ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Solos Em Carste Tropical, Desenvolvimento Pedogenético E Comportamento Hidrológico: Uma Revisão Teórica

José Gustavo da Silva Nunes, Universidade de Brasília. E-mail: jgustavosn@gmail.com Rogério Uagoda, Universidade de Brasília. E-mail: rogeriouagoda@unb.br

Artigo recebido em 11/04/2020 e aceito em 13/12/2020

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo reunir informações sobre comportamento pedogenético e hidrológico em áreas de rochas carbonáticas de clima tropical. A execução desta pesquisa foi embasada em artigos científicos indexados, nacionais e internacionais, como também em livros, teses e dissertações relevantes para o tema proposto. O solo é um sistema multifásico, e os seus aspectos morfológicos e constitucionais atuam facilitando ou dificultando a permeabilidade da água, assim cada horizonte pedológico funciona como um mecanismo em um mesmo perfil de solo. Os fatores físicos/químicos da água também atuarão contribuindo para a classificação dos grupos hidrológicos de solo. No Brasil, a Embrapa realizou classificações dos horizontes diagnósticos, dos grupos hidrológicos e dos tipos de solos, baseada em autores internacionais, adaptadas às condições tropicais. Mas as áreas cársticas, que representam um percentual de 20% da superfície terrestre, podem apresentar condições particulares para a formação de solo e para o comportamento hidrológico, podendo incluir zonas locais de alta permeabilidade, fuga de água subterrânea e eliminação de resíduos insatisfatórios. Solos de ambientes cársticos são mal desenvolvidos, apresentam argilas avermelhadas de baixa atividade normalmente. No Brasil os estudos deste tipo de ambiente são escassos, mas alguns trabalhos desenvolvidos em áreas cársticas trazem algumas informações básicas sobre os solos. As pesquisas encontradas que trouxeram informações dos solos em carstes, foram plotadas no mapa brasileiro. A pesquisa demonstrou que há um gap de informações para o desenvolvimento pedológico em áreas cársticas, mas é possível fazer associações entre estas classes de solo a outros ambientes, incluindo o comportamento hidrológico.

Palavras-chave: Grupos hidrológicos de solos, Solo Tropical, Carste.

Soils In Tropical Karst, Pedogenetic Development And Hydrological Behavior: A Theoretical Review

ABSTRACT

This work aimed to gather information on pedogenetic and hydrological behavior in carbonate rock areas of tropical climate. The execution of this research was based on indexed scientific articles, national and international, as well as on books, theses and dissertations relevant to the proposed theme. The soil is a multiphase system, and its morphological and constitutional aspects act to facilitate or hinder water permeability, so each pedological horizon works as a mechanism in the same soil profile. The physical / chemical factors of the water will also act contributing to the classification of soil hydrological groups. In Brazil, Embrapa carried out classifications of diagnostic horizons, hydrological groups and soil types, based on international authors, adapted to tropical conditions. However, karst areas, which represent a percentage of 20% of the earth's surface, may present particular conditions for soil formation and hydrological behavior, and may include local areas of high permeability, groundwater leakage and unsatisfactory waste disposal. Soils in karst environments are poorly developed, with reddish clays of low activity normally. In Brazil, studies of this type of environment are scarce, but some studies carried out in karst areas bring some basic information about the soils. The researchers found that brought information on soils in carstes, were plotted on the Brazilian map. Research has shown that there is an information gap for pedological development in karst areas, but it is possible to make associations between these soil classes and other environments, including hydrological behavior.

Keywords: Soil Hydrological Groups; Tropical Soil; Karst.

Introdução

Áreas cársticas fazem parte de um tipo específico de paisagem na qual o intemperismo químico determina as formas de relevo, desenvolvido através da dissolução da rocha encaixante. O termo “carste” tem origem em uma área no leste da Eslovênia, divisa com o norte da Itália, chamada “krs” e significa paisagem nua, pedregosa, sem água (Jones et al., 2003). Logo a classificação se aplicaria para rochas que de alguma forma pudessem reagir e serem solubilizadas, mas ainda na década de 1980, feições cársticas desenvolvidas em rochas consideradas não solúveis como quartzitos e granitos, foram identificadas por pesquisadores em outras regiões do planeta (Chalcraft e Pye, 1984; Young, 1986; Doerr, 1999; Willems et al., 2002).

