

Comportamento de fluxo hídrico interno no solo: distinção entre nascentes e erosão subsuperficial

J.A. Lopes ^{a*} e R.S. Corrêa ^b

^a Polícia Científica do Paraná, Curitiba (PR), Brasil

^b Instituto de Criminalística, Polícia Civil do Distrito Federal, Brasília (DF), Brasil

*Endereço de e-mail para correspondência: jeffersonalvesengenheiro@gmail.com

Recebido em 22/11/2024; Revisado em 26/08/2025; Aceito em 05/09/2025

Resumo

Baseando-se nos princípios da Criminalística, a perícia criminal ambiental objetiva instrumentalizar os processos judiciais acerca das lides referentes a eventuais danos ao meio ambiente, permitindo refletir a tipificação do agente infrator da respectiva conduta analisada. A interdisciplinaridade da matéria ambiental, ainda, postula muitas vezes uma avaliação abrangente do profissional que examina a situação. Diante da complexidade de funções e elementos na constituição do solo, por exemplo, a constatação de fluxo hídrico ou canal no meio pedológico requer atenção especial, podendo ou não tal fenômeno indicar o afloramento natural do lençol freático e, por consequência, a existência de uma nascente ou olho d'água, designando assim uma Área de Preservação Permanente – APP local, conforme previsão legal. Por outro lado, a interpretação equivocada desses fenômenos naturais pode gerar, no âmbito judicial, a inadequada tipificação de fato atípico no caso, devido ao objeto analisado não se caracterizar como nascente ou olho d'água, segundo a legislação vigente. Para tanto, tais fenômenos podem ser identificados como túneis/dutos, que são canais abertos em subsuperfície e formados devido à dissolução e carreamento dos minerais, a partir de processos erosivos em subsuperfície. Assim, o presente artigo visa contribuir no debate técnico-científico do campo das ciências forenses e colaborar com os demais profissionais atuantes no contexto pericial, no sentido de proporcionar subsídios em exames periciais de natureza ambiental.

Palavras-Chave: Dutos; Erosão Subsuperficial; Nascente; Piping; Túneis.

Abstract

According to the principles of criminalistics, environmental forensic expertise aims to support the judicial proceedings in cases involving potential ecological damage, identifying the nature and responsibility of the offending agent under investigation. The interdisciplinarity of environmental issues often necessitates a broad skill set for professionals assessing such cases. For instance, special attention is required to evaluate soil constitution for water flow or channels in pedological features. These elements may indicate the natural outcrop of the water table and, consequently, the presence of a spring or waterhole, which designates a Permanent Preservation Area (PPA), as legally defined. Conversely, misinterpretation of these natural features can lead to improper classification in judicial settings, which may mistakenly attribute legal significance to areas not characterized as a spring or waterhole under current regulations. Such features could instead be classified as subsurface tunnels or soil piping formed by mineral dissolution and transport due to erosive processes. This article aims to contribute to the technical-scientific debate in the forensic sciences and to support other professionals in the field, thus facilitating environmental forensic examinations that are consistent with both legal and scientific standards.

Keywords: Soil piping; Springs; Subsurface erosion; Piping; Tunnel erosion.

1. INTRODUÇÃO

A perícia criminal objetiva precipuamente lastrear, no âmbito probatório, vestígios inerentes ao fato em análise, com vistas a constatar a veracidade e possível dinâmica do evento examinado. Para tanto, tal análise fundamenta-se na própria Criminalística e em seus princípios e postulados.

A Criminalística investiga tecnicamente os indícios materiais do crime, seu valor e sua interpretação nos elementos constitutivos do corpo de delito. [1]

A Criminalística é uma disciplina que usa diferentes tipos de recursos, métodos e técnicas de investigação. Ela estuda tudo aquilo de material que está relacionado aos possíveis delitos de diferentes naturezas, procurando dar resposta à sucessão de fatos assim como sua autoria. [2]

Nessa seara, a incorporação da prova material, na esfera do Código Penal e do Código de Processo Penal, permite aos operadores do Direito tipificarem a conduta do agente infrator no respectivo fato. A tipicidade quer dizer a subsunção perfeita da conduta praticada pelo agente ao modelo abstrato previsto na lei penal. [3]

A adequação da conduta do agente ao modelo abstrato previsto na lei penal (tipo) faz surgir a tipicidade formal ou legal. Essa adequação deve ser perfeita, pois, caso contrário, o fato será considerado formalmente atípico. [3]

A perícia criminal ambiental tem como objeto de investigação o meio ambiente, nos seus aspectos normativos, abióticos, bióticos e socioeconômicos, de caráter complexo e multidisciplinar, concernente a exame realizado por profissionais especialistas, legalmente habilitados, destinado a verificar, apurar ou esclarecer determinado fato relacionado a litígios ambientais. [4]

Baseando-se nos princípios da Criminalística, assim, a perícia criminal ambiental objetiva instrumentalizar os processos judiciais acerca das lides referentes a eventuais danos ao meio ambiente, permitindo refletir, quando possível, a tipificação da respectiva conduta analisada.

Nesse aspecto, a Lei de Crimes Ambientais – Lei Federal n. 9.605/1998 – tipifica os crimes contra o meio ambiente em cinco grupos: a) crimes contra a fauna; b) crimes contra a flora; c) poluição e outros crimes ambientais; d) crimes contra o ordenamento urbano e o patrimônio cultural; e) crimes contra a administração ambiental.

A interdisciplinaridade da matéria ambiental – que abarca conceitos de engenharia, biologia, agronomia, geologia, hidrologia, geoprocessamento, dentre outros ramos das ciências naturais e exatas – requer uma avaliação abrangente do profissional que examina a situação, permitindo estruturar a conjuntura de suas etapas e realizar um adequado exame pericial.

