

Solos em Alerta: Conhecer para Decidir em Gestão de Riscos

Elsa Sampaio (pHD)
Departamento de Geociências
Universidade de Évora
ems@uevora.pt

ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO

2 - O SOLO NO SISTEMA TERRA

2.1 - AS FUNÇÕES DO SOLO

2.1.1 - Funções Ecológicas

2.1.2 – Funções Sócio-económicas

2.2 – O SOLO COMO RECURSO FINITO E NÃO RENOVÁVEL À ESCALA DA VIDA HUMANA

3 – SAÚDE E QUALIDADE DO SOLO: CONCEITOS E INDICADORES

3.1 – CONCEITOS DE “SAÚDE DO SOLO” E “QUALIDADE DO SOLO”

3.1.1 – Indicadores Físicos de Saúde e Qualidade do Solo

3.1.2 – Indicadores Químicos de Saúde e Qualidade do Solo

3.1.3 – Indicadores Biológicos de Saúde e Qualidade do Solo

3.1.4 – Integração de Indicadores Físicos, Químicos e Biológicos de Saúde e Qualidade do Solo

3.2 – LIMITAÇÕES DA AVALIAÇÃO DA SAÚDE E QUALIDADE DO SOLO

4 – DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO À GESTÃO DO TERRITÓRIO

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 - INTRODUÇÃO

O solo é um dos recursos naturais mais importantes dos nossos ecossistemas, com funções vitais que muitas vezes passam despercebidas. Ele produz os alimentos que comemos, regula o fluxo de água, armazena carbono e abriga uma parte da nossa biodiversidade, entre outras funções que exerce. O solo é um sistema dinâmico, que resulta da combinação de fatores físicos, químicos, biológicos, e ainda, da influência humana. Assim sendo, a sua degradação compromete, não apenas a sustentabilidade dos ecossistemas, mas também, a segurança ambiental e socioeconômica das populações humanas.

Nas últimas décadas, a intensificação do uso da terra, a expansão urbana, a contaminação e os efeitos das alterações climáticas têm aumentado significativamente os riscos ambientais relacionados com o solo. Erosão acelerada, deslizamentos de terra, compactação do solo, salinização e poluição de águas subterrâneas são alguns exemplos deste tipo de problema. Estes processos são frequentemente lentos e cumulativos, o que torna difícil percebê-los até que seja tarde demais. Eles desafiam os modelos tradicionais de gestão e exigem abordagens mais integradas e baseadas em evidências científicas.

Quando se fala em risco ambiental relacionado com o solo, é necessário considerar três elementos principais: o risco em si, a vulnerabilidade do local e a exposição das pessoas e infraestruturas. Para fazer uma avaliação eficaz, é fundamental entender como o solo se forma e como os processos de degradação funcionam. A ciência do solo oferece métodos quantitativos e qualitativos para caracterizar, monitorar e modelar esses riscos através do uso de ferramentas como: cartas temáticas, sistemas de informação geográfica, indicadores de qualidade do solo e análises multicritério. O grande desafio, é transformar todo esse conhecimento em decisões práticas na gestão do território e do meio ambiente.

Conclui-se, portanto que é necessário reconhecer o solo como recurso central na gestão de riscos ambientais e recorrer ao conhecimento científico para a tomada de decisões em planejamento com criação de estratégias de prevenção, redução e adaptação a estes riscos.

2 – O SOLO NO SISTEMA TERRA

O solo é um recurso fundamental do “Sistema Terra”, situado no ponto de encontro entre a litosfera, a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera. Desde 1997 que a Soil Society of Soil Science, definiu o solo como sendo “*O material não consolidado, mineral e/ou orgânico, existente à superfície da Terra e que serve de meio natural para o crescimento das plantas*”. Ele é o resultado de processos de formação (Processos Pedogenéticos) que atuam ao longo do tempo sobre o material original, o qual sofre a influência do clima, dos organismos, do relevo e da ação humana. Por estar neste ponto de encontro, o solo assume um papel central na regulação e controlo das trocas de energia e materiais nos ecossistemas e dele depende grande parte do seu funcionamento e sustentabilidade das atividades humanas.

Por exemplo, em contexto do ciclo hidrológico, o solo assume um papel importante na qualidade da água, na recarga de aquíferos e no escoamento superficial. Características físicas do solo como textura, estrutura e porosidade, determinam a sua capacidade para regular fluxos hídricos e atenuar fenómenos extremos, como cheias e secas. Tal como destacado por Brady e Weil, (2017) isto mostra claramente como solo, água e riscos ambientais estão profundamente interligados.