Os Solos desenvolvidos em áreas cársticas não são incomuns, tendo em vista que as rochas carbonáticas recobrem 20% da superfície do planeta livre de gelo (Ford e Williams, 1989). Mas as pesquisas que buscam o entendimento de desenvolvimento pedológico e do comportamento hidrológico, em ambientes cársticos, são ínfimos.

O processo de desintegração das rochas ocorre de forma natural, quando estas são sujeitas a ações da atmosfera terrestre, provocando uma série de alterações físicas e químicas, em maior ou menor intensidade dependendo da localização, condição climática e da paragênese mineral (LEPSCH, 2011).

Segundo Chiapini et al. (2020), os sistemas taxonômicos de classificação de solos são baseados nas propriedades morfológicas bem como no reconhecimento dos principais processos responsáveis pela gênese do solo.

O solo é produto da ação concomitante do clima e de organismos que atuam desgastando material de origem (rocha), que a depender do tipo de relevo, pode intensificar ou retardar o processo. Todos estes fatores devem ter uma continuidade ao longo do tempo para desenvolver um perfil do solo. Durante sua formação, o solo poderá passar por processos de desenvolvimento como perdas, transformações, translocações e adições (Lepsch, 2011).

No sentido de integração de informações em uma base de dados mundial, Vereecken et al. (2016) propôs a criação de processos de modelagem do solo, buscando melhorar a troca de conhecimentos e experiências entre as diferentes disciplinas da ciência do solo, e a geração de modelos de solo com base em uma abordagem

sistêmica que inclua elementos físicos, químicos e processos biológicos.

Segundo Evans et al. (2020) a evolução dos métodos de controle de formação do solo são de vital importância tanto para a preservação quanto as atividades antrópicas, de forma que a análise cosmogênica de radionuclídeos permitiu aos cientistas do solo restringir com mais precisão as taxas nas quais os solos se formam a partir da rocha. Com este método os autores conseguiram relacionar a taxa de formação do solo com a taxa de decomposição da rocha, demonstrando que a ciência do solo está em constante evolução.

Os sistemas cársticos são, na maioria das vezes, caracterizados por cânions, cavernas, nascentes e condutos formando sistemas de drenagem subterrânea (D’Affonseca et al., 2020), o que pode interferir diretamente no grupo hidrológico do solo e na sua classificação.

As diferenças na formação do solo e características do solo (que incluem a capacidade de retenção de água, o tamanho da partícula e a química do solo) entre regiões cársticas e não cársticas, mesmo entre dolomita e calcário dentro de uma região cárstica são evidentes. Água e solo são facilmente lixiviados devido às fendas subterrâneas conectadas no sistema cárstico (Liu et al., 2020).

O objetivo deste trabalho é buscar o entendimento de como solos se desenvolvem e quais são as taxas de contribuição externas e do material de origem em regiões de rochas carbonáticas ou províncias cársticas em áreas tropicais, bem como entender o comportamento hidrológico neste tipo de ambiente, verificando se as atuais classes de grupos hidrológicos de solos abrangem solos formados em áreas cársticas.

Horizontes Diagnósticos

Segundo Young e Crawford (2004) os solos constituem os sistemas ambientais mais complexos devido a diversidade de processos e interações envolvidos em sua formação. Por se tratar de um sistema aberto com contínuo fluxo de massa dentro e fora do sistema em diversas fases (líquido, gasoso e sólido), estes sistemas são muito sensíveis as interferências antrópicas devido ao manejo e uso do solo. Foth e Schafer (1980), através de análises de processos pedogenéticos, aspectos morfológicos e constitucionais, propuseram classificações no que se refere à horizontes diagnósticos superficiais, mas estes

horizontes tiveram que ser adaptados para condições de clima tropical, como é demonstrado

nas Figura 1 e Figura 2, exceto para o horizonte antrópico que é criado ou modificado pelo homem.