O conhecimento da evolução histórica das definições e dos critérios para delimitação de áreas protegidas é necessário para realização de estudos no âmbito do licenciamento ambiental e da perícia forense, pois o dano ambiental é imprescritível, o que sempre torna necessária a análise espaço-temporal do uso da terra. [5]

A proteção de nossos ecossistemas, assim como o enfrentamento de situações lesivas ou ameaçadoras à biota são o fundamento básico para a aplicação dos crimes contra a flora, o que motivou o legislador a adotar desde logo critérios não só preventivos (art. 48) como

repressivos (art. 50), visando à aplicação das sanções penais ambientais. [6]

A grande parcela das infrações ambientais se concentra no grupo dos crimes conta flora, sendo que a intervenção em Área de Preservação Permanente – APP representa 65% dos crimes classificados neste grupo em alguns locais do país. [7]

A Área de Preservação Permanente – APP é conceituada, conforme expressa o Código Florestal – Lei Federal n. 12.651/2012 – como “*área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas*”. O mesmo Código Florestal detalha, em seu artigo 4º, que se consideram APP as faixas marginais de qualquer curso d’água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de 30 m a 500 m, a depender da largura do curso d’água respectivo; bem como as áreas no entorno das nascentes e dos olhos d’água perenes, qualquer que seja sua situação topográfica, determinando nesse caso o raio mínimo de 50 m.

O próprio Código Florestal ainda define nascente como “*aflorentamento natural do lençol freático que apresenta perenidade e dá início a um curso d’água*” e olho d’água como “*aflorentamento natural do lençol freático, mesmo que intermitente.*”

Observa-se, dessa forma, uma inter-relação entre determinadas Áreas de Preservação Permanente – APP com os corpos hídricos, estabelecendo-se intrínseca associação entre a flora local que margeia os cursos d’água.

A partir do ponto de vista hidrogeológico, as nascentes e os olhos d’água possuem relevante importância para a formação dos cursos d’água e, por conseguinte, das bacias hidrográficas, transformando a paisagem terrestre. Para ampliar esse debate, há que se destacar a Lei Federal n. 9.433/1997, que estabelece, dentre seus fundamentos, que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos.

Assim, as nascentes e olhos d’água necessitam de relevante proteção legal e técnica para a sustentação dos ecossistemas e para as funções ecológicas e econômicas de cada região.

Sob essa perspectiva, ainda, o solo também apresenta relevante importância, por se tratar de um complexo ambiente que reúne elementos diversos de sistemas naturais.

O solo é o único ambiente onde se encontram reunidos, em associação íntima, os quatro elementos: domínio das rochas ou pedras – litosfera; domínio das águas – hidrosfera; domínio do ar – atmosfera; e domínio da vida – biosfera. [8]

Além disso, o comportamento do fluxo hídrico subterrâneo é influenciado pelo gradiente hidráulico, pela permeabilidade do solo e pela viscosidade da água, tomando por referência a Lei de Darcy, pilar da hidrologia em meios porosos.

Diante dessa complexidade de funções e elementos na sua constituição, a constatação de fluxo hídrico interno no

solo requer atenção especial, podendo ou não tal fenômeno indicar o afloramento natural do lençol freático e, por consequência, a existência de uma nascente ou olho d'água, conforme prescreve o Código Florestal brasileiro, indicando também uma Área de Preservação Permanente – APP local.

Apesar da incomensurável importância ambiental que as nascentes possuem, são raros os estudos que as têm como foco principal e, por isso, não é unânime um conceito completo na literatura científica. Ainda assim, diversos estudos relatam a imprescindível necessidade de manutenção das funções ambientais das nascentes para a dinâmica hidrológica das bacias. [10] [13] [15] [16]

A escassez de estudos sobre nascentes no Brasil acentua a imprecisão a respeito da definição do termo, já que a conceituação técnica não está transmitida de forma evidente e coesa na legislação vigente, principalmente quando se remete aos aspectos de intermitência e efemeridade dos recursos hídricos. [9] [10]

Em suma, a apropriada compreensão para a indicação de nascentes ou olhos d'água permite ao profissional atuante na perícia criminal obter subsídios relevantes para o referido exame probatório e a oportuna tipificação penal.

Por outro lado, a interpretação equivocada desses fenômenos naturais pode gerar, no âmbito judicial, a inadequada tipificação de eventual fato atípico no caso, devido ao objeto analisado não se caracterizar como nascente ou olho d'água nos termos legais.

2. ABORDAGENS CONCEITUAIS

2.1. Sobre as nascentes

Nascente é um local onde a água brota do solo e flui ou onde se encontra a partir de reservatórios que são continuamente reabastecidos pelo subterrâneo, exceto no caso de aberturas artificiais, como os poços, que não são considerados nascentes. [11]

Uma nascente situa-se na superfície terrestre onde as águas subterrâneas são descarregadas do aquífero, criando um fluxo visível. Essa descarga é causada pela diferença na elevação da carga hidráulica no aquífero e na elevação da superfície terrestre onde a descarga ocorre. As nascentes gravitacionais emergem em condições não confinadas, onde o lençol freático cruza a superfície terrestre, sendo denominadas de nascentes descendentes. Por outro lado, as nascentes artesianas descarregam a água sob pressão devido a condições de confinamento no aquífero subjacente, sendo chamadas de nascentes ascendentes. [12]

Nesse sentido, a nascente é um recurso hídrico natural originado quando um corpo hídrico subterrâneo em movimento, no lençol freático local ou abaixo dele, perpassa a superfície do solo, desaguardando através de formações rochosas ou no sistema hídrico superficial. [13]

