.

Zona de Pedogênese	Latitude (aprox.) (°)	Tipo Intemp. (pred.)	Processo químico (pred.)	Temp. (°C)	Precipitação (mm)	Vegetação	Textura (pred.)	Geoquímica (pred.)	Tipo de solo (pred.)	Estoque de C (aprox.) (t/ha)
Zona de alitização	0-15°	Químico	Hidrólise Total	25°	2000 - 3000	Floresta Equatorial	Argila	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Latossolo	50-130
Zona de monossialitização	15-30°	Químico	Hidrólise Parcial	19°	1200 - 2000	Floresta Tropical	Argilo-siltoso	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Argissolo e Latossolo	70 - 150
Zona de bissialitização	30-45°	Qui/Fís	Hidrólise Parcial	15°	500 - 1200	Florestas temperadas e Savanas	Argilo-arenoso	Caulinita/ Esmectita	Argissolo, Latossolo e Espodossolo	50 - 200
Zonas muito áridas	-	Físico	Sem Alteração	15°	150 - 200	Deserto e Semi árido	Litólico-arenoso	SiO <sub>2</sub>	Luvissolos	0 - 40
Zona de Acidólise	45-60°	Qui/Fís	Acidólise	7°	500 - 700	Floresta de Taiga	Argilo-arenoso-siltoso	pH<3 = Quartzo zircão ph >3<5 = Esmectitas	Luvissolos, Planossolos, Espodossolo e Gelisols	> 200
Zonas cobertas de gelo	60-90°	Físico	Sem Alteração	<0°	0	Tundra e Deserto Polar	Litólicos	SiO <sub>2</sub>	Gelisols S.T.	0
Zonas de tectônica ativa	-	Indet.	Indet.	Indet.	Indet.	Indet.	Indet.	Indet.	Andisols S.T.	Indet.

Fonte: Adaptado de Christopherson (2011) e Brady e Weill (2013). S.T.= Classificação derivada do Soil Taxonomy.

**Tabela 2:** Correspondência entre os sistemas de classificação dos solos *Soil Taxonomy* (USDA, 2022); Sistemas Brasileiros de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2014), *World Reference Base for Soil Resource* (FAO-IUSS, 2014); *Référentiel pédologique* (AFES, 2008) e *IPCC Soil Group* (BATJES, 2010).

<b>SiBCS</b>	<b>WRB/FAO</b>	<b>Soil Taxonomy</b>	<b>RP</b>	<b>IPCC Soil Group</b>
Argissolos	Acrisols	Ultisols	Ferruginosols	Solos com argilas de baixa atividade
	Lixisols	Oxisols (Kandic)	Ferrallitissols e oxydisols	Solos com argilas de baixa atividade
	Alisols		Ferrallitissols e oxydisols	Solos com argilas de baixa atividade
Cambissolos	Cambisols	Inceptisols	Alocrisols / Brunisols / Ferssalsols / Pélosols	Solos arenosos
Chernossolos	Chernozems	---	Chernosols / Grisols	Solos com argilas de alta atividade
	Kastanozems	Molisols (apenas os Ta)	Grisols	Solos com argilas de alta atividade
	Phaeozems	---	Phæosols / Grisols	Solos podzólicos
Espodossolos	Podzols	Spodosols	Podzosols	Solos com argilas de alta atividade
Gleissolos	Gleysols	Entisols (Aquepts), Alfisols (Aqualfs) e Inceptisols (Aquepts)	Réductissols et rédoxisols / Thiosols et sulfatosols	Solos de áreas úmidas
Gleissolos Sálícos	Solonchaks	Aridisols e Entisols	Réductissols et rédoxisols	Solos de áreas úmidas
Latossolos	Ferralsols	Oxisols	Ferrallitissols / oxydisols / Ferruginosols	Solos com argilas de baixa/alta atividade
Luvissolos	Luvisols	Alfisols, Aridisols (Argids)	Luvisols / Ferssalsols	Solos com argilas de alta atividade
Neossolos	---	Entisols	Régosols	Solos arenosos
Neossolos Flúvicos	Fluvisols	Entisols (Fluvents)	Fluviosols / Colluviosols / Régosols / Thalassosols	Solos arenosos
Neossolos Litólicos	Leptsols	Entisols (Lithic... Orthents; Lithic... Psamments)	Lithosols / Peyrosols / Rankosols / Régosols	Solos arenosos
Neossolos quartzarênicos	Arenosols	Entisols (Quartzipsamments)	Arénosols / Colluviosols	Solos arenosos
Neossolos Regolíticos	Regosols	Entisols (Psamments e Orthents)	Régosols / Colluviosols / Pélosols	Solos arenosos
Nitossolos	Nitisols	Ultisols, Oxisols (Kandic), Alfisols	Nitosols / Brunisols	Solos com argilas de baixa atividade
	Lixisols		Ferruginosols	Solos com argilas de alta atividade
Organossolos	Histosols	Histosols	Histosols / Organosols	Solos com argilas de alta atividade
Planossolos	Planosols	Alfisols	Planosols	Solos com argilas de alta / Baixa atividade
Planossolos Nátricos	Solonetz	Alfisols (Natrustalfs e Natrudalfs)	Salisols / Planosols	Solos com argilas de alta / Baixa atividade
Planossolos Háplícos	Planosols	Ultisols (Albaquults e Plintaquults) e Alfisols (Albaqualfs e Plintaqualfs)	Planosols	Solos com argilas de alta / Baixa atividade
Plintossolos	Plinthosols	Alfisols (Plintaqualfs), Ultisols (Plintaquults) e subgrupos Plinthic de várias classes de Oxisols, Ultisols, Alfisols, Entisols	Ferruginosols / Ferrallitissols / oxydisols	Solos com argilas de alta / Baixa atividade

		e Inceptisols		
Vertissolos	Vertisols	Vertisols	Vertisols / Leptismectisols	Solos com argilas de alta atividade
	Cryosols	Gelisols	Cryosols	Solos com argilas de alta atividade
	Anthrosols	---	Anthroposols	
	Andosols	Andisols	Andosols	Solos vulcânicos
	Umbrisols	---	Veracrisols	Solos com argilas de alta atividade
	Gypsisols	Vários subgrupos de Aridisols	Gypsisols	
	Durisols	Vários grandes grupos Dura de Alfisols, Andisols, Aridisols, Inceptisols, etc.	Gypsisols / Alocrisols / Regosols	
	Calcisols	Vários subgrupos de Vertisols, Molisols, Inceptisols, Alfisols, etc.	Cálcio e/ou magnésio	
	Albeluvisols	Alfisols (Glossaqualfs, Glossocryalfs, Glossudalfs, etc.)	Luvisols	Solos com argilas de alta atividade