Figura 1. Principais Horizontes diagnósticos superficiais. Fonte: FOTH & SCHAFER, 1980. Adaptado pelo autor para o SIBCS.

Foth e Schafer (1980), descreveram 18 horizontes diagnósticos subsuperficiais, porem nem todos se aplicam para áreas de clima tropical, sendo apenas seis horizontes os considerados representativos para esta faixa de clima (e.g. B textural (Bt), B latossólico (Bw), B incipiente (Bi), B nítico (Bt), B espódico (Bs, Bhs, Bh), B plânico, E alábico (E), Plíntico, Concessionário, Litoplíntico, Glei, Cálculo, Petrocálculo, Sulfúrico, Vértico, Fragipã, Duripã) nos quais foram descritos suas composições devido aos processos de adição,

remoção e transformação. Os horizontes minerais (e.g. Chernozêmico, Duripã, Fragipã, B Espódico, Nátrico) foram definidos através da quantidade de carbono orgânico nas frações húmicas e características diferenciais de teores minerais de solos (Foth e Schafer, 1980). Os outros horizontes são demonstrados na Figura 2, desenvolvidos através de perda ou enriquecimento em determinados elementos.

Figura 2. Horizontes diagnósticos subsuperficiais. Fonte: FOTH & SCHAFER, 1980. Adaptado pelo autor para o SIBCS.

Foth e Schafer (1980), também definiram os regimes de temperatura dos solos, baseado em monitoramentos a uma profundidade de 50 cm à superfície do solo. Estes regimes afetam fortemente o uso e manejo dos solos, particularmente na seleção de plantas adaptadas. Os regimes de temperatura do solo são:

- Pergélico – temperatura média anual menor que 0° C;
- Frígido – temperatura média anual menor que 8° C;
- Mesotérmico – temperatura média anual entre 8 e 15° C;
- Térmico – temperatura média anual entre 15 e 22° C;
- Hipertérmico – temperatura média anual superior a 22° C.

Como também foram definidos regimes de umidade, de acordo com a presença ou ausência de água na seção controle de umidade (FOTH & SCHAFER, 1980). Segundo Foth e Schafer (1980), devido à variação composicional das classes de solos (e.g. mineral e quantidade de matéria orgânica, embasamento cristalino), eles vão apresentar comportamentos químicos e físicos heterogêneo na sua relação com a água:

- Áquico – o solo permanece a maior parte do ano saturado com água;

- Údico – o solo permanece úmido a maior parte do ano;
- Ústico – regime intermediário entre o Údico e arídico;
- Arídico – o solo permanece seco a maior parte do ano.

Propriedades Físicas e Químicas da Água

Segundo Brady (1984), a polaridade da água explica o porquê suas moléculas são atraídas por íons carregados eletrostaticamente e por superfícies coloidais. Cátions tais como H⁺, Na⁺, K⁺ e Ca²⁺ tornam-se hidratados devido à sua atração pelo oxigênio (negativo) na extremidade da molécula de água. Do mesmo modo, superfícies das argilas carregadas negativamente atraem a água, através do hidrogênio (positivo) na extremidade da molécula. Esta interação se torna ainda mais complexa quando se trata de sua relação com os solos.

Segundo Brady (1984) as pontes de hidrogênio determinam as duas forças básicas responsáveis pela retenção e movimento da água no solo, a atração entre moléculas de água (coesão) e atração das moléculas de água pelas superfícies sólidas (adesão). O autor afirma ainda que as moléculas de água são retidas nas superfícies dos poros dos solos por adesão, que junto com a força

da atração, explica o movimento ascendente da água como capilaridade. Explica ainda a atração da água por superfícies sólidas (adesão ou adsorção) e

a tensão superficial da água que é devida à atração entre as moléculas de água (coesão).