O solo desempenha funções estruturais no Sistema Terra, mas a produção de biomassa tem sido privilegiada em detrimento de outras funções ecológicas, conduzindo a práticas de uso do solo que ignoram os limites do sistema e aceleram os processos de degradação.

Reconhecer o solo como parte ativa do Sistema Terra, implica uma abordagem integrada que avalie a sua saúde, antecipe processos de degradação e fundamente decisões orientadas para a prevenção e a sustentabilidade dos territórios.

2.1 - AS FUNÇÕES DO SOLO

O solo desempenha um conjunto de funções que resultam da interação entre propriedades físicas, químicas e biológicas e são determinantes para a sua saúde e qualidade.

Compreender as funções do solo é fundamental para uma gestão integrada com foco na prevenção da degradação do solo. O solo não é apenas um recurso ao serviço do conforto humano, e sim um elemento estruturante dos sistemas ambientais e sociais, cuja proteção é indispensável para a redução dos riscos ambientais.

2.1 - Funções Ecológicas

Consideram-se funções ecológicas, aquelas que constituem processos naturais essenciais ao equilíbrio dos ecossistemas e à sustentabilidade da vida na Terra, das quais dependem as sociedades humanas.

Entre as principais funções ecológicas do solo destacam-se:

Suporte para a Produção de Biomassa

O solo é um substrato físico para o sistema radicular das plantas e, simultaneamente, é um substrato nutritivo que assegura a utilização de água e nutrientes necessários ao crescimento vegetal e, portanto, a manutenção da produtividade dos ecossistemas naturais e agrícolas. Assim sendo, está na base da vida humana uma vez que assegura o aprovisionamento em alimentos, bioenergia e produção de fibras.

Regulador Ambiental

O solo atua como regulador dos principais ciclos biogeoquímicos, através de filtração, acumulação, amortecimento e transformação de diversos compostos que circulam entre a atmosfera, a hidrosfera e os organismos vivos. Funciona com um complexo de reações bio-físico-químico onde ocorrem fenómenos de filtração mecânica, adsorção e precipitação.

A retenção, transformação e degradação de poluentes no solo dependem da sua estrutura, teor em matéria orgânica e atividade biológica. Quando estas competências estão degradadas, aumenta o risco de contaminação dos ecossistemas terrestres e aquáticos com consequências na saúde humana (FAO, 2021).

Reserva de Biodiversidade

O solo constitui um banco de sementes e um habitat fundamental para uma vasta diversidade de organismos macro e microscópicos, desempenhando um papel fundamental na estabilidade dos ecossistemas.

A perda de biodiversidade no solo reduz a resiliência dos sistemas solo-planta-atmosfera (Bardgett & Van der Putten, 2014).

2.1.2 - Funções Socio-económicas

Para além da produção de biomassa como atividade também económica, o solo suporta atividades relacionadas com a construção de infraestruturas importantes na qualidade de vida humana. O uso socioeconómico do solo, ignora frequentemente os seus limites ecológicos, conduzindo a processos de degradação com consequências e danos em bens e serviços ambientais. A avaliação socioeconómica do solo deve, por isso, incorporar não apenas o valor de mercado, mas também o valor dos serviços que os ecossistema prestam à sociedade (Dominati, Patterson, & Mackay, 2010).

Suporte de infraestruturas

A construção de infraestruturas habitacionais, industriais, de circulação e transportes, equipamentos de tempos livres e desportos, recepção de resíduos, etc, são importantes para a qualidade de vida humana. Contudo, ao exercer esta função o solo é, frequentemente, decapado ou impermeabilizado.

A impermeabilização do solo, associada à urbanização, representa uma perda quase total das suas funções ecológicas, sendo considerada uma das formas mais severas de degradação, com impactos diretos na infiltração da água, no ciclo do carbono e na biodiversidade (European Commission, 2021).

Fonte de matérias-primas e água

O fornecimento de água, argila, areia, cascalho, carvão, minerais, turfa, etc, para a produção técnica e industrial ou para fins socioeconómicos é também atribuída ao solo, como uma função importante para a qualidade de vida humana.