Um fator relevante na classificação de nascentes é o regime do fluxo dos canais de drenagem, sendo denominadas fontes perenes ou permanentes aquelas que fluem durante todo o período hidrológico, enquanto fontes intermitentes ou temporárias aquelas que fluem apenas por curto período de tempo, durante ou após as precipitações. Nas regiões onde a evaporação é alta, o

fluxo hídrico dessas fontes pode diminuir muito ou cessar durante a estação seca. [11] [13] [16]

O regime de fluxo de canais de drenagem, classificados como perenes, intermitentes e efêmeros, é condicionado principalmente por aspectos geológicos, pedológicos, geomorfológicos e climatológicos. Todavia, as normativas relacionadas à proteção dos recursos hídricos não estabelecem uma clara definição de canais efêmeros, sendo relevante a análise conjunta de outros indicadores, como o balanço hídrico do solo, para esta designação de fluxo hídrico. [9]

As nascentes são amplamente reconhecidas por sua diversidade física e são fontes abundantes de biodiversidade, frequentemente com função e valor ecológico, sociocultural e econômico substanciais. [16]

Ao longo do tempo, diversas propostas para a classificação de nascentes foram desenvolvidas, abrangendo, dentre outros aspectos, parâmetros ecológicos e hidrogeológicos. [13] [15] [16]

Em geral, a nascente pode ser visualizada de forma pontual e perene, a partir de um local com exfiltração que compreende vazão regular e constante ao longo do período do ano em determinado ponto específico na área observada, sendo identificado, neste fluxo hídrico, como o afloramento do lençol freático. Entretanto, as nascentes também podem apresentar características e morfologias diversas, a partir das propriedades pedológicas, pluviiais, topográficas e hidrogeológicas da região, refletindo por consequência no seu respectivo fluxo hídrico, sendo ilustrados, no presente estudo, alguns exemplos.

A **Figura 1-A** demonstra uma nascente com característica espacial pontual, originada em ambiente lântico, podendo ser observado eventualmente orifício no fundo quando não encoberto por sedimentos e detritos rochosos. [13] [16]



Figura 1. A) Nascente pontual; B) Nascente de encosta; C) Nascente difusa.

Fonte: Nisa e Umar, 2024.

A nascente de encosta, como representada na **Figura 1-B**, tem por característica a sua origem a partir de aquíferos confinados ou não confinados situados em encostas com declives entre 30° e 60°, podendo ter fontes múltiplas. [13] [16]

A **Figura 1-C** ilustra nascente com característica de fluxo concentrado, compreendendo mais de um canal fluvial na sua formação. [13] [16]

Embora o Código Florestal expresse os conceitos de nascente e olho d'água, a compreensão técnica sobre esses fenômenos hídricos não tem se mostrado objetiva, sendo caracterizada de forma genérica e sem englobar toda a sua complexidade. [5] [9] [10] [13] [14] [15] [16]

Apesar de ser uma problemática que se avoluma, poucas são as normatizações que permitem padronizar as atividades relacionadas à caracterização dos mananciais hídricos como nascentes, olhos d'água e cursos d'água.

As orientações existentes nem sempre abordam de forma satisfatória as temáticas que se fazem significativas em uma análise hidrogeológica. Decorre daí um grande impasse em discussões referentes a licenciamentos e perícias ambientais e um espaço a ser preenchido. [10]

Sendo assim, ainda persistem lacunas técnicas e regulatórias para delimitação precisa de Área de Preservação Permanente – APP no entorno de nascentes e olhos d'água, cuja diretriz é necessária para que seja assegurada a proteção efetiva dos recursos hídricos provenientes do afloramento de aquíferos, bem como se evitar divergências em estudos ambientais. [5]

Nesse cenário, a avaliação conjunta hidrogeológica, geológica, climatológica, geomorfológica e hidrográfica da área, agregada com técnicas de geoprocessamento e vistoria local, podem ser fundamentais em uma análise de mananciais hídricos. [10]

2.2.Erosão subsuperficial: Túneis/Dutos

Feições internas no solo com escoamento hídrico, sem uma análise atenciosa, podem direcionar equivocadamente para a compreensão de uma eventual nascente ou olho d'água, proporcionando consequentemente a aplicação legal inadequada acerca dos espaços territoriais que compõem uma Área de Preservação Permanente – APP, conforme preceituado na Lei Federal n. 12.651/2012.

É cediço que a água é um dos principais elementos físicos que integram na transformação do solo e do relevo, modelando a paisagem a partir da formação das bacias hidrográficas. Dentre as diversas funções, a infiltração da água permite catalisar essas transformações.

A infiltração é um processo de penetração da água no solo. Quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração do solo, a água escoar superficialmente. No início, são preenchidas as depressões do terreno e em seguida inicia-se o escoamento propriamente dito, sendo a água direcionada para os canais naturais, que se vão concentrando nos vales principais, formando os cursos dos rios, para finalmente dirigirem-se aos grandes volumes de água constituídos pelos mares, lagos e oceanos. Nesse processo, pode ocorrer infiltração ou evaporação, conforme as características do terreno e da umidade da zona atravessada. [17]

Denomina-se infiltração o fenômeno de penetração da água nas camadas de solo próximas à superfície do terreno, movendo-se para baixo, através dos vazios, sob a ação da gravidade, até atingir uma camada-suporte, que a retém, formando então a água do solo. [17]