Figura 3. Organograma das propriedades e interações básicas entre água e solo, abordando de forma sequencial e esquemática as propriedades físicas e, como elas interagem para que ocorra a retenção da água pelo solo.

Forças capilares definidas por Adegbule e Kibbey (2020) com a medida da diferença de pressão entre dois fluidos imiscíveis (não misturáveis) em um meio poroso, no caso do solo os fluidos considerados são a água e o ar, são atuantes em todos os solos úmidos, no entanto, a taxa de movimento e a ascensão são menores do que se espera, considerando apenas o diâmetro dos poros do solo (BRADY, 1984). Uma das razões propostas pelo autor é que os poros do solo não são uniformes como tubos de vidro. Além disso, alguns poros contêm ar aprisionado diminuindo ou impedindo o movimento capilar da água. O autor apresenta uma correlação entre texturas finas como inversamente proporcional à velocidade do fluxo de fluidos.

Segundo dados de Gleick (1996), o volume global de umidade nos solos corresponde à 16.500

Km³, representando 0,001% do total de água do planeta. Sendo que parte desta água abastece os aquíferos que comportam 23.400.000 Km³ ou 1,7% do volume de água, rios com 2.120 Km³ ou 0,0002%, e pântanos com 2.100 Km³ ou 0,0008% do total de água do planeta.

As áreas cársticas (Figura 4), que se formam devido a dissolução da calcita e dolomita presente em rochas carbonáticas, correspondem a cerca 20% do total da superfície do planeta, livre de gelo (Ford e Williams, 1989). Mesmo cobrindo uma parcela significativa da Terra, quando os grupos hidrológicos de solos foram pensados, não se levou em consideração o comportamento hidrológico para coberturas pedológicas que recobrem estas áreas.

Figura 4. Mapa mostrando áreas cársticas em todo o planeta. Fonte: Produzido pelo autor com base nos dados da Universidade de Auckland.

Grupos Hidrológicos de Solos

Os solos foram originalmente reunidos em grupos hidrológicos, baseados em monitoramentos da precipitação, escoamento superficial e dados de infiltração (Musgrave, 1955). Segundo NEH (2009), para o caso de solos não monitorados foram estabelecidos. A maioria dos agrupamentos são baseados na premissa de que os solos, encontrados dentro de uma mesma região climática, são semelhantes em profundidade para uma camada restrita ou lençol freático, taxa de transmissão de água, textura, estrutura, e grau de dilatação quando saturado, e que também terá respostas de escoamento semelhantes. As classes são baseadas nos seguintes fatores:

- Absorção e transmissão de água sob condições de máxima precipitação anual (completamente encharcado);
- Solo não congelado;
- Superfície de solo exposto;
- Grau de expansão das argilas.

Estes fatores devem ser revistos para solos tropicais, pois alguns não se aplicam às condições climáticas brasileiras. Além disso, a inclinação da

superfície do solo não é considerada ao classificar grupos hidrológicos de solos (NEH, 2009).

De forma simplificada, grupos hidrológicos de solo são determinado pela taxa de transmissão de água (condutividade hidráulica) da camada de solo não saturada com a taxa mínima da condutividade hidráulica para o lençol freático (camada saturada) (Figura 6). Sendo que a camada menos transmissiva pode ser qualquer horizonte de solo que transmite água em um ritmo mais lento para horizontes acima ou abaixo (NEH, 2009). Assim foram definidos quatro grupos hidrológicos de solo:

- **Grupo A** Compreende os solos com baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, em geral apresentam menos de 10% de argila e mais de 90% de areia ou cascalho. A condutividade hidráulica excede os 40 micrometros por segundo (0,04 mm/h), quando a profundidade da camada impermeabilizante é superior a 50 cm, e do lençol freático é maior que 60 cm, os solos contém mais de 1 m de profundidade.
- **Grupo B** apresenta solos com potencial de escoamento moderadamente baixo quando encharcado, sendo que estes solos apresentam entre

10 a 20% de argila, e de 50 a 90% de areia, podendo conter carbonato marga, sendo bem agregados e de baixa densidade aparente, podendo ser composto por mais de 35% de fragmentos de rocha. Em condições na qual a profundidade da camada menos transmissiva fica a aproximadamente 50 cm, e a condutividade fica entre 10 e 40 micrometros por segundo ($> 0,01$ à $\leq 0,04$ mm/h). A profundidade do lençol freático é superior a 60 cm, a condutividade geralmente fica entre 4 e 10 micrometros por segundo.