Suporte de Património Natural e Cultural

O solo é muito mais do que um recurso produtivo pois é nele que se instalam ecossistemas, paisagens e marcas da presença humana ao longo do tempo.

Do ponto de vista natural, o solo suporta paisagens características que integram o património natural de cada região contribuindo para a identidade biogeográfica dos territórios.

No plano cultural, o solo preserva vestígios arqueológicos, estruturas históricas, práticas agrícolas tradicionais e paisagens culturais moldadas por gerações, como por exemplo: terraços agrícolas, sistemas de regadio antigos ou sítios arqueológicos dependem da integridade do solo para a sua conservação.

Assim, proteger o solo é também proteger memórias e identidade que asseguram a transmissão do património natural e cultural às gerações futuras.

2.2 - O SOLO COMO RECURSO FINITO E NÃO RENOVÁVEL À ESCALA DA VIDA HUMANA

À escala da vida humana, o solo é um recurso finito e essencialmente não renovável, uma vez que a sua formação ocorre a velocidades extremamente lentas quando comparadas com a velocidade da sua degradação. Estima-se que a formação de alguns centímetros de demora centenas a milhares de anos, enquanto a sua perda pode demorar décadas de degradação, ou muito pouco tempo em eventos extremos isolados (Jenny, 1941; Montgomery, 2007).

Por outro lado, a finitude do solo decorre principalmente da irreversibilidade de muitos processos de degradação.

Reconhecer o solo como um recurso finito e não renovável implica uma mudança de atitude na sua gestão, com decisões orientadas para a prevenção da degradação evitando a necessidade de desenvolver estratégias de recuperação.

No contexto da gestão de riscos ambientais, esta perspetiva é particularmente relevante, para evitar a vulnerabilidade a fenómenos extremos e aumentar as opções futuras de uso do solo.

3 - SAÚDE E QUALIDADE DO SOLO: CONCEITOS E INDICADORES

3.1 - CONCEITOS DE “SAÚDE DO SOLO” E “QUALIDADE DO SOLO”

A saúde do solo está diretamente ligada ao funcionamento dos ecossistemas e à sua resiliência. Um solo saudável consegue lidar com pressões externas, como eventos climáticos extremos ou mudanças no uso da terra, sem perder a capacidade de exercer as suas funções ecológicas essenciais para a vida no planeta, pois é aquele que funciona como um sistema vivo integrado, mantendo a sua organização e capacidade de autorregulação ao longo do tempo. Por oposição, a degradação da saúde do solo

traduz-se numa perda de funcionalidade, frequentemente antecedendo manifestações mais visíveis de degradação, como erosão severa ou contaminação (Karlen et al., 2001).

A qualidade do solo é um conceito relacionado com a gestão e planeamento, tanto agrícola como ambiental. É uma ferramenta para avaliar a aptidão do solo para um determinado uso ou objetivo. Assim, a avaliação da qualidade do solo baseia-se num conjunto selecionado de indicadores, os quais são um conjunto de características do solo, selecionados de acordo com o uso pretendido e critérios de desempenho previamente definidos (Karlen et al., 2001).

É importante distinguir o conceito de saúde do solo do de qualidade do solo. A saúde do solo, depende da integridade do sistema como um todo, incluindo a sua biodiversidade, capacidade de regeneração e contributo para a sustentabilidade, enquanto o conceito de qualidade do solo se refere à aptidão que um solo tem para um determinado uso ou função específica. Assim, enquanto a qualidade do solo pode variar consoante o uso, a saúde do solo constitui um conceito mais abrangente e transversal (Bünemann et al., 2018).

Outra diferença entre estes conceitos está na sua relação com o tempo e com a mudança. A qualidade do solo é frequentemente avaliada num dado momento, podendo variar consoante as práticas de gestão e os objetivos definidos, enquanto a saúde do solo, tem uma dimensão temporal explícita, refletindo a capacidade do solo para resistir a perturbações e recuperar após impactos degradantes. Assim, o mesmo solo pode apresentar elevada qualidade para um determinado uso num determinado momento, mas evidenciar sinais de degradação da sua saúde a médio ou longo prazo, como diminuição do teor em matéria orgânica (Bünemann et al., 2018).