## 5. Taxonomia pedológica sustentável e sistêmica

De acordo com suas propriedades pedogenéticas, os solos desempenham diferentes funções ecossistêmicas, as quais variam em intensidade e magnitude, de acordo com sua interação ambiental. Em regiões secas, servem como fonte de armazenamento de água. Em áreas úmidas, regulam a umidade atmosférica, a distribuição das águas para os rios e servem ainda de substrato para o crescimento da vegetação, o que reduz os fluxos hidrossedimentológicos e estabiliza este sistema de alta interação morfoclimática. Em áreas temperadas, armazena grandes estoques de C, principalmente nos solos sob as florestas de coníferas (BRADY; WEILL, 2013). Neste contexto, são parte ativa no ciclo hidrológico via armazenamento e alteração físico-química; participam de processos biológicos e de sustentação da vida como meio e fonte de nutriente e constituem-se como um dos principais reservatórios de Carbono, sendo indispensável para atenuação das mudanças climáticas, melhora da qualidade de vida e manutenção dos serviços ecossistêmicos (COSTANZA; DALY, 1992; COSTANZA *et al.*, 2017; LEITE FILHO *et al.*, 2021, SOUZA *et al.*, 2021).

Os serviços ambientais e ecossistêmicos dos solos podem ser degradados por diferentes fatores, como erosão, impermeabilização e contaminação. Estes processos são provocados ou agravados pela atividade antrópica, ensejando até mesmo uma proposta para mudança no sistema de classificação brasileiro, seguindo uma tendência mundial: Furquim e Almeida (2022) propõem a inserção de classificações e horizontes diagnósticos referentes aos solos antropizados, como a da proposta de Curcio *et al.*, (2004). De tal modo, é necessário definir mecanismos para identificação das áreas sustentáveis em detrimento das degradadas e estabelecer formas de taxonomia que permitam determinar quando um tipo de uso e manejo está preservando a habilidade do solo em operar como um sistema vivo de maneira sustentável, mantendo a produtividade biológica, garantindo a qualidade da água e assegurando a saúde do meio ambiente e dos seres humanos (DORAN; SAFELY, 1997; BRAAT, 2013).

No que se refere à erosão, podemos utilizar modelos de avaliação, como a Equação Universal de Perda de Solos e suas derivações, para estabelecer intervalos e taxas de perdas de solo que seriam sustentáveis. Quanto ao quesito contaminação, é mais complexo, pois, segundo CETESB (2001), um solo só pode ser considerado “limpo” quando a concentração de um elemento ou substância de interesse ambiental é menor ou igual ao valor de ocorrência natural. Esta concentração foi denominada como “valor de referência de qualidade”.

Atualmente, classificamos os solos quando tratamos de contaminantes em função do valor de referência. Vários países buscam definir valores orientadores da qualidade dos solos. Sobre isso, vale ressaltar a experiência da Holanda, que promulgou em 1987 a Lei de Proteção do Solo, “*Soil Protection Act*”, e, em 1994, publicou a proposta de valores orientadores denominados de STI (“*Streefwaarde*” – referência “*Toetsingswaarde*” - alerta e *Interventiewaarde*” - intervenção). Assim, foram estabelecidos três níveis de qualidade para o solo: (i) **valor de referência**, que indica o nível de qualidade para “solo limpo” natural; (ii) **valor de alerta**, que representa a média entre o valor de referência e o valor de intervenção, indicando uma

alteração das propriedades funcionais do solo; e (iii) **valor de intervenção**, que indica o limite de qualidade acima do qual existe risco à saúde humana e ao ambiente (VROM, 1994).

Todavia, ainda não há consenso sobre quais valores são aceitáveis para se considerar um solo limpo. Primeiro, pela ausência de séries históricas sobre dados físicos, químicos e biológicos; segundo, pela própria diversidade e complexidade dos ambientes. Os processos de diferenciação geoquímica da crosta terrestre afetam a distribuição dos elementos menores e elementos traços dentro de uma mesma formação pedológica. Ademais, quando comparamos regiões com relevos altos e constituídos por rochas graníticas e cristalinas, com bacias sedimentares, estas podem apresentar um teor maior de elementos menores e elementos traços, o que pode resultar da ação filtradora dessas bacias, que imobilizam os elementos removidos das partes mais altas, aumentando a concentração destes, nas partes mais baixas. Além disso, a depender das propriedades do magma original, áreas de derrames basálticos tendem a apresentar rochas com diversas anomalias geoquímicas, tais como elevadas concentrações naturais de elementos tóxicos (SBCS, 2013), que podem resultar em fenômenos de intoxicação natural dos solos.

Destaca-se também, que a escolha dos valores orientadores de qualidade para os solos, é baseada na Dose Letal 50 (DL50), que é definida como a dosagem de um determinado composto que é necessária para matar metade dos membros de uma população testada (referência). Neste caso o mecanismo de controle considera apenas a contaminação aguda e não o efeito da exposição constante e prolongada a pequenas doses. Além disso, efeitos de retroalimentação tornam a situação ainda mais complicada (SBCS, 2013). Assim, estabelecer as classificações destas características para elementos tóxicos nos solos não é algo fácil e exige sistemas taxonômicos dinâmicos.

Além da erosão, contaminação, perda de serviços ambientais e saúde, os solos são fundamentais quando tratamos das mudanças climáticas. Considerando seus grandes estoques de Carbono, solos mal manejados podem gerar impactos ambientais negativos. Por outro lado, quando manejados adequadamente, podem funcionar como reservatórios fixando o Carbono, devido à capacidade estrutural dos solos para armazenar este elemento (LAL, 2004; OELKER; COLE, 2008; FAO-ITPS, 2017). Diversos atributos pedológicos têm sido utilizados para avaliação da saúde dos solos, como a relação textural, composição química e biológica, presença de feições físicas (VAN BRUGGEN *et al.*, 2006; MENDES *et al.*, 2021), entre outros. Estes indicadores possibilitam, muitas vezes de forma fácil e barata, avaliar condições de fertilidade e estruturais dos solos, possibilitando interferir no mesmo de forma eficiente e sustentável (DORAN E ZEISS, 2000; MANKOLO *et al.*, 2012). Neste contexto, mapeamentos e sistemas de classificação, como o utilizado pelo IPCC (2006) (**Figura 3**), permitem classificar a capacidade de armazenar e ou emitir GEE em função do teor de argila, acidez e umidade, visto que essas propriedades exercem influência sobre o teor de matéria orgânica e de Carbono, e afetam a intensidade e a velocidade como esta matéria orgânica é transformada, estocada e emitida para a atmosfera, e são da fácil obtenção. Logo, servem para identificar áreas suscetíveis à emissão de Carbono, e, assim, gerir as ações de mitigação para combater de forma mais eficiente as mudanças climáticas (BRADY; WEILL, 2013).