- Grupo C apresenta solos com potencial de escoamento moderadamente elevado, quando encharcado, com baixa taxa de infiltração. Apresentam em sua composição de 20 a 40% de argila e menos de 50% de areia contendo marga. Alguns solos com texturas argilosas, silte/argilosa, areia/argilosa podem ser colocados neste grupo se forem bem agregados, de baixa densidade ou conter mais de 35% de fragmentos de rocha. A saturação da condutividade hidráulica da camada menos transmissiva deve estar entre a superfície e 50 centímetros, e entre 1 e 10 micrometros por

segundo ($> 0,001$ à $\leq 0,01$ mm/h). A profundidade da camada impermeabilizante deve ser maior que 50 cm. A profundidade do lençol freático deve ser maior que 60cm. Solos com profundidade superior a 100 centímetros com um confinamento e um lençol freático são do grupo C se a saturação hidráulica de todas as camadas de solo à 100 cm da superfície excederem 0,4 micrometros por segundo, mas deve ser inferior a 4 micrometros por segundo.

- Os solos do grupo D apresentam um elevado potencial de escoamento quando encharcados. O movimento de água através deste solo é restrito ou muito restrito. Eles contêm mais de 40% de argila e menos de 50% de areia, com alto potencial de expansão. Fazem parte destes grupos solos com permanência elevada do lençol freático. Os limites das características físicas destes solos são: a profundidade da camada impermeabilizante deve ser entre 50 e 100cm; a saturação hidráulica da camada menos transmissiva é menor que 1 micrometro por segundo ($\leq 0,001$ mm/h).

Figura 5. Distribuição global dos grupos hidrológicos de solos, com resolução espacial de 250 m. Os grupos hidrológicos de solo A, B, C e D correspondem à baixo, moderadamente baixo, moderadamente alto e alto potencial de escoamento, respectivamente. Fonte: Ross, 2018.

Certas classes de solos são colocadas no Grupo D devido a presença do lençol freático a 60 cm de profundidade, mesmo que a saturação da condutividade hidráulica seja favorável para a

infiltração de água. Porém se estes solos puderem passar pelo processo de drenagem adequada, então eles são atribuídos à 2 grupos hidrológicos de solo conforme ilustrado na (NEH, 2009).

Figura 6. Condições e propriedades do solo para classificação dos Grupos Hidrológicos.

Tabela 1. Critérios para atribuição de grupos de solos hidrológicos quando existe uma camada impermeável a uma profundidade entre 50 e 100 centímetros.

Propriedade do solo	Grupo hidrológico de solo A	Grupo hidrológico de solo B	Grupo hidrológico de solo C	Grupo hidrológico de solo D
Condutividade hidráulica da camada menos transmissiva saturada	$> 0,04 \text{ mm/h}$	$\leq 0,04 \text{ à } > 0,01 \text{ mm/h}$	$\leq 0,01 \text{ à } > 0,001 \text{ mm/h}$	$\leq 0,001 \text{ mm/h}$
	e	e	e	E
Profundidade da água na camada impermeável	50 à 100 cm	50 à 100 cm	50 à 100 cm	$\leq 50 \text{ cm}$
	e	e	e	E
Profundidade do lençol freático	60 à 100 cm	60 à 100 cm	60 à 100 cm	$\leq 60 \text{ cm}$

Fonte: NEH (2009), adaptado pelo autor.

Tabela 2. Critérios para atribuição de grupos de solos hidrológicos quando existe uma camada impermeável a uma profundidade maior que 100 centímetros.