No contexto das alterações climáticas e do impacto da intensificação das pressões antrópicas no meio ambiente, o conceito de saúde do solo torna-se relevante na gestão de riscos ambientais. Solos saudáveis têm maior capacidade de infiltração e retenção de água, o que ajuda a reduzir o risco de cheias e erosão. Apresentam também, maior potencial de sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação das alterações climáticas. Assim, a saúde do solo não deve ser entendida apenas como um objetivo ambiental, mas como um fator estratégico na construção de territórios resilientes e adaptados a cenários futuros incertos (Lal, 2015).

Integrar o conceito de saúde do solo, no planeamento e nas políticas públicas representa, portanto, uma mudança de uma gestão reativa da degradação para uma gestão preventiva, baseada no funcionamento do sistema global. Isto implica desenvolver a capacidade de integrar os conhecimentos de ciência do solo com o reconhecimento de sinais precoces de degradação, para fundamentar decisões.

Contudo, isto não dispensa do conhecimento de todos os conceitos básicos, funcionalidade e inter-relação das características dos solos, provenientes da evolução da pedologia, pois só assim será possível seleccionar e analisar indicadores de forma informada, consciente e responsável.

3.1.1 – Indicadores Físicos de Saúde e Qualidade do Solo

Alterações nas características físicas do solo podem ser sinais de degradação, refletindo a relação entre fatores naturais e práticas de uso e gestão do solo. Assim, os indicadores físicos constituem um dos pilares fundamentais na avaliação da saúde e da qualidade do solo, uma vez que condicionam diretamente o seu funcionamento hidrológico e atmosférico, o desenvolvimento do sistema radicular e a atividade biológica.

Na avaliação da saúde do solo, a análise dos indicadores físicos permite avaliar, tanto a capacidade do solo para resistir a perturbações, como para recuperar após impactos. São indicadores particularmente importantes em contextos de intensificação agrícola, urbanização e alterações climáticas, onde processos como compactação, erosão e impermeabilização do solo comprometem a sua funcionalidade.

Na avaliação da qualidade do solo, auxiliam na previsão da resposta provável que o solo dará ao ser submetido a um determinado uso. As características físicas são analisadas a partir de limiares de comportamento em função de objectivos específicos, sendo, portanto, variáveis dependendo do uso pretendido ou estabelecido.

Muitos indicadores de saúde do solo, são também indicadores de qualidade do solo, contudo os seus limiares variam muito de acordo com o tipo de análise a efectuar, ter em consideração a sustentabilidade e resiliência do ecossistema ou considerar um determinado uso a curto prazo.

Entre outros, alguns dos indicadores de físicos mais frequentes são:

- Profundidade efectiva do solo
- Textura do solo
- Estrutura do solo
- Densidade aparente e Porosidade
- Estabilidade dos agregados
- Infiltração e Condutividade hidráulica

Profundidade efectiva do solo

A profundidade efetiva do solo corresponde à espessura da parte do perfil que pode ser explorada pelas raízes. A pequena profundidade efetiva, seja por processo de formação/evolução do solo, erosão ou compactação em horizontes sub-superficiais, limita o armazenamento de água e nutrientes comprometendo a sua capacidade produtiva e resiliência. Este indicador é particularmente relevante em avaliações de risco de degradação e na aptidão do solo para diferentes usos (FAO & ITPS, 2015), e também, em avaliações de saúde do solo.

Textura do solo

A textura do solo, definida pela proporção relativa da quantidade de cada lote de dimensões de partículas da terra fina, constitui uma propriedade física intrínseca e relativamente estável em cada horizonte. Embora não seja um indicador direto de saúde e/ou qualidade do solo, a textura influencia fortemente o comportamento do solo no que respeita à sua capacidade de retenção de água, permeabilidade, suscetibilidade à erosão e capacidade de armazenamento de nutrientes. Solos de textura mais fina tendem a apresentar maior capacidade de retenção de água, enquanto solos arenosos são mais vulneráveis à perda de água e nutrientes (Brady & Weil, 2017). Assim sendo, a textura do solo constitui um indicador físico de grande peso tanto na saúde como na qualidade do solo, variando de camada para camada dentro do mesmo perfil e

influenciando o comportamento do solo no seu todo de acordo com as práticas de gestão agrícola ou ambientais.