A água precipitada pode alimentar diretamente o escoamento superficial ou infiltrar no solo e contribuir para o escoamento subsuperficial. A parcela da precipitação que infiltrar e percolar pela zona de aeração do solo virá a constituir uma zona saturada, onde a água ocupará todos os poros do material pedológico, constituindo um corpo aquoso uniforme sobre uma estrutura geológica que a comportará, e exercerá ao mesmo tempo a função de reservatório e de meio de circulação, também denominado de aquífero. [14]

Existem proteções naturais contra o impacto da precipitação da água da atmosfera sobre o solo, sendo o ar e os vegetais os principais deles, que impedem que ela

venha com uma energia potencial elevada para a superfície. Se o solo estiver desprotegido de vegetação, juntamente com fatores como a declividade, quantidade de chuva, tempo de precipitação, umidade e composição, dá-se origem a processos erosivos. [17]

Dessa maneira, a erodibilidade é conceituada como a susceptibilidade que os solos têm de serem erodidos. Assim, as propriedades dos solos influenciam na maior ou menor erodibilidade, facilitando ou dificultando a ação da energia cinética das águas das chuvas e do escoamento superficial. Dentre as propriedades do solo que influenciam na erodibilidade, pode-se destacar o teor de areia, silte e argila, a densidade aparente e real, a porosidade, o teor e a estabilidade de agregados, o teor de matéria orgânica e o pH dos solos. [8]

A erosão dos solos é um processo natural de modificação das vertentes, no entanto pode ser acelerada pelas atividades antrópicas. Especialmente em áreas tropicais, os processos erosivos são desencadeados com maior intensidade, na qual a força de cisalhamento gerada pela energia cinética é mais intensa com as chuvas torrenciais específicas desse tipo climático. [19]

Em áreas urbanas, o aumento da população e o crescimento espontâneo das cidades exercem grande pressão sobre o meio físico efetuando inclusive mudanças significativas na dinâmica do escoamento pluvial, uma vez que interfere na permeabilidade dos solos. A ausência de um planejamento urbano adequado e a não consideração do uso da terra na ocupação das vertentes condicionam grande risco a população, colocando-a em situação de vulnerabilidade ambiental. [19]

Nesse sentido, a erosão do solo não é apenas um processo geomorfológico, mas também um processo de degradação do solo que pode causar danos ambientais que afetam a vida das pessoas. Este processo é causado tanto pelo escoamento superficial como pelo escoamento subsuperficial. Nas últimas décadas, a maioria dos estudos sobre a erosão do solo pela água centralizou-se nos processos superficiais, tais como as ravinas, embora a erosão subsuperficial por carreamento do solo tenha sido registrada como um processo significativo e generalizado. [20]

As ravinas e voçorocas podem ter sua gênese em processos parcialmente diferentes e possuir aspectos esculturais singulares. A erosão por ravinamento resulta exclusivamente da ação da chuva e do escoamento superficial concentrado, enquanto as voçorocas são oriundas de mecanismos mais complexos, no qual existe uma interconexão entre processos associados ao escoamento superficial, infiltração e a drenagem subsuperficial. Em síntese, é possível afirmar que as voçorocas são desenvolvidas através de antigas cicatrizes formadas pelos movimentos de massa, pelo aprofundamento de sulcos e ravinas, bem como pela formação dos dutos, mediante a atuação concomitante dos diferentes mecanismos típicos da morfogênese da vertente, atuantes em diversas escalas temporais e espaciais, tendo como base o próprio sistema hidrogeomorfológico. [19]

O envorocamento é entendido como um conjunto de processos complexos responsáveis pela ocorrência e desenvolvimento de voçoroca, incluindo, entre eles, a atuação de processos erosivos superficiais concentrados,

de movimentos de massa e, eventualmente, a de *pipings*. [21]

Há na literatura estudos que descrevem que, de forma geral, o desenvolvimento da voçoroca envolve três estágios: 1) eluviação lateral de argilas (*soil piping*); 2) desenvolvimento de um conduto subsuperficial no qual o fluxo concentrado erode suas paredes (*tunneling*) e 3) expansão do túnel até o ponto em que ocorre o colapso do teto. [22]

A formação de canais/dutos/túneis foi descrito pela primeira vez por Richthofen na China em 1877. Mais tarde, este processo e os seus efeitos foram descritos sob uma variedade de nomes, como por exemplo: erosão subterrânea, erosão subcutânea, afundamento do solo, erosão por túnel, erosão por buracos e *piping* do solo. [20]

No conceito geológico-geomorfológico, dutos são verdadeiros canais que são abertos em subsuperfície, com diâmetros que podem variar de poucos centímetros até vários metros. Os dutos formam-se devido à dissolução e carreamento dos minerais em subsuperfície, sendo responsáveis pelo transporte de grande quantidade de material, podendo ter vários metros de comprimento. O solo que está situado acima desses dutos pode sofrer um processo de colapso, dando origem a uma voçoroca. [8]

O processo de formação dos túneis tem relação diretamente proporcional com os processos de infiltração e percolação de água no solo. Nesse contexto, entende-se por infiltração o movimento de entrada de água no solo e percolação, o movimento da água pela força da gravidade dentro do solo. A água que infiltra no solo tende naturalmente a percorrer o caminho favorecido pela da gravidade, de acordo com a energia potencial adquirida pela declividade da encosta. [18]

Sobre esse parâmetro, portanto, os processos erosivos que ocorrem em subsuperfície estão diretamente relacionados, dentre outros aspectos, aos mecanismos de infiltração de água nas vertentes. [28]

Na encosta, os processos de erosão são definidos pela ação da água em fluxos superficiais e subsuperficiais, tendo como os principais os fluxos laminar ou difuso (*sheet flow*) e superficial concentrado (*runoff*), a água que flui por vazamento (*seepage*) e a erosão em túneis (*piping*). Esse processo de erosão em túneis pode ser observado em paisagens naturais e antropogênicas, em diferentes climas, litologias, usos do solo e coberturas vegetais. [25]