Considerando que as mudanças de uso e manejo dos solos são cada vez mais rápidas, os sistemas de classificação de solos devem permitir agrupamentos transitórios e a adição de novos grupos de solos em função de características de degradação. Isso tornaria dinâmica, precisa e rápida a intervenção em áreas degradadas, além de facilitar a cooperação internacional pelo uso de sistemas padronizados que possibilitassem incluir especificidades locais. Neste sentido, por sua arquitetura em dois níveis não hierarquizados e de qualificação o *Référentiel Pédologique* e o WRB são sistemas que possibilitam de forma mais simples e prática esta forma de taxonomia, além do WRB apresentar uma vantagem de ser um instrumento internacional e multilateral, que possibilita uma maior difusão das urgentes necessidades em se reorganizar os sistemas produtivos no que tange ao uso dos recursos pedológicos (MILANI *et al.*, 2006).

Diante disto, e aprimorando as discussões sobre qualidade, emerge nas ciências do solo o conceito de saúde do solo. Este conceito refere-se à capacidade continuada do solo de se comportar como um ecossistema vivo, capaz de desempenhar suas múltiplas funções, tais como suporte à produção de alimentos, fibras e biocombustíveis, regulação do fluxo de água, ciclagem de nutrientes, estocagem de carbono, habitat para a biodiversidade, matéria-prima à indústria e construção civil, além de ser um patrimônio e herança cultural (CHERUBIN; SCHIEBELBEIN, 2022). Esta abordagem holística comporta as grandes questões ambientais que se colocaram no século XXI, onde a pressão sobre os sistemas naturais não é somente local, mas sim global, exigindo cada vez mais práticas sustentáveis e integradas de uso para manutenção e ou melhora da saúde do solo. Na literatura, observa-se estudos que visam avaliar a saúde do solo por modelos gerais, a exemplo de Deel (2024) e Lichtenberg (2024), porém é necessário lembrar que há uma grande variabilidade regional associada à demanda ecológica e social do solo, que pode modificar os parâmetros para que se considere um solo saldável ou não.

Soma-se a isto os conceitos de agricultura regenerativa e agroecológica ou sintrópicas (PEDRINHO *et al.*, 2024). A primeira busca melhorar as práticas já existentes, com uso de agricultura de precisão, bioinsumos, sistemas integrados, plantio direto e inventários de ciclo de vida, mas não altera as estruturas produtivas. Já a segunda seria baseada em formas de plantio multiculturais, reproduzindo os ambientes naturais de alta diversidade de plantas, que funcionam de forma simbiótica, onde cada planta utiliza os materiais e nutrientes das demais, e é mais dependente das condições locais com cadeias produtivas e logísticas mais curtas (YODA *et al.*, 2020). Estas práticas, associadas aos processos de ecologia industrial, podem funcionar, de modo a reduzir e degradação dos recursos hídricos e pedológicos (ZIMMERMAN *et al.*, 2019), e as emissões de Carbono, mitigando as mudanças climáticas que já ocorre de forma muito intensa nos dias de hoje, e que tem submetido os ecossistemas a variações ambientais e climáticas muito intensas.

Deve-se destacar a dependência da agropecuária frente a fatores naturais (fertilidade, água e luz), e a impactos como as mudanças climáticas. Serviços ecossistêmicos estão sendo comprometidos devido ao avanço do desmatamento (Resende *et al.*, 2019; Gatti *et al.*, 2021; Rosa *et al.*, 2021; Leite Filho *et al.*, 2021), e tem refletido no aumento da erosão dos solos e nas emissões de Carbono, com impacto nas mudanças climáticas devido à liberação de estoques de Carbono dos solos e da vegetação. Podemos destacar que, no Brasil, as secas da Amazônia, como demonstram MARENGO *et al.*, (2011), e as secas seguidas de cheias no sul do Brasil, em especial no Rio Grande do sul (NEDEL *et al.*, 2012), que já eram problemas cerca de 15 anos atrás, somados ao aumento da frequência de eventos meteorológicos extremos com deslizamentos, enchentes e vendavais (BRASIL, 2022), associadas às constantes crises hídricas de abastecimento público de água, têm sido ainda mais frequente e intensos (MARENGO *et al.*, 2015). Neste contexto, temos ainda a formação de regiões áridas e desérticas no bioma da Caatinga (TOMASSELA *et al.*, 2018), o que, conjuntamente as elevadas taxas de desmatamento em todos os biomas do país, são motivos de muita preocupação (PBMC, 2016; HOUGHTON; NASSIKAS, 2017; CATANHO *et al.*, 2020; GATTI *et al.*, 2021; RAJÃO *et al.*, 2022). Estes fenômenos tendem a se intensificar e serem mais recorrentes, caso não sejam adotadas medidas para o controle das mudanças climáticas e do desmatamento, e poderão tornar os solos mais suscetíveis a eventos hidrossedimentológicos extremos, resultando em efeitos de *feedback* e de degradação cada vez mais intensos (IPCC, 2018).

Portanto, o uso racional e o estabelecimento de zoneamentos e classificações internacionais sobre a degradação dos recursos naturais é imprescindível, visto que a adaptação as mudanças climáticas irão remodelar as formas de uso e manejo dos solos (IPCC, 2018; BRASIL, 2022). Assim, se pretendemos fixar Carbono nos solos, devemos ressaltar que os estoques de Carbono da vegetação e do solo possuem suas particularidades no que diz respeito à dimensão e à velocidade com que ocorrem as trocas entre os diferentes compartimentos ambientais deste ciclo biogeoquímico. Deste modo, a magnitude e intensidade dos impactos antrópicos da agropecuária sobre os GEE dependem de fatores como bioma, tipos de solos e de uso e manejo (HOUGHTON; NASSIKAS, 2017; GATTI *et al.*, 2021; RAJÃO *et al.*, 2022), ainda mais quando consideramos as diversas interações que ocorrem em um território (**Figura 1**).