Estrutura do solo

A estrutura do solo é a característica do solo que diz respeito à conjugação da forma, dimensão e arranjo entre os sólidos e os espaços de cada horizonte. É um dos indicadores físicos mais sensíveis às práticas de gestão do solo. Uma estrutura bem desenvolvida favorece a infiltração e a circulação da água, do ar e das, sendo fundamental para a manutenção da atividade biológica. A degradação da estrutura, frequentemente associada ao excesso de mobilizações e ao tráfego de maquinaria pesada, conduz à redução da porosidade (compactação e compressão do solo) e à formação de crostas à superfície, aumentando o risco de erosão e escoamento superficial (Six et al., 2004), bem como, à redução da capacidade de armazenamento de água e recarga de aquíferos. Assim, também a estrutura do solo, constitui um indicador físico tanto de saúde como de qualidade do solo, variando de camada para camada dentro do mesmo perfil condicionando o comportamento do solo no seu todo, e variando de acordo com as práticas de gestão agrícola ou ambientais.

Densidade Aparente e Porosidade do solo

A densidade aparente diz respeito à concentração de sólidos num determinado volume total de solo, constituindo-se como um indicador físico utilizado para avaliar o grau de compactação do solo. Valores elevados de densidade aparente apontam para redução da porosidade total, o que dificulta a circulação de ar, água e raízes. A compactação do solo compromete a sua saúde, reduzindo a atividade biológica e aumentando a vulnerabilidade a processos de degradação física, mas também a qualidade do solo, ao condicionar a capacidade de produção de determinadas culturas. De acordo com Hamza & Anderson, (2005), a avaliação conjunta da densidade aparente e da distribuição de poros em função da sua quantidade, dimensão e continuidade em profundidade, permite uma caracterização mais completa das competências físicas do solo para a execução das suas funções.

Estabilidade dos agregados

A estabilidade dos agregados reflete a resistência da estrutura do solo à ação desagregadora da água, do vento ou das práticas de gestão agrícola e ambientais. Este indicador está relacionado com o teor em matéria orgânica e com a atividade biológica, funcionando como uma ligação entre os componentes físicos e biológicos da saúde do solo. Solos com baixa estabilidade de agregados são mais suscetíveis à erosão e à formação de crostas superficiais, comprometendo a infiltração e a germinação das plantas (Tisdall & Oades, 1982). Também a infiltração e capacidade de retenção da água, são influenciadas por esta característica física do solo e portanto, a sua influência no funcionamento do perfil em profundidade, faz-se sentir na saúde e qualidade do solo, de acordo com a análise pretendida.

Infiltração e Condutividade hidráulica

A infiltração e a condutividade hidráulica do solo são indicadoras das suas funções hidrológicas. Solos com estrutura favorável à vida vegetal, e elevada macroporosidade indicam uma fácil circulação de água dentro do solo apresentando maiores taxas de infiltração, o que contribui para a recarga de aquíferos e a redução do escoamento superficial. A diminuição destas propriedades está frequentemente associada à compactação, impermeabilização e perda de matéria orgânica, sendo um fator crítico no aumento do risco de cheias e erosão hídrica (Hillel, 2004).

3.1.2 – Indicadores Químicos de Saúde e Qualidade do Solo

Os **indicadores químicos** do solo determinam diretamente a disponibilidade de nutrientes, a reação (acidez/alcalinidade) e a capacidade do solo para sustentar funções biológicas e produtivas. Estes indicadores fornecem informação sobre o ambiente químico em que os organismos vivem, influenciando a dinâmica da matéria orgânica, a atividade microbiana e a capacidade de retenção de contaminantes.

Entre os muitos indicadores químicos do solo, os mais frequentes são:

- Teor em Matéria Orgânica e Carbono Orgânico do Solo
- Reação do solo
- Grau de Saturação em Bases e Capacidade de Troca Catiônica
- Nutrientes Essenciais – Macro e Micronutrientes
- Salinidade e Sodicidade
- Contaminação Química

Teor em Matéria Orgânica e Carbono Orgânico do Solo

O teor de matéria orgânica do solo é um indicador da saúde do solo, integrando funções químicas, biológicas e físicas, uma vez que a matéria orgânica influencia a capacidade de nutritiva através da sua influência na Capacidade de Troca Catiônica e Grau de Saturação em Bases, a retenção de água ao condicionar a porosidade e a estabilidade de agregados que está dependente da formação de agregados argilo-húmicos. Tal como afirmam Lal. R., (2015) e Bünemann et al., (2018), solos ricos em carbono orgânico apresentam maior resiliência a perturbações, enquanto a sua ausência ou insuficiência estão associadas à degradação da saúde e qualidade do solo.