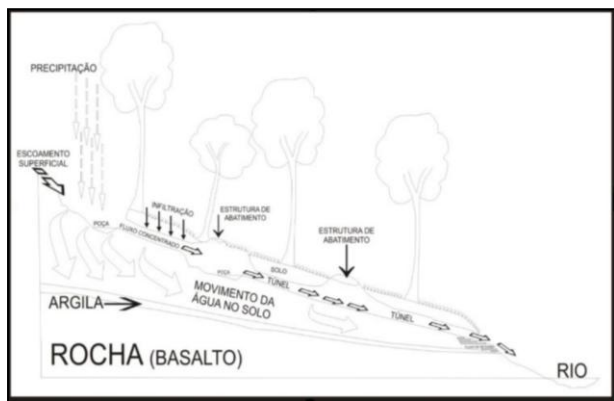


Figura 2. Representação hipotética da distribuição e relação dos túneis, estruturas de abatimento e depressões geradas por subsidência que ocorrem na encosta.

Fonte: Silva, Pietrobelli e Tratz, 2013.

A **Figura 2** apresenta, sinteticamente, uma representação hipotética da distribuição e relação dos túneis, estruturas de abatimento e depressões geradas por subsidência que ocorrem nas encostas. Nesta **Figura 2**, pode-se observar também o comportamento da água no solo a partir da depressão gerada pela subsidência do teto, redistribuindo a água no solo e direcionando o fluxo superficial durante uma precipitação para uma entrada lateral em relação à superfície. Essas depressões também são responsáveis por parte da serrapilheira que se encontra dentro dos túneis. [18]

A formação de túneis no solo pode proporcionar, assim, alterações de encostas e de paisagem. [20] [23] [26]

Nessa concepção, a água de subsuperfície que flui através de macroporos ou cavidades fissurais pode resultar na formação de túneis e dutos. Os menores, com poucos centímetros de diâmetro, geralmente são visíveis nas paredes das voçorocas e servem para dar vazão a uma dada descarga de água subterrânea. Os dutos maiores, ou setores dos dutos com mais de 0,50 m de diâmetro geram maiores fluxos de água: a superfície com face livre para exfiltração da água é maior. São nessas porções, onde os diâmetros dos dutos aparentemente são maiores, que se desenvolvem as estruturas de abatimento, cujas dimensões variam de 0,2 a 3 m de diâmetro e profundidade que varia de 0,5 a cerca de 4 m. Associada a estas estruturas ocorre a subsidência da superfície do terreno criando depressões topográficas ao longo do eixo de drenagem da encosta. [24]

A água que infiltra em toda a encosta e que não é canalizada pelo sistema de túneis movimenta-se respeitando a lei da gravidade, sendo exfiltrada no canal principal dos túneis próximo ao rio (fluxo de retorno). Os túneis apresentam, logo após as precipitações, um volume maior de água que exfiltra por suas paredes, dando a eles umidade constante e gerando fluxo concentrado a partir do maior aporte de água. [18]

Ao longo do eixo de drenagem, túneis subterrâneos, estruturas de abatimento e subsidência da superfície estão presentes nas encostas, evidenciando uma relação dinâmica entre si. O eixo de drenagem é materializado por uma sucessão de depressões no terreno, onde se formam estruturas de abatimento e, através das quais, observam-se os dutos subterrâneos. Trata-se de formas relacionadas, principalmente, à ação do fluxo de água em subsuperfície. [24]

A ocorrência de túneis no solo, nesse sentido, é identificada por indicadores de superfície, ou seja, a partir do colapso do teto do túnel ou quando se observam pontos de entradas e saídas desses canais. [20]

A subsidência da superfície aparece como um rebaixamento do teto do túnel, originado geralmente de forma lenta. A subsidência do teto surge quando há perda de sustentação causada pela retirada de água, ar e/ou solo em subsuperfície, ocorrendo de modo disperso na superfície da encosta, alinhada com a drenagem da água concentrada nos túneis. A subsidência gera mudanças nos gradientes locais, o que favorece a convergência de fluxo superficial e ocorrência de processos erosivos. [28]

A **Figura 3** apresenta uma estrutura de abatimento, formada pela abertura em formato circular existente na superfície da encosta e gerada pelo desabamento de parte

do teto do túnel, expondo o canal e as características do sistema tubular, como acúmulo de água. [18]



Figura 3. Estrutura de abatimento em condições de artesianismo.
Fonte: Silva, Pietrobelli e Tratz, 2013.

As estruturas de abatimento que se localizam próximas ao setor da encosta onde ocorre fluxo de retorno apresentam artesianismo sob condições de maior volume de precipitação. Após o rebaixamento da água, o que se observa no túnel é a presença de fungos visíveis pelo recobrimento de uma superfície branca descontínua nas paredes e teto do próprio túnel, de acordo com a **Figura 4**. [18]

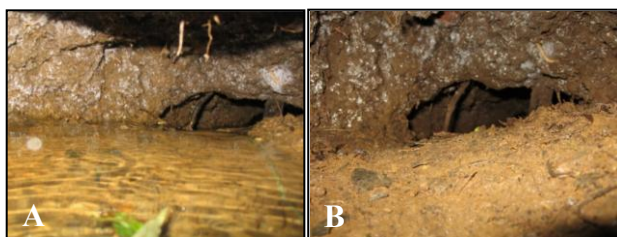


Figura 4. A) Fungos no teto e parede do túnel; B) Sedimentos acumulados no interior do túnel.
Fonte: Silva, Pietrobelli e Tratz, 2013.