Destarte, os principais sistemas de taxonomia não contemplam essa complexidade quando tratamos de categorizar a degradação pedológica e os estoques de Carbono deles. Nesse contexto, a classificação dos solos em subníveis pela adição de qualificadores, ou mesmo pela criação de novos grupos de referência de solos, em função dos tipos de degradação predominante, além da elaboração de mapeamentos mundiais de saúde do solo, deveriam ser feitos de forma sistematizada e padronizada internacionalmente. Neste âmbito, a criação de mapeamentos mundiais já tem ocorrido, como o de carbono dos solos, pelo MapBiomas (2023), erosão hídrica, do Esdac (2021), entre outros. Contudo, esses mapeamentos são ainda em níveis insatisfatórios e em baixa resolução espacial e temporal, em vista das urgências ambientais.

De tal modo, os sistemas globais de taxonomia podem de forma mais efetiva categorizar os solos em função de suas taxas de erosão, do risco pela presença de contaminantes, da perda de serviços ambientais, de sua erodibilidade e ou da fragilidade a emissão de GEE, entre outras condições pedogenéticas. Neste contexto, são necessários mapeamentos globais em escalas de resolução espacial e temporal compatíveis ao Tier 3 (IPCC 2006), ou seja, mapeamentos em escala de pelo menos 1:200.000, além do aumento das estações e das redes internacionais de monitoramento ambiental, visando uma atuação mais rápida, dinâmica e especializada, para garantir uma fiscalização adequada e a proteção ambiental, para que possamos evitar riscos e agir de modo ágil quando ocorrem catástrofes ambientais.

## 6. Conclusões

- 1 – A Taxonomia dos solos deriva dos conceitos desenvolvidos por Dokuchaev e foi estabelecida pela arquitetura de classificação desenvolvida pela *Soil Taxonomy*.
- 2 – Os sistemas de classificação evoluíram de agrupamentos baseados em critérios diagnósticos comparativos, de estrutura fechada e definida, para técnicas de taxonomia menos rígidas e com menos subníveis hierárquicos, que permitem a introdução de qualificadores de forma cada vez mais aberta.
- 3 – À medida que os métodos e equipamentos de análises e coleta de dados ambientais foram aprimorados, ocorreu também a tendência e a necessidade de criar taxonomias cada vez mais dinâmicas, individualizadas e *intergrade*.
- 4 – A *Soil Taxonomy* e o SiBCS atendem muito bem a demanda de classificações pedogenéticas e agronômicas, porém, quando tratamos de degradação dos solos e de fatores *intergrade* e transitórios, o *Référentiel Pédologique* e o WRB são mais apropriados.
- 5 – Os sistemas de classificação são ferramentas que devem ser empregadas com uso de padrões internacionais, para suscitar, fiscalizar e promover mudanças sustentáveis de uso e manejo dos solos, pois os impactos ambientais são cada vez mais globais e heterogêneos, demandando esforços coordenados e coletivos entre os diferentes países.
- 6 – Os Sistemas de taxonomia devem empregar classificações que agregam indicadores de saúde e sustentabilidade dos solos, e dos tipos de manejos empregados na produção agropecuária, inserindo horizontes diagnósticos ou criando uma ordem que contemple os solos antropizados.

## Referências bibliográficas

AB'SÁBER, A. N. A Terra Paulista. **Boletim Paulista de Geografia**, v. 23, p. 5-38, 1956.

AFES - Association Française pour L'Etude du Sol. **Référentiel Pédologique**. Association Française pour 685 l'Etude du Sol. Paris, France: Editions Quae, 2008.

ALBARRACIN, H. S.; ROSAS, J. T. F.; GRESCHUK, L. T.; BELLINASSO, H.; MINASNY, B.; GOMEZ, C.; MARQUES JÚNIOR, J.; FERNANDES, K. Mapping Brazilian soil mineralogy using proximal and remote sensing data. **Geoderma**, v. 432, p. 116414. abr. 2023.

ALMEIDA, F. F. M. **Fundamentos geológicos do relevo paulista**. São Paulo: Instituto Geográfico e Geológico, Geologia do Estado de São Paulo, p. 167-263 (Boletim, 41), 1964.

AYER, J. E. B.; MINCATO, R. L.; LÄMMLE, L.; SILVA, L. F. P. M.; GAROFALO, D. F. T.; SERVIDONI, L. E.; SPALEVIC, V.; PEREIRA, S. Y. Hydrosedimentological dynamics in the guarani aquifer system, Ribeirão Preto, state of São Paulo, Brazil. **The Journal Agriculture and Forestry**, v. 66, p. 215-232, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.66.1.20>

AYER, J. E. B.; LÄMMLE, L.; GAROFALO, D. F. T.; MINCATO, R. L.; SERVIDONI, L. E.; PEREIRA, S. Y. Dinâmica espaço-temporal do uso e ocupação da terra no Município de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território**, v. 1, p. 88-120, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17127/got/2021.21.004>

AZEVEDO, A. As Regiões Brasileiras. 4. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional; 1968.

BAHIA, A. S. R. de S.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S. Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, p. 150-156. ago. 2015.

BALDWIN, M.; KELLOGG, C. E.; THORP, J. Soil classification. Washington, D.C: Department of Agriculture. **Soils and men**, p. 979-1001, 1938.

BARROS, O. N. F. (1986) Análise estrutural e cartografia detalhada dos solos em Marília, SP: ensaio metodológico. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