Reação do Solo

A reação do solo, avaliada através do seu pH, é uma característica química que constitui um indicador de saúde e qualidade do solo pois influencia a solubilidade e disponibilidade de nutrientes e metais para os vegetais e os microrganismos. Solos extremamente ácidos ou alcalinos podem limitar o crescimento vegetal, afetar a quantidade e tipo de atividade microbiana e aumentar a mobilidade ou precipitação de elementos tóxicos como alumínio e manganês. Assim, a monitorização do pH é uma forma de avaliar a saúde do solo e definir estratégias de correção, como a prática de calagens ou a adição de materiais acidificantes (Brady & Weil, 2017).

Grau de Saturação em Bases e Capacidade de Troca Catiônica

A conjugação dos valores do grau de saturação com bases (V) e da capacidade de troca catiônica (CTC), geram diferentes competências para o solo reter e disponibilizar cátions, nomeadamente cálcio, magnésio, potássio e sódio, essenciais à atividade química do solo e à nutrição vegetal. Solos com baixa CTC têm limitada capacidade para fornecer nutrientes e correm mais riscos de lavagem/lixiviação de elementos e moléculas essenciais à manutenção das suas capacidades para exercer as funções ecológicas, desde a nutrição para a produção de biomassa, até à regulação ambiental. Por sua vez, o V e a CTC dependem da natureza dos minerais que constituem cada horizonte, do teor em matéria orgânica do solo, da textura e do tipo e quantidade de argila, sendo, tal como Brady & Weil, (2017) afirmavam, um indicador, tanto de saúde como da qualidade do solo.

Nutrientes Essenciais – Macro e Micronutrientes

A disponibilidade de nutrientes, tanto macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) **como** micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo) é uma característica importante na avaliação da capacidade nutritiva e a produtividade agrícola de cada solo. A ausência ou excesso relativo de alguns destes nutrientes pode resultar em deficiências ou toxicidades para os vegetais, afetando tanto a sua presença e tipologia como a atividade biológica do solo. A avaliação periódica destes elementos permite diagnosticar situações nutritivas e orientar práticas de adubação sustentáveis (FAO, 2015).

Salinidade e Sodicidade

A salinidade é uma característica do solo, representada pela concentração total de sais solúveis no solo, enquanto a sodicidade diz respeito à quantidade excessiva de sódio de troca na ---- do solo. Quando estas características estão presentes num solo, a degradação química com a sua influência na estrutura do solo, infiltração de água e disponibilidade de nutrientes, representam uma degradação química com consequências físicas no solo. Solos salinos e solos sódicos apresentam menor capacidade produtiva e maior vulnerabilidade à erosão e desertificação, em regiões

áridas e semiáridas (Rengasamy, 2006), e também em zonas sujeitas a práticas de gestão agrícola e ambiental erradas, pelo que são indispensáveis de ser constituídas como indicadores de saúde e qualidade do solo.

Contaminação Química

A presença de metais pesados (Pb, Cd, Hg), compostos orgânicos persistentes (pesticidas, hidrocarbonetos) e resíduos industriais, constituem um indicador de saúde e de qualidade do solo, especialmente em áreas urbanas, industriais ou agrícolas intensivas. Estes elementos podem acumular-se no solo por deposição direta ou diluídos em águas de rega e afetar a biodiversidade do solo ou bioacumular-se/biomagnificar tanto em vegetais como animais representando riscos para a saúde e qualidade do solo, e ainda, para a saúde humana através da cadeia alimentar. A avaliação de contaminantes é, portanto, uma componente essencial da gestão de riscos ambientais associados ao solo (FAO, 2021).

3.1.3 – Indicadores Biológicos de Saúde e Qualidade do Solo

Como já foi referido anteriormente, a quantidade e do solo, são características responsáveis por processos-chave que estão na base da fertilidade, e portanto, da produtividade e a resiliência dos ecossistemas terrestres, pelo que os indicadores biológicos são úteis na avaliação da saúde e qualidade do solo. Ao contrário dos indicadores físicos e químicos, que descrevem propriedades estruturais e composição de cada horizonte, os indicadores biológicos refletem processos ativos, fornecendo informação sobre as funções de vitalidade e capacidade de autorregulação do solo.