A **Figura 4** mostra também, de forma simplificada, a importante função das raízes das árvores e gramíneas na retenção de solo e estabilidade do teto dos túneis, que se encontram de 7 a 15 cm em média, imediatamente abaixo da superfície. [18]

Destaca-se, nessa senda, que o fluxo hídrico nos túneis, por ser mais concentrado e mais veloz, desempenha um poder erosivo maior quando comparado ao escoamento superficial. E parte desse processo surge porque o fluxo hídrico nos túneis e a erosão são amplamente desimpedidos por vegetação, pois os leitos dos canais subsuperficiais estão expostos e a vegetação eventualmente só restringe a erosão no teto do túnel. [26]

A movimentação da água dentro dos canais transporta quantidades de sedimentos que variam em volume conforme a turbulência dos fluxos, que é dada pela quantidade de água no sistema *versus* o tempo. Quanto maior a quantidade de água no menor tempo, mais turbulento será o fluxo, transportando e depositando sedimentos destacados das paredes, do teto e de agregados presos às raízes das plantas localizadas acima do teto dos túneis. [18]

Os sedimentos soltos são carregados pelos canais para as partes mais baixas da encosta. A subsidência do teto tem papel fundamental na evolução dos canais, expondo partes dos túneis à superfície e favorecendo a entrada lateral de água do escoamento superficial. [18]

A migração de água no interior do solo é controlada, portanto, pelo volume e intensidade de precipitação, pelas propriedades (físicas, mecânicas, químicas e hidráulicas) do solo, pela natureza da cobertura vegetal e pelas características (de declividade e morfológicas) das encostas. [25]

Todavia, diferentemente de outros processos erosivos, acelerados com a retirada da vegetação, os túneis podem surgir em meio à vegetação, sem ocorrer, necessariamente, uma diminuição ou aceleração do processo erosivo, conforme ilustra a **Figura 5**. [28]



Figura 5. A) Base sendo entalhada pela ação de fluxos concentrados; B) Túnel com resíduo de mata primária no município de Candói/PR.
Fonte: Silva, 2017.

A concentração e o aumento da velocidade dos fluxos subsuperficiais encosta abaixo, aliados ao aumento da quantidade de água de exfiltração das paredes de túneis recém-formados, provocam fluxos turbulentos que se movimentam de forma desordenada, desencadeando o desprendimento e carregamento dos materiais de forma mecânica, ampliando cada vez mais o diâmetro dos túneis. [28]

A **Figura 6** exhibe o desprendimento de agregados no interior de túnel e o descolamento de placas, constituindo mecanismos contínuos que favorecem o avanço da erosão. [25]

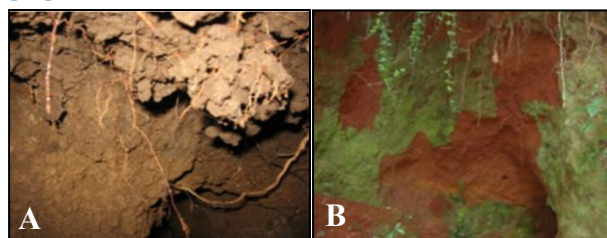


Figura 6. A) Desprendimento de agregados no interior de túnel; B) Descolamento de placas no interior de túnel.
Fonte: Guerra, Mathias e Pietrobelli, 2014.

Nesse aspecto, observa-se que o mecanismo de erosão por percolação está diretamente relacionado com a gênese e evolução dos túneis, tanto pela formação dos funis de erosão quanto pela formação de túneis secundários. E a concentração dos fluxos internos também influencia diretamente a evolução lateral e longitudinal dos canais, promovendo o avanço do processo erosivo. [27]

A **Figura 7** apresenta, como exemplos, formatos diversos de saídas de túneis. [20]

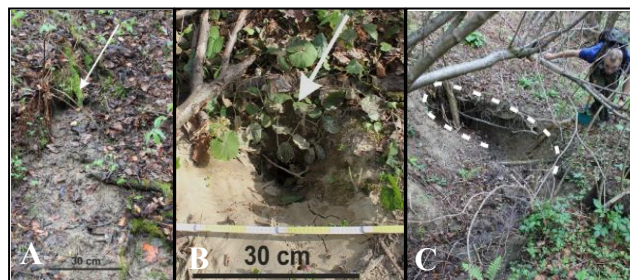


Figura 7. A) Saída de túnel; B) Saída de túnel; C) Colapso/saída de túnel.
Fonte: Bernatek-Jakiela e Poesen, 2018.

Dessa forma, os mecanismos responsáveis pelo entalhe da base do túnel são os fluxos subsuperficiais concentrados que cessam o processo de erosão vertical quando encontram um horizonte de impedimento, como acumulação de argilas ou a base rochosa da encosta. Como consequência, o impedimento do processo de entalhe da base dá início ao avanço da erosão lateral dos canais. [27]

3. ESTUDO DE CASO

A erosão do solo no estado do Paraná é marcada por uma grande diversidade de processos, incluindo sulcos, ravinas, deslizamentos, ençoamento e túneis subsuperficiais de várias magnitudes, além da erosão laminar. [29]

Levantamentos efetuados nas regiões central, sul e centro-oeste do estado do Paraná mostraram que a erosão em túneis, com formação de estruturas de abatimento, ocorre tanto em solos oriundos da decomposição de rochas sedimentares, como em solos originados de rochas basálticas. [24] [28]