- BATJES N. H. **IPCC default soil classes derived from the harmonized World Soil Data Base**. 1.1 ed. Report 2009/02b, Carbon benefitis project (CBP) and Isric – World Soil Information; 2010.
- BARROS, H. C.; DRUMOND, J. L.; CAMARGO, M. N.; LEMOS, P. O. e C.; LEMOS, R. C.; MENDES, W. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio de Janeiro e Distrito Federal**. Contribuição a Carta de Solos do Brasil. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura; 1958.
- BERTALANFFY, L. V. **General System Theory: Foundations, Development, Applications**. New York: Braziller; 1952.
- BERTONI, J. O espaçamento dos terraços em culturas anuais, determinado em função das perdas por erosão. **Bragantia**, v. 18, p. 115-138, 1959.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Livro Ceres; 1985.
- BERTRAND, G. Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. **Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-ouest**, v. 39, p. 249-272, 1968.
- BEROUTCHACHVILI, N.; BERTRAND, G. Le Geosystème ou Système Territorial Naturel. **Revue Géographique des Pyrénées et du Ouest Toulouse**, v. 49, p. 167-180, 1978.
- BIGARELLA, J. J. Variações climáticas no Quaternário e suas implicações no revestimento florístico do Paraná. **Boletim Paranaense de Geografia**, v. 10/15, p. 211-231, 1964.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. 1. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 1994.
- BOCKHEIM J. G.; GENNADIYEV A. N. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. **Geoderma**, v. 95, p. 53-72, 2000. DOI: 10.1016/S0016-7061(99)00083-X
- BOULET, R. Toposéquences de sols tropicaux en Haute Volta: équilibres et déséquilibres pédobioclimatiques. **Mém. ORSTOM**, v.85, 1978, 272 p.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BRASIL. ME 049: **Solos: determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas De Rodagem, 1994.
- BRASIL; Dourado F.; Sapienza A.; Bastos C.; Leiras A. **Plano Nacional de Proteção e Defesa Civil: Produto 2 - Identificação de riscos e Cenários prováveis de atuação**. Fortalecimento da cultura de gestão de riscos de desastres no Brasil. 2022. 162 p. URL: <https://pnec.com.br/>
- BRAAT, L. C. **The value of the ecosystem services concept in economic and biodiversity policy**. In: JACOBS, S., DENDONCKER, N., KEUNE, H. (Eds.), *Ecosystem Services, Global Issues, Local Practices*. Amsterdam: Elsevier, 2013. p. 19-28.
- CAVALCANTI, L. C. S.; SANTOS, K. P.; SANTOS, D. S. S. Estrutura, Funcionamento e Uso de Geossistemas Locais no Semiárido Brasileiro. **Boletim de Geografia**, v. 37, p. 218-234, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v37i2.38222>
- CAVALCANTI, L. C. S.; CORREA, A. C. B. . Geossistemas e Geografia no Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 61, p. 3-33, 2016. DOI: [https://doi.org/10.21579/issn.2526-0375\\_2016\\_n2\\_p3-33](https://doi.org/10.21579/issn.2526-0375_2016_n2_p3-33)
- CASTRO, S. S. Sistema de transformação pedológica em Marília, SP: B latossólicos e B texturais. 1 v. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1989.

- CATANHO P. A. G.; SILVA E. M.; GOMES D. T.; ALVES J. M. B. Climate change, disaster increase and prevent needs. **Revista brasileira de meteorologia**. v. 35, n.3, 2020. URL: <https://doi.org/10.1590/0102-7786353012>
- CHAUI M. **Convite a filosofia**. 12. ed. São Paulo: Editora Ática, 2000. 440p.
- DIAS, R.L.; PEREZ FILHO, A. Novas considerações sobre Geossistemas e organizações espaciais em geografia. **Sociedade & Natureza**, v. 29, p. 409-421, 2017. DOI: 10.14393/SN-v29n3-2017-4
- CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB; 2001.
- CERRI, C.E.P.; PAUSTIAN, K.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.L.; MELILLO, J.M.; CERRI, C. C. Modeling changes in soil organic matter in Amazon Forest to pasture conversion with the Century model. **Global Change Biology**, v. 10, p. 815-832, 2004.
- CERRI, C. C.; VOLKOFF, B.; EDUARDO, B. P. Efeito do desmatamento sobre a biomassa microbiana em latossolo amarelo da Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 9, p. 1-4, 1985.
- CHERUBIN, M. R.; SCHIEBELBEIN, B. E. **Saúde do solo: múltiplas perspectivas e percepções**. São Paulo: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (USP), 2022. DOI: <https://doi.org/10.11606/9786587391342>; URL: [www.livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/936](http://www.livrosabertos.abcd.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/936)
- CHRISTOPHERSON, R. **Geossistemas: uma introdução à geografia física**. 7. ed. Porto Alegre: Bookmam; 2011.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher; 1999.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher; 1980.
- CHORLEY, R. J. **Geomorphology, and general systems theory**. In: U. S. Geological Survey Professional Paper, Washington: United States Government Printing Office, 1962. p.1-10.
- COSTANZA, R; DE GROOT, R; BRAAT, L; KUBISZEWSKI, I; FIORAMONTI, L; SUTTON, P; FARBER, S; GRASSO, M. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? **Ecosystem Services**, v. 28, p. 1-16, 2017. URL: DOI: 10.1016/j.ecoser.2017.09.008
- COSTANZA, R.; DALY, H. E. Natural capital and sustainable development. **Conservation Biology**. v. 6, p. 37-46, 1992.
- CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A. C.; FONTES, L. E. F. **Vocabulário de Ciência do Solo**. 1. ed. Campinas: SBCS, 1993.
- CURCIO, G. R., LIMA, V. C., & GIAROLA, N. F. B. 2004. Antropossolos: proposta de ordem (1ª aproximação). **Documentos** 101. Embrapa. 49p.
- DARWIN, C. R. **On the origin of species by means of natural selection**. Ed. Sue Asscher and David Widger. Project Gutenberg. 1998. URL: <https://www.gutenberg.org/cache/epub/1228/pg1228-images.html>
- DEEL, H. L.; MOORE, J. M.; MANTER, D. K. SEMWISE: A national soil health scoring framework for agricultural systems. **Applied Soil Ecology**, v. 195, p. 105273, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105273>.
- DE SOUZA, J. J. L. L.; CASTRO, F. E.; ANDRADE, C. V. P. A.; KER, J. C.; PEREZ FILHO, A. Brazilian semiarid soils formed during the last glacial maximum. **CATENA**, v. 223, p. 106899, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106899>

DATSRSA - Department of agricultural technical services of Republic of South Africa. **Soil classification a binomial system for South Africa**. Science bulletin 390, 1977.

DIAMMOND J. **Colapso: Como as civilizações escolhem o fracasso ou sucesso**. São Paulo: Record, 2007.

DORAN, J.W., SAFLEY, M. **Defining and assessing soil health and sustainable productivity**. In: Pankhurst, C. *et al.* (eds.). *Biological indicators of soil health*. Wallingford, UK: CAB International, p. 1–28, 1997.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. *Soil Health and Sustainability: Managing the Biotic Component of Soil Quality*. **Applied Soil Ecology**, v. 15, p. 3–11, 2000.

DOKUCHAEV, V. V. **On the doctrine of nature zones: Horizontal and vertical soil zones Publishing of St. Petersburg City Administration**, SPb, p. 28, 1899.

ERHART, H. *Biostasie et rhexistasie: esquisse d'une théorie sur le rôle de pedogenése en tant que phénomène géologique*. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences**, v. 241, p. 1218-20, 1955.

ESDAC - European Soil Data Centre. **Global Soil Erosion**, European Commission, Joint Research Centre. 2021. URL: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-soil-erosion#tabs-0-description=1>

ESPINDOLA, C. R. **Retrospectiva crítica sobre a pedologia: Um repasse bibliográfico**. Campinas-SP: Editora da Unicamp; 2008.