Propriedade do solo	Grupo hidrológico de solo A	Grupo hidrológico de solo B	Grupo hidrológico de solo C	Grupo hidrológico de solo D
Condutividade hidráulica da camada menos transmissiva saturada	$> 0,01 \text{ mm/h}$	$\leq 0,01 \text{ à } > 0,004 \text{ mm/h}$	$\leq 0,004 \text{ à } > 0,0004 \text{ mm/h}$	$\leq 0,0004 \text{ mm/h}$
	e	e	e	E
Profundidade da água na camada impermeável	$> 100 \text{ cm}$	$> 100 \text{ cm}$	$> 100 \text{ cm}$	$> 100 \text{ cm}$
	e	e	e	E
Profundidade do lençol freático	$> 100 \text{ cm}$	$> 100 \text{ cm}$	$> 100 \text{ cm}$	$> 100 \text{ cm}$

Fonte: NEH (2009), adaptado pelo autor.

Segundo Zhang et al. (2018), mudanças na cobertura natural por uso da terra, e mudanças climáticas são os dois fatores mais importantes nas variações hidrológicas, podendo afetar a evapotranspiração, interceptação, infiltração e o escoamento superficial até alterar diretamente a morfologia e condições fisiológicas da paisagem e alterar indiretamente o solo e o limite das camadas atmosféricas. Logo, não se pode definir grupos hidrológicos como estruturas inalteráveis.

O solo é o principal limitador da água que está reservada em seu meio, e apenas uma parcela deste recurso fica disponível para as plantas. E por este motivo, no campo é necessário manter a umidade do solo em quantidades suficientes para que o recurso hídrico esteja em disponibilidade para as plantas (Tárník e Leitmanová, 2017). Com base nos dados da última pesquisa citada, foi possível observar os impactos das alterações climáticas na quantidade de água no solo. O trabalho também pode ser tomado como base para decisões de planejamento do manejo da paisagem, parcelamento ou irrigação.

Partículas como cinzas, produtos de queimadas, também provocam alterações significativas na hidrologia do solo. Para Thomaz (2018), áreas sujeitas à acumulação de camadas de cinzas, aumentam a complexidade dos processos hidrogeomorfológicos. Em tese a combinação de cinzas, microagregados e solos, resultam em possibilidades diversas para as camadas. Para o autor, possivelmente cinzas podem aumentar o fluxo na superfície da terra e a erodibilidade do solo, outro possível efeito na interação cinza solo seria a vedação superficial, entupindo os poros dos solos, e a formação de crostas que resultam em mudanças superficiais da hidrologia.

As queimadas por sua vez provocam vários efeitos nas propriedades físico-químicas do solo, uma das alterações mais relevantes destas propriedades é a criação de uma frente contínua, repelente à água, paralela à superfície, que diminui a permeabilidade do solo (Imeson et al. 1992). Robichaud (2000) mensurou que a redução na condutividade hidráulica causada no solo pelo efeito do fogo pode chegar a 40%. Segundo

Mataix-Solera e Doerr (2004), a estabilidade da estrutura de microagregados podem aumentar sob efeito de incêndios, devido à formação do filme hidrofóbico na superfície externa nas estruturas, enquanto que a estabilidade diminui drasticamente, devido às altas temperaturas desagregarem os cimentos orgânicos (Badi'a e Martí, 2003).

Microagregados, formados pela presença de outros compostos de origem diversa como cinzas originadas por queimadas ou vulcões, provocam alterações significativas no comportamento hidrológico do solo, de forma que deve ser dada uma atenção para áreas com potencial de acumulação destes compostos, principalmente áreas tropicais, de vegetação de savanas ou cerrado, nas quais ocorrem queimadas frequentes, devido a ação antrópica ou por causas naturais. Thomaz (2018), objetivou avaliar efeitos de microagregados e cinzas separadamente, e testar se a interação entre cinza/microagregados afeta hidrologia e erosão do solo, pois esta interação permanece pouco compreendida. Assim foram definidos quatro tipos de áreas: áreas sem microagregados e sem cinzas; áreas com microagregados; áreas com cinzas em concentrações de 600 g m²; e áreas com combinação de microagregados e cinzas. A partir dos resultados chegou-se à conclusão que a combinação entre microagregados e cinzas muda a hidrologia do solo com redução dinâmica da umidade do solo em torno de 28% e reduz o escoamento superficial em cerca de 78%, sendo que os microagregados no experimento apresentaram menor rendimento no escoamento e transporte de sedimentos.