Conforme visto anteriormente, os dutos e túneis (*pipes*) se formam a partir do carreamento de pequenos grãos do solo, partículas de argila e outros colóides, ou mesmo através da remoção dos componentes do solo por solução, ou seja, pelo processo de *piping*. O transporte desse material se faz através do deslocamento de sólidos e de componentes dissolvidos em rotas preferenciais, o que lhes confere tanto a atuação de forças físicas, quanto químicas. O desenvolvimento dessas rotas preferenciais de escoamento subsuperficial pode levar à formação de uma verdadeira rede interligada de fluxos e o surgimento das voçorocas ocorreria com o colapso do teto dos túneis e o alargamento, por escoamento superficial e por movimentos de massa, do canal assim formado. A ação combinada desses processos aumentaria sensivelmente as forças envolvidas na escavação e alargamento das paredes do canal. A atuação desse mecanismo aponta para o fato de que a ocorrência das voçorocas pode envolver processos mais complexos que aqueles resultantes apenas de evolução da incisão de um canal causada pela enxurrada que, após atingir certa profundidade, se transformaria em um canal permanente. Nesse caso, o caráter permanente do canal, considerado pela literatura específica como o elemento morfológico mais importante na definição da forma erosiva – voçoroca – ocorre antes mesmo de incisão por escavamento superficial do fluxo concentrado ao longo de uma calha de escoamento. Embora vários autores apontem para a existência de estreita relação entre a formação das voçorocas e a ação dos *piping*, sua comprovação não é fácil, pois nem sempre é possível detectar, na superfície, o início do aparecimento do canal superficial por colapso do túnel. Uma vez ocorrido o colapso, a ação do escoamento superficial tende a se tornar preponderante, encobrendo evidências da presença do duto subsuperficial, anterior à do canal superficial. [21]

Em município situado na Região dos Campos Gerais no estado do Paraná, uma edificação fora erigida em terreno adjacente a uma cavidade situada na porção inferior do solo, identificada superficialmente como nascente, que detém proteção legal num raio mínimo de 50 metros no seu entorno, compreendendo, nessa

perspectiva, Área de Preservação Permanente – APP e originando exame pericial.

Para tanto, a respectiva cavidade na porção inferior do solo situava-se limítrofe à área com urbanização consolidada e com a presença de corpo hídrico nas proximidades, constatado a partir de consulta em bases de dados geoespaciais da hidrografia da região e exame pericial local direto. Durante o exame pericial *in loco*, constatou-se no fenômeno características similares a canal derivado por processo erosivo e proporcionado pelo escoamento subsuperficial de água no solo, como os túneis/dutos, conforme demonstrado na **Figura 8**.

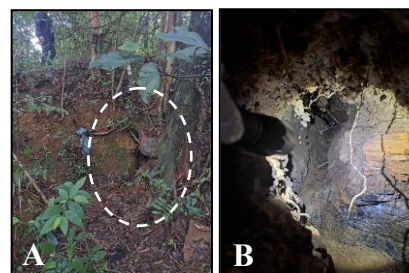


Figura 8. A) Saída do túnel/duto; B) Vista interna do túnel/duto. Foto: J. A. Lopes, 2024.

4. CONCLUSÃO

A perícia criminal permite, na seara jurídica, a produção de provas, a partir da análise de vestígios e demais exames do objeto questionado. Na esfera ambiental, tais exames tornam-se fundamentais para a adequada tipificação da conduta do agente infrator, tendo por referência tanto a Lei de Crimes Ambientais quanto os demais diplomas legais e normativos sobre essa matéria.

As Áreas de Preservação Permanente – APP possuem expressiva importância ecológica na proteção dos recursos hídricos e na preservação da flora local, reforçando o caráter de destaque na legislação pátria de proteção a essas áreas, sobretudo quanto às áreas no entorno de nascentes e de olhos d'água perenes, como descreve o Código Florestal.

Deste modo, é essencial a contribuição conjunta de mapeamentos realizados a partir de imagens de satélite e arquivos congêneres, disponibilizados em bases de dados geoespaciais, com o uso de softwares específicos, como *Google Earth Pro*, *Google Earth Engine*, *ArcGIS* e *QGIS*, para suplementar a avaliação pericial.

Diante da natureza pericial local, proporcionada por determinados exames ambientais, a análise do solo torna-se relevante. Os processos erosivos identificados no ambiente pedológico podem agregar sobremaneira nos estudos periciais, como no caso da formação de túneis/dutos, derivados por erosão subsuperficial.