ESPINDOLA, C. R. *Histórico das pesquisas sobre solos até meados do século XX, com ênfase no Brasil*. **Revista do Instituto Geológico**, v.39, n.2, p. 27-70, 2018 DOI: <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20180007>

FALLOU, F.A. **Pedologie oder allgemeine und besondere Bodenkunde**. Dresden: G. Schönfeld's Buchhandlung, 1862. (Pedologia ou Ciência do Solo geral e especial).

FAO - IIASA. **Harmonized World Soil Database version 2.0**. Rome and Laxenburg. 2023. DOI: <https://doi.org/10.4060/cc3823en>

FAO-ITPS. Food and Agriculture Organization. **Global Soil Organic Carbon Map - GSOCmap**. Version 1.0, Rome: FAO; 2017.

FAO-IUSS. FAO/UNESCO - Food and Agriculture Organization. **Soil Map of the World**. FAO-GIS, 1998. URL: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/world-reference-base/en/>.

FAO-IUSS. Food and Agriculture Organization. Working Group WRB. **World Reference Base for Soil Resources**. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports No. 106*. FAO, Rome, 203p., 2014. URL: <https://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>.

FRIDLAND V. M. **Soil Map of the Russian Soviet Federative Socialist Republic at Scale 1:2.5 million**. All Union Academy of Agricultural Science, Moscow. Government Administration for Geodesy and Cartography (GUGK), 16 sheets, 1988.

FURQUIM, S. A. C.; ALMEIDA, Í. S. *Urban soils in Brazil: A review*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46, p. 1- 26, 2022. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210124>.

GALILEI, G. **Dialogue Concerning the Two Chief World Systems, Ptolemaic & Copernican**. Translated by Stillman Drake, University of California Press, 1953. <https://www.gutenberg.org/cache/epub/1228/pg1228-images.html>

GATTI, L. V.; BASSO, L. S.; MILLER, J. B.; GLOOR, M.; DOMINGUES, L. G.; CASSOL, H. L. G.; TEJADA, G.; ARAGÃO, L. E. O. C.; NOBRE, C.; PETERS, W.; MARANI, L.; ARAI, E.; SANCHES, A.

- H.; CORRÊA, S. M.; ANDERSON, L.; RANDOW, C. V.; CORREIA, C. S. C.; CRISPIM, S. P.; NEVES, R. A. L. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, p. 388–393, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- GUERRA, A. T. **Dicionário geológico-geomorfológico**. Inst. Pan-Americano de Geografia. e Estatística. Comissão de Geografia; Publ. n. 196. 1954.
- HOUGHTON R. A.; NASSIKAS A. A. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 31, p. 456–472, 2017. DOI: 10.1002/2016GB005546
- HARTEMINK A. E.; BOCKHEIM J. G. Soil genesis and classification, **CATENA**, v. 104, p. 251–256, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.12.001>
- HUMBOLDT, A. V. **Cosmos: A Sketch of the Physical Description of the Universe**. vol 1. E-book distributed by Project Gutenberg. Translated by Otté, E. C. 2005. URL: <https://www.gutenberg.org/cache/epub/14565/pg14565-images.html>
- HUTTON, J. **Theory of the Earth**. vol. 1. E-book distributed by Project Gutenberg. Ed. Robert Shimmin and Renald Lavesque, 2004. URL: <https://www.gutenberg.org/cache/epub/12861/pg12861-images.html>
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S. Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. and Tanabe, K. (eds.). Japan: IGES, 2006. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Global Warming of 1.5°C**. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. IPCC, 2018. 630p. URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15\\_Full\\_Report\\_High\\_Res.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf)
- ISBELL, R. F. **The Australian soil classification**. Collingwood: CSIRO; 1996.
- JENNY, H. **Factors of soil formation**. New York: McGraw-Hill; 1941.
- KEPLER, J. **Epitome of Copernican Astronomy & Harmonies of the World**; Translated by Charles Glenn Wallis, Prometheus Books: New York, 1995.
- KUHN, Thomas S. **A estrutura das revoluções científicas**. 5. ed. São Paulo: Editora Perspectiva S.A, 1997.
- KOYRÉ, A. **Estudos galilaicos**. Lisboa: Publicações Dom Quixote; 1986.
- KUHN, T.S. **A estrutura das revoluções científicas**. 11. ed. São Paulo: Perspectiva; 2011.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impact on global climate change and food security. **Science**, v. 304, p. 1623–1627, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- LÄMMLE, L.; SANTOS, C. J.; AYER, J. E. B.; BARBOSA, A. I. G. Interações socioambientais nas margens do rio Paraíba do Sul em Campos dos Goytacazes/RJ: considerações sobre o caso da indústria Corbion. **Revista Contexto Geográfico**, v. 5, p. 133–144, 2020. DOI: <https://doi.org/10.28998/contegeo.v5i10.11290>
- LÄMMLE, L.; PEREZ FILHO, A.; DONADIO, C.; ARIENZO, M.; FERRARA, L.; SANTOS, C. J.; SOUZA, A. O. Anthropogenic Pressure on Hydrographic Basin and Coastal Erosion in the Delta of Paraíba do Sul River, Southeast Brazil. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, p. 1585, 2022. DOI: 10.3390/jmse10111585
- LAVOISIER, A. L. **Elements of Chemistry**. E-book distributed by Project Gutenberg. Ed. Robert Shimmin and Renald Lavesque. E-book distributed by Project Gutenberg Translated by Kerr Roberts, Produced by