Solos em áreas Cársticas

A zona denominada epicarste, segundo Ford e Williams (1991), compreende a faixa superior da rocha carbonática na qual ocorre a interface rocha/solo, onde a frente de intemperismo está atuando na formação e desenvolvimento do solo, podendo conter fissuras alargada por processos de carstificação, nas quais é drenada a água que entra no sistema e não é retida pelo solo, restando para o sistema somente a água do ponto de murchapermanente.

De acordo com à base de referência mundial para recursos do solo (IUSS, 2006), os solos que recobrem rochas calcárias e dolomíticas são compostos por argila avermelhada. Estes solos normalmente serão classificados como Neossolos

Litólicos, Cambissolos, Luvisolos, Nitossolos e Vertissolos háplicos (Cromico). As taxas de dissolução da calcita na epicarste são altas, segundo White (1988), chegam a 0.1cm/ano.

Segundo Xu et al. (2016) rochas carbonáticas (compostas por até 1,52% de calcários e 2,02% de dolomita) formam pequenas quantidades de óxidos insolúveis, incluindo os óxidos de ferro, alumínio como também de silicatos (principalmente a caulinita e a ilita) presentes no solo, listados por White (1988) como SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, e como consequência as taxas de pedogênese são baixas nestes ambientes. Mas segundo Liu et al. (2020) o clima e o grau de inclinação são fatores importantes para o desenvolvimento de solos nestes ambientes, pois a espessura média da camada de solo em áreas cársticas típicas do sudoeste da China subtropical é de apenas 30–50 cm, muito menor do que na planície do norte da China, de clima tropical, na qual a espessura média é maior que 200cm.

Se não houver contribuição de deposição de sedimentos eólicos significativamente, a formação de solos a partir de rochas carbonáticas é condicionada à "impurezas" minerais não carbonatados (minerais de silicatos, hidróxidos e óxido) pois os carbonatos de cálcio e magnésio se dissolvem completamente durante o intemperismo químico, não restando nenhuma matriz mineral residual para sustentar os solos (Moore et al., 2017).

Segundo Moore et al. (2017) a dissolução congruente de minerais carbonáticos deixa as rochas intemperizadas enriquecidas comparativamente em minerais silicatados, sendo eles relativamente enriquecidos em Al e Si, devido à perda preferencial de Ca e Mg durante a dissolução incongruente. De forma que o Ca e Mg também são dissolvidos durante o intemperismo no perfil de solo. Assim os minerais de silicato residuais formam uma matriz estrutural para apoiar a formação do solo. Esta abordagem é concordante com a observação de Zupančič et al. (2018), concluindo que os estratos não pedogênicos, imediatamente abaixo dos solos cársticos, não são necessariamente representativos do material de origem, concluindo em sua pesquisa que os solos nas regiões cársticas se formam pelo acúmulo de resíduos insolúveis no calcário com uma contribuição significativa de material intercalado e a contribuição eólica adicional de material altamente intemperizado.

Figura 7. Representação esquemática de como solos podem estar dispostos em áreas cársticas. Fonte: Piló e Auler, 2013.

A tendência das rochas carbonáticas para desenvolver zonas locais de alta permeabilidade causa muitos problemas, incluindo a fuga de água subterrânea que resulta em escassez e baixa previsibilidade de abastecimento de água subterrânea, escassez de fluxos de superfície, instabilidade do solo para fins de fundação, vazamento de reservatórios de superfície e ambientes de eliminação de resíduos insatisfatórios (Legrand, 1983).