A análise multidisciplinar na perícia criminal é primordial, principalmente nos exames relacionados ao meio ambiente. Assim, o presente artigo visa contribuir no debate técnico-científico do campo das ciências forenses e colaborar com os demais profissionais atuantes no contexto pericial, no sentido de proporcionar subsídios em exames periciais relativos ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. V; França. *Medicina Legal*. 11ª Ed; Rio de Janeiro: Guanabara Koogan (2017).
- [2] D. Lameirão; T. Hermida, *Criminalística*. 1ª Edição (2021).
- [3] R. Greco. *Curso de Direito Penal*: parte geral, volume I, 19 ed. Niterói, RJ: Impetus (2017).
- [4] A.B.de Oliveira, V. P. dos Santos, M. L. de Borba. Levantamento de conservação de vegetação adjacente a cursos d'água dentro da perícia ambiental: o uso de ferramentas de geotecnologia. *Revista Brasileira de Criminalística*. v. 10, n. 1, p. 57-63, <http://dx.doi.org/10.15260/rbc.v10i1.459> (2021).
- [5] K. I. S. de Souza; P. L. B. Chaffe; C. R. S. C. Pinto; T. M. P. Nogueira. Proteção ambiental de nascentes e afloramentos de água subterrânea no Brasil: histórico e lacunas técnicas atuais. *Águas Subterrâneas*, v. 33, n.1, p. 76-86. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29254> (2019).
- [6] C. A. P. Fiorillo. *Curso de Direito Ambiental Brasileiro*. 22 ed. São Paulo, SaraivaJur (2022).
- [7] T. B. B. da Silva; R. S. Corrêa. Comparação entre métodos de valoração de danos ambientais para fins periciais. *Revista Brasileira de Criminalística*, v. 4 (3), p. 7-14 (2015).
- [8] A. T. Guerra; A. J. T. Guerra. *Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico*. 6ª ed. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil (2008).
- [9] J. Justi Junior; C. V. Andreoli. Uso de dados climáticos e hidrológicos como subsídio na determinação do regime de fluxo de canais de drenagem. Nota Técnica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 16(1). ISSN 2236-5664. <https://doi.org/10.20502/rbg.v16i1.422> (2015).
- [10] G. Simão; A. P. Viero; J. L. Pereira. Proposta de um roteiro para identificação de nascentes e cursos d'água. *Holos Environment*, 23 (1): 1-18. 1. <http://doi.org/10.14295/holos.v23i1.12482> (2023).
- [11] B. Kirk. Classification of springs. *The Journal of Geology*, Vol. 27, No. 7 (Oct.-Nov, 1919), pp. 522-561 (1919).
- [12] N. Kresic. Chapter 2 - Types and classifications of springs. In: N. Kresic; Z. Stevanovic. *Groundwater hydrology of springs*. Oxford, UK: Elsevier (2010).
- [13] F. U. Nisa; R. Umar. Spring water system classifications and their methods of study: An overview of the current status and future perspectives. *Journal of Earth System Science*, 133(1), 10. <https://doi.org/10.1007/s12040-023-02218-7> (2024).
- [14] P. R. Zanin; N. B. Bonumá; P. L. B. Chaffe. Características hidrogeológicas de nascentes situadas em diferentes modelos de relevo. *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* (2013).
- [15] A. E. Springer; L. E. Stevens. Spheres of discharge of springs; *Hydrogeology Journal*. 17(1) 83-93, <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0341-y> (2009).
- [16] L. E. Stevens; E. R. Schenk; A. E. Springer. Springs ecosystem classification. *Ecological Applications*, Jan 31(1), doi: 10.1002/eap.2218 (2021).
- [17] N. L. S. Pinto; A. C. T. Holtz; J. A. Martins; F. L. S. Gomide. *Hidrologia Básica*. Editora Edgard Blücher Ltda; São Paulo (1976).
- [18] W. B. Silva; G. Pietrobelli; E. B. Tratz. Circulação e vazão de água em encosta com erosão em túneis na bacia do rio das pombas – Guarapuava – PR. *Terr@Plural*, Ponta Grossa, v.7, n.2, p. 269-285, jul/dez. DOI: 10.5212/TerraPlural.v.7i2.0006 (2013).
- [19] J. S. Pereira; S. C. Rodrigues. Erosão por voçorocas: estado da arte. In: O. S. C. Junior; M. C. V. Gomes; R. F. Guimarães; R. A. T. Gomes (org). *Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira*. V. 2; pp. 503-529. Universidade de Brasília (2022).
- [20] A. Bernatek-Jakiela; J. Poesen. Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. *Earth-Science Reviews*, 185, pp. 1107-1128. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.006> (2018).
- [21] C. H. R. R. Augustin; P. R. A. Aranha. Piping em área de voçorocamento. Noroeste de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Ano 7, nº 1. pp. 09-18 (2006).
- [22] M. L. Swanson; G. M. Kondolf; P. J. Boison. An example of rapid gully initiation and extension by subsurface erosion: Coastal San Mateo County, Califórnia. *Geomorphology*, n. 2, p. 393-403 (1989).
- [23] J. A. A. Jones. Soil piping and catchment response. *Hydrological Processes*, 24, 1548-1566. <https://doi.org/10.1002/hyp.7634> (2010).
- [24] Camargo, G.; Camargo Filho, M.; Oliveira, T. A. M. 2004. Erosão em túneis e reconhecimento de rotas de fluxo subsuperficial concentrado no centro, sul e centro-oeste do estado do Paraná. *V Simpósio Nacional de Geomorfologia*, Santa Maria/RS. (2004).
- [25] K. Guerra; R.M. Mathias; G. Pietrobelli. Caracterização de mecanismos que atuam no processo de erosão em túneis (*Piping Erosion*) no município de Cândói-PR. *Revista Geonorte*, Edição Especial 4, v.10, n.1, p.37-41. ISSN 2237-1419 (2014).
- [26] J. A. A. Jones; Soil Piping and its Hydrogeomorphic Function. *Cuatervario y Geomorfología*, 8 (3-4), pp. 77-102 (1994).
- [27] R.M. Mathias; W.B. Silva. Identificação de feições erosivas e mecanismos presentes em túneis na encosta do Rio Boca Apertada, Cândói, PR. *Revista Geonorte*, Edição Especial 4, v.10, n.1, p.151-155, ISSN 2237-1419 (2014).
- [28] W. B. Silva. Origem e evolução de túneis em formações superficiais derivadas de basalto em clima subtropical úmido, Cândói, Paraná. *Tese de Doutorado*. Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Universidade Federal de Santa Catarina (2017).
- [29] M. A. T. Oliveira; G. Camargo. Integração de Estruturas de Abatimento e Erosão por Voçorocas: município de Lapa, PR; *Sociedade & natureza* (Online). Vol. 8 No. 15. pp 118-121. <https://doi.org/10.14393/SN-v8-1996-61804> (1996).