- Mark C. Orton, and Josephine Paolucci, 2009. URL: <https://www.gutenberg.org/cache/epub/30775/pg30775-images.html>
- LEITE-FILHO, A. T.; SOARES-FILHO, B. S.; DAVIS, J. L.; ABRAHÃO, G. M.; BÖRNER, J. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. **Nature Communication**, v. 12, p. 2591, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>
- LEMONS, R.C.; SANTOS, R.D.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 1. ed., Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1963.
- LENSE, G. H. E.; LÄMMLE, L.; AYER, J. E. B.; LAMA, G. F. C.; RUBIRA, F. G.; MINCATO, R. L. Modeling of Soil Loss by Water Erosion and Its Impacts on the Cantareira System, Brazil. **Water**, v. 15, p. 1490, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15081490>
- LEPSCH, I. F.; OLIVEIRA, J. B. **Explicações sumárias sobre a nova nomenclatura das legendas de mapas pedológicos de São Paulo**. Boletim Técnico. Campinas-MG: Instituto Agronômico de Campinas; 1987.
- LI, F. **Chinese Soil Taxonomy**. Beijing: Science Press; 2001.
- LICHTENBERG, E. Thinking about soil health: A conceptual framework. **Soil Security**, v. 14, p. 100130, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100130>.
- LOURENÇO, E. R. C; SOUZA, B. I.; D'ANDREA, A. F.; De SOUZA, J. J. L. L. Temporal variation of soil CO<sub>2</sub> emission in different land uses in the Caatinga. **Applied Geography**, v. 140, p. 102661, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102661>
- MACHADO, O. **Apontamentos para o estudo da natureza do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro-RJ: Bol. do D. N. E. R.; 1953.
- MANKOLO, R.; REDDY, C.; SENWO, Z.; NYAKATAWA, E.; SAJJALA, S. Soil Biochemical Changes Induced by Poultry Litter Application and Conservation Tillage under Cotton Production Systems. **Agronomy**, v. 2, p. 187–198, 2012.
- MANZATTO C. V.; BACA M.; FERNANDO J.; ASSAD, E. D.; PEREIRA, S. E. M. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2009.
- MAPBIOMAS. **Projeto de Mapeamento Anual estoque de C no Solo no Brasil**. MapBiomass, 2023. URL: <https://code.earthengine.google.com/?scriptPath=users/mapbiomas/user-toolkit:mapbiomas-user-toolkit-download.js>
- MARQUES NETO, R.; PEREZ FILHO, A.; OLIVEIRA, T. Geossistemas na bacia do Rio Verde (MG): proposta de mapeamento de sistemas ambientais físicos em escala regional. **Geografia**, v. 39, p. 321-335, 2014.
- MARENGO J. A.; NOBRE C. A.; SELUCHI M. H.; CUARTAS A.; ALVES L. M.; MENDIONDO E. M.; OBREGÓN G.; SAMPAIO G. A seca da crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**. n.106, p. 31-44, 2015. URL: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44>
- MARENGO, J. A., TOMASELLA, J., ALVES, L.M., SOARES, W.R., RODRIGUEZ, D.A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 1-5, 2011.
- MENDONÇA, F. **Geografia Física**. Ciência Humana. São Paulo: Contexto, 1991.
- MENDELEEV, D. O. K. **The Principles of Chemistry**. E-book distributed by Project Gutenberg. ed. T. A. LAWSON, 2016. URL: <https://www.gutenberg.org/cache/epub/51326/pg51326-images.html>

- MENDES, I.C.; SOUSA, D.M.G.; DANTAS, O.D.; LOPES, A.A.C.; JUNIOR, F.B.R.; OLIVEIRA, M.I.; CHAER, G.M. Soil Quality and Grain Yield: A Win–Win Combination in Clayey Tropical Oxisols. **Geoderma**, v.388, p. 114880, 2021.
- MILANI, L.; SOUZA, E. G.; URIBE-OPAZO, M. A.; GABRIEL FILHO, A.; JOHANN, J. A.; PEREIRA, J. O. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 28, n. 1, p. 591-598, 2006.
- MILNE, G. Some suggested units of classification and mapping particularly for East African soils. *Soil Research - Bodenkundliche Forschung, Supplement to the Proceedings of the International Union of Soil Science IV*, v. 183-198, 1935.
- MONTEIRO, C. A. F. **Qualidade ambiental na Bahia: Recôncavo e regiões limítrofes**. Salvador: CEI; 1987.
- MOREIRA, C. A.; ROSOLEN, V.; FURLAN, L. M.; BOVI, R. C.; MASQUELIN, H. Hydraulic conductivity and geophysics (ERT) to assess the aquifer recharge capacity of an inland wetland in the Brazilian Savanna. **Environmental Challenges**, v.5, p. 100274, 2021.
- MOREIRA, V. B.; LÄMMLE, L.; TORRES, B. A.; AYER, J. E. B.; MINCATO, R. L. Gênese e distribuição espacial de espodosolos no Brasil. *Interespaço: Revista de geografia e interdisciplinaridade*, v. 8, p. e202202-22, 2022. DOI: <https://doi.org/10.18764/2446-6549.e202202>
- MORIN, E. **O Método: a natureza da natureza**. Publicações Europa-América; 1977.
- NEDEL, A., SAUSEN, T.M., SAITO, S.M. Zoneamento dos desastres naturais ocorridos no estado do Rio Grande do Sul no período 1989 - 2009: granizo e vendaval. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, 2012.
- ODUM, E.P. **Fundamentals of ecology**. Saunders; 1953.
- OELKERS, E. H.; COLE, D. R. Carbon dioxide sequestration: a solution to the global problem. **Elements**, v. 4, p. 305-310, 2008. DOI: <https://doi.org/10.2113/gselements.4.5.305>.
- PATON T. R.; HUMPHREYS G. S. A critical evaluation of the zonalistic foundations of soil science in the United States. Part I: The beginning of soil classification. **Geoderma**, v. 139, n. 3–4, p. 257-267, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.020>
- PBMC. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil, 2016. 184p. Disponível: [https://ppgoceano.paginas.ufsc.br/files/2017/06/Relatorio\\_DOIS\\_v1\\_04.06.17.pdf](https://ppgoceano.paginas.ufsc.br/files/2017/06/Relatorio_DOIS_v1_04.06.17.pdf)
- PEDRINHO, A., MENDES, L.W., PEREIRA, A.P.A., ARAUJO, A.S.R., Vaishnav, A., Karpouzas, D.G., Singh, B.K. Soil microbial diversity plays an important role in resisting and restoring degraded ecosystems. **Plant Soil**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06489-x>
- POMEROL, C.; LAGABRIELLE, Y.; RENARD, M.; GUILLOT, S. **Princípios de Geologia: técnicas modelos e teorias**. Porto Alegre: Bookman; 2012.
- QUEIROZ NETO, J. P. Geomorfologia e Pedologia. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, v. 1, p. 59-67, 2000. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v1i1.70>
- RAJÃO R.; NOBRE A. D.; CUNHA E. L. T. P.; DUARTE, T. R.; MARCOLINO, C.; SOARES-FILHO, B.; SPAROVEK, G.; RODRIGUES, R. R.; VALERA, C.; BUSTAMANTE, M.; NOBRE, C.; LIMA, L. S. The risk of fake controversies for Brazilian environmental policies. **Biological Conservation**, v. 266, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109447>