Travassos (2010), afirma que em ambientes cársticos o solo é representado como a porção superior da zona não saturada, onde a água precipitada pode, dependendo da profundidade e propriedades hidrológicas, ser armazenada temporariamente ou infiltrar em direção à zona epicarste. Sendo assim o solo pode funcionar como um regulador temporal de recarga hídrica no sistema cárstico.

A formação de solos de Latossolo Vermelho distroférrico típico (Terra Rossa) no carste da Península de Yucatán, onde o autor refere que a fonte do material que constitui solos de silicato sobre calcário foi debatida por mais de 150 anos. As duas principais fontes são a origem autóctone e outra aloctone, sendo definidos quatro tipos de estudos para determinar a origem dos materiais: Estudos regionais com trabalho de campo intensivo, descrição de perfis de solo e relevo; Estudos de campo com trabalho de campo intensivo, mas restritos espacialmente; Estudos de caso (pontos ou pequenas áreas) incluindo análises geoquímicas e micromorfológicas. Os dois primeiros tipos de estudo adotaram a hipótese de

origem de solo residual, no qual a sua formação se deu através da dissolução de calcário, enquanto o terceiro tipo adotou a hipótese da contribuição de materiais alóctones. Na discussão dos resultados o autor deixa claro que há contribuição tanto alóctone quanto autóctone (Bautista et al., 2011).

Sedov et al. (2007), e Cabadas-Báez et al. (2010), descrevem a cobertura do solo da península de Yucatán, composta por Chernossolos Rêndzicos e Neossolos razos ricos em húmus (os autores não entram no mérito da discussão sobre a acumulação de matéria orgânica, mas uma hipótese para este tipo de ambiente, seria a concentração de materiais em dolinas), pedregosos, definidos de acordo com sua morfologia seguindo os critérios da World Reference Base (WRB, 1998). Sedov et al. (2007) afirma que a associação mais comum para a área é de Neossolos Rêndzicos, Neossolos calcáricos e Neossolos litólicos, e atribui diferenças nestas associações às mudanças na composição do relevo e calcário, de forma que as áreas com menor desenvolvimento do solo apresentam Neossolos Litólicos e Neossolos Rendzinicos. A saturação em água leva a formação de Leptossolos Gleicos. Apenas dois casos de materiais alóctones foram detectados nos solos cársticos. Para Sedov et al. (2008), Leptossolos são essencialmente produtos de degradação do solo, podendo resultar também de misturas de materiais alóctones com autóctones.

A hematita, assim como outros óxidos de ferro, tem papel fundamental na estruturação e agregação dos solos, ajudando de forma direta na infiltração e promovendo uma maior coesão entre os grãos, de forma que a erosão é dificultada no

meio (Correa et al., 2008). Estes óxidos também servem de parâmetros para datação de solos através do paleomagnetismo, como foi realizado por Jaqueto et al. (2016), que fez medições através do magnetismo remanescente para datação de solos e sedimentos na região de Pau d'Alho, MT.

Solos Tropicais em áreas cársticas brasileiras

No Brasil, existem poucos estudos de solos em áreas cársticas e os dados hidrológicos destes solos não são suficientes para que se obtenha uma classificação diagnóstica do território. Os poucos trabalhos realizados foram ordenados no mapa da Figura 8.

Shinzato (1998) (Figura 8, ponto 11), Oliveira et al. (1998) (Figura 8, ponto 9), Mota et al. (2008), Girão et al. (2014), e Ferreira et al. (2016) afirmaram que as pesquisas sobre solos em áreas cársticas em climas tropicais ainda são incipientes. Tem sido observado que o processo de carstificação nos trópicos é mais intenso do que nas regiões temperadas devido às condições de temperatura mais elevadas e abundância de precipitação (Karmann, 2000) (Figura 8, ponto 6).

Piló (1998), desenvolveu uma pesquisa em Lagoa Santa - MG, e foram identificadas feições cársticas em rochas carbonáticas da Formação Carmo do Rio Claro (Grupo