Entre os indicadores biológicos do solo, os mais frequentes são:

- Fauna do solo
- Biomassa e Biodiversidade microbiana
- Atividade enzimática
- Decomposição e circulação de nutrientes

Fauna do Solo

A macrofauna e mesofauna do solo onde se incluem: minhocas, toupeiras e ácaros, desempenham funções indispensáveis na formação de agregados, incorporação de matéria orgânica e arejamento do solo. A quantidade e diversidade destes organismos são simultaneamente causa e consequência das características estruturais e funcionais do solo. Assim, de acordo com Lavelle et al., (2006), a diminuição da fauna do solo é frequentemente associada a compactação, contaminação e outras consequências da gestão intensiva do solo, constituindo um sinal de alerta precoce de degradação, constituindo-se como indicadores de saúde e qualidade do solo.

Biomassa e Biodiversidade microbiana do solo

A biomassa microbiana do solo é a característica do solo que representa a quantidade total de microrganismos vivos presentes no solo, como bactérias, fungos e nemátodos entre outros, enquanto, a biodiversidade microbiana depende da composição da comunidade que constitui a biomassa microbiana. Deste modo, a biomassa e biodiversidade microbiana de um solo, são indicadores da atividade biológica do solo e suas consequências em muitas outras características físicas e químicas do solo.

Solos com biomassa microbiana elevada apresentam maior eficiência na decomposição da matéria orgânica e na disponibilização de nutrientes para plantas, enquanto solos degradados apresentam reduções significativas neste parâmetro (Wardle et al., 2004) e solos biodiversos em termos de microorganismos, são mais resilientes a perturbações contribuindo para o controlo natural de patógenos, sendo, portanto, indicadores, tanto de saúde como de qualidade do solo no planeamento e gestão agrícola e ambiental.

Atividade enzimática

Algumas enzimas presentes no solo, como por exemplo urease, fosfatase e desidrogenase, são catalisadores biológicos que são consequência da intensidade dos processos de decomposição e circulação de nutrientes. A avaliação da atividade

enzimática permite identificar alterações induzidas por gestão inadequada, poluição ou compactação. A atividade enzimática é particularmente sensível a mudanças ambientais e atua como indicador precoce de degradação (Nannipieri et al., 2017) e, portanto, de saúde e qualidade do solo.

Decomposição e circulação de nutrientes

O velocidade e períodos de decomposição da matéria orgânica, bem como, a circulação de nutrientes entre horizontes mais superficiais e mais profundos ou vice-versa de nutrientes, são indicadores do funcionamento integrado dos vários constituintes e características do solo. A razão C/N do solo representa a velocidade e quantidade de mineralização da matéria orgânica do solo permitindo avaliar a capacidade do solo para transformar resíduos orgânicos em nutrientes disponíveis para plantas. Por outro lado, a quantidade, redução ou aumento de macro e micronutrientes em diferentes profundidades são sinónimo da circulação maior ou menor de circulação de nutrientes no perfil. Alterações nestes indicadores podem antecipar perda de fertilidade e comprometimento da produtividade (Bünemann et al., 2018) estabelecendo-se como indicadores de saúde e qualidade do solo.

3.1.4 – Integração de indicadores Físicos, Químicos e Biológicos de Saúde e Qualidade do Solo

Para uma análise robusta da saúde e qualidade do solo, é essencial integrar indicadores, que considerem as interações entre propriedades físicas, químicas e biológicas a fim de conseguir compreender as interações entre estrutura, nutrientes e organismos e a sua capacidade de autorregulação e manutenção de funções ecológicas, mesmo sob pressões antrópicas ou climáticas. Esta integração permite identificar processos de degradação em fases iniciais e fundamentar decisões de gestão sustentável do solo, bem como, prevenção de riscos ambientais, orientadas para a prevenção e melhoria da funcionalidade garantindo que o mesmo continue a exercer as suas funções de forma resiliente.