- RAMALHO F. A.; BEEK K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Brasília-DF: Embrapa-CNPq, 1994.
- RANZANI, G. **Manual de levantamento de solo**. São Paulo: EDUSP, 1965. 112p.
- RANZANI, G. **Manual de levantamento de solos**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 1969. 167p.
- RENARD, K. G.; FOSTER, G. A.; WEESIES, D. K.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. **Department of Agriculture, Agriculture Handbook**, v. 703, 1997.
- RESENDE F.M.; CIMON-MORIN J.; POULIN M.; MEYER L.; LOYOLA R. Consequences of delaying actions for safeguarding ecosystem services in the Brazilian Cerrado, **Biological Conservation**, v. 234, p. 90-99, 2019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.03.009>
- RODRÍGUEZ, J. M. M.; SILVA, E. V. **Teoria dos Geossistemas, o legado de V.B. Sochava: Volume I Fundamentos Teórico- Metodológicos**. Fortaleza: Edições UFC; 2019.
- ROSA, M. R.; BRANCALION P.H. S.; CROUZEILLES R.; Et. al. Hidden destruction of older forests threatens Brazil's Atlantic Forest and challenges restoration programs. **Science Advances**, v. 7, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc4547>
- ROSIN, N. A.; DEMATTÊ, J. A. M.; POPPIEL, R. R.; SILVERO, N. E. Q.; RODRIGUEZ-ALBARRACIN, H. S.; ROSAS, J. T. F.; GRESCHUK, L. T.; BELLINASSO, H.; MINASNY, B.; GOMEZ, C.; MARQUES JÚNIOR, J.; FERNANDES, K. Mapping Brazilian soil mineralogy using proximal and remote sensing data. **Geoderma**, v. 432, 116414, 2023.
- RUBIRA F. G., BARREIROS A. M., VILLELA F. N. J., PEREZ FILHO A. Sistemas pedogeomorfológicos na interpretação da evolução de paisagens quaternárias em climas tropicais úmidos. **Mercator**, p. 1-17, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4215/rm2019.e18020>
- RUSAKOVA, E.; SUKHACHEVA, E.; HARTEMINK, A.E. Vasiliy Dokuchaev – A biographical sketch on the occasion of his 175th birthday, **Geoderma**, v. 412, p. 115718, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115718>
- RUSSELL, B. **A perspectiva científica**. São Paulo: Companhia editora nacional; 1969.
- SANDER, G. C. **Mathematical soils erosion modeling**. In: Water interactions with energy, environment, food and agriculture. Paris: UNESCO, v. 2, 2005. p. 318-368.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília-DF: Embrapa; 2018.
- SANTOS, R. F. **Planejamento Ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Texto; 2004.
- SBCS - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. **O desafio de definir valores de referência**. Viçosa-MG: Boletim informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2013.
- SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; FERREIRA, D. F. Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.2287-2298, 1999.
- SOUZA C. S.; SABIONI S. C.; LIMA F. S. **Agroecologia: Métodos e técnicas para uma agricultura sustentável**. Volume 1. Guarujá-SP: Editora Científica digital, 2021.
- SOCHAVA, V. B. **Algumas noções e termos da Geografia Física**. Relatórios do instituto de Geografia da Sibéria e do Extremo Oriente, 1963.

- SOTCHAVA, V. B. **O estudo de geossistemas**. São Paulo-SP: Instituto de Geografia - USP, Editora Lunar; 1977.
- STRAHLER, A.N. **Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks**. In: Chow, V.T., Ed., New York: Handbook of Applied Hydrology, McGraw Hill, v. 4, 1954. p. 39-76.
- SUKACHEV, V. Biogeocenologia e fitocenologia florestal. Doklady, URSS, p. 447-449, 1945.
- TIBERG, E. **Nordic Reference Soils**. 1. Characterisation and classification of 13 typical Nordic soils. 2. Sorption on 2,4 D, Atrazine and Glyphosate. Tema Nord, v. 537, 1998.
- THORP, J.; SMITH, G. D. Higher categories of soil classification: order, suborder, and great soil group. **Soil Sciences**, v. 67, p. 117-126, 1949.
- TOKONOGOV V. D.; LEBEDEVA I. I.; GERSAMIVOVA M. I. **Classification and Diagnostics of Soils of the USSR**, Moscow: Kolos; 1977.
- TOMASELLA J.; VIEIRA R. M. S. P.; BARBOSA A. A.; RODRIGUEZ D. A.; SANTANA M. O.; SESTINI M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012>
- TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN; 1977.
- TROPPIAIR, H. Ecossistemas e geossistemas do estado de São Paulo. **Boletim de Geografia Teórica Rio Claro**, v. 13, p. 27-36, 1983.
- UNFPA – United Nations Populations Fund. **Relatório sobre a Situação da População Mundial Construindo Consenso: Cultura, Gênero e Direitos Humanos**, 2008.
- USDA - Soil Survey Staff, **Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys**. Washington: Agriculture Handbook, v. 436, 1999.
- USDA - Soil Survey Staff. **World Soil Map**. Natural Resources Conservation Service Department of Agriculture, U.S. 2005. URL: <http://soils.usda.gov/use/worldsoils/mapindex/order.html>
- USDA -Soil Survey Staff. **Keys to Soil Taxonomy**, 13th edition. Washington: USDA Natural Resources Conservation Service; 2022.
- VAN BRUGGEN, A.H.C.; SEMENOV, A.M.; VAN DIEPENINGEN, A.D.; DE VOS, O.J.; BLOK, W.J. Relation between Soil Health, Wave-like Fluctuations in Microbial Populations, and Soil-Borne Plant Disease Management. **European Journal of Plant Pathology**. v.115, p. 105–122, 2006.
- VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S.; M, COOPER, M. Pedogênese em uma seqüência latossolo-podzólico na borda de um platô na depressão periférica paulista. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 23, n.4, p. 909-921, 1999.
- VROM - Ministry of Housing, spatial planning and environment. **Intervention values and target values: soil quality standards**. The Hague, 1994.
- YODDA, S., LAOHASIRIWONG, S., RAMBO, A.T. Naming, Classification, and management of paddy soils by Thai-Lao rice farmers in a village in Northeast Thailand. **Geoderma**, v. 369, p. 114332, 2020.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. A rainfall erosion index for a Universal Soil- Loss Equation. **Soil Science Society American**, v. 23, p. 246-249, 1959.
- ZIMMERMAN, E.K., TYNDALL, J.C., SCHULTE, L.A., LARSEN. G.L.D. Farmer and Farmland Owner Views on Spatial Targeting for Soil Conservation and Water Quality. **Water Resources Research**, v 55, p. 5, 2019.



BY



NC



SA

Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual* (CC BY-NC-SA).