3.2 - LIMITAÇÕES DA AVALIAÇÃO DA SAÚDE E QUALIDADE DO SOLO

A avaliação da saúde e qualidade do solo depara-se com diversas dificuldades de onde se salientam:

- A Complexidade do sistema solo: o solo é um sistema tridimensional, dinâmico e heterogêneo em profundidade, onde as suas características físicas, químicas e biológicas interagem de forma não-linear (Bünemann et al., 2018).
- Indicadores incompletos: indicadores físicos, químicos e biológicos representam apenas uma parte da funcionalidade do solo. Por exemplo, a medição de biomassa microbiana não revela necessariamente a diversidade funcional ou a capacidade de resiliência do sistema (Wardle et al., 2004).
- Escala temporal e espacial: variações locais e sazonais podem gerar resultados diferentes em estudos aparentemente idênticos, limitando a extrapolação de conclusões (Montanarella et al., 2016).
- Mudanças ambientais: alterações climáticas, eventos extremos e pressões antrópicas podem alterar rapidamente indicadores de saúde do solo, gerando incerteza sobre projeções de longo prazo (FAO, 2020).
- Diferentes objectivos na avaliação e na gestão:
 - Produtividade versus conservação: A intensificação agrícola pode aumentar a produção a curto prazo, mas compromete a estrutura do solo, biodiversidade e saúde a longo prazo (Lal, 2015).
 - Indicadores específicos versus generalistas: Focar apenas em indicadores químicos para avaliar a capacidade nutritiva de um solo pode levar a ignorar a degradação biológica ou física, originando decisões que focam na produtividade, mas reduzem a resiliência do solo (Bünemann et al., 2018).
 - Uso múltiplo do solo: áreas destinadas a agricultura, pastagem e proteção ambiental podem exigir práticas conflitantes, entre produção, biodiversidade e funções ecológicas, exigindo análises e decisões de compromisso.

4 – DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO À GESTÃO DO TERRITÓRIO

O lema “*Conhecer para Decidir*”, reflete a necessidade de fazer refletir o conhecimento científico sobre a saúde, qualidade e degradação do solo, em decisões estratégicas e práticas de gestão agrícola e ambiental que promovam sustentabilidade e resiliência.

O conhecimento acerca das características físicas, químicas e biológicas do solo, integrado com a avaliação de saúde, qualidade, degradação e riscos, constitui o suporte científico para a tomada de decisões. Para que a decisão seja eficiente, é necessário:

- Compreender as interações entre processos físicos, químicos e biológicos;
- Avaliar os riscos ambientais associados a diferentes formas de degradação;
- Considerar limitações e incertezas inerentes à avaliação da saúde e qualidade do solo.

A aplicação do conhecimento do solo na prática da gestão territorial e ambiental envolve uma variedade de ferramentas e métodos, como por exemplo:

- Indicadores integrados de saúde e qualidade do solo: físicos, químicos e biológicos, monitorados ao longo do tempo;
- Mapas de vulnerabilidade e risco: uso de SIG para identificar áreas críticas;
- Modelos de simulação e previsão: avaliação de cenários de degradação e eventos extremos;
- Sistemas de alerta e monitorização contínua: para desastres naturais, erosão e contaminação.

Assim sendo, “Conhecer para Decidir” exige definir estratégias de prevenção, mitigação e recuperação, como por exemplo:

Prevenção: manter o coberto vegetal, práticas de agricultura de conservação, proteção de solos urbanos e de zonas sensíveis;

Mitigação: estabilização de vertentes, controlo da erosão, gestão de armazenamento, infiltração e drenagem da água do solo;

Recuperação: restauração de solos degradados, adição de matéria orgânica, promoção da biodiversidade do solo.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bardgett, R. D., & van der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515, 505–511.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson.
- Bünemann, E. K., et al. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology & Biochemistry*, 120, 105–125.
- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), 1858–1868.
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15(1), 3–11.
- European Commission. (2021). *EU Soil Strategy for 2030*. Publications Office of the European Union.
- FAO & ITPS. (2015). *Status of the World's Soil Resources*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2020). *Soil Health and Land Management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2021). *Soil Pollution: A Hidden Reality*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121–145.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier.
- Jenny, H. (1941). *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. McGraw-Hill.
- Karlen, D. L., et al. (2001). Soil quality: Current concepts and applications. *Advances in Agronomy*, 74, 1–40.

- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895.
- Lavelle, P., et al. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42, S3–S15.
- Montanarella, L., et al. (2016). The role of soil science in addressing environmental challenges. *Geoderma*, 264, 1–3.
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(33), 13268–13272.
- Nannipieri, P., et al. (2017). Soil enzymology: Classical and molecular approaches. *Soil Biology & Biochemistry*, 115, 1–10.
- Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57(5), 1017–1023.
- Tisdall, J. M., & Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141–163.
- Wardle, D. A., et al. (2004). Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 304(5677), 1629–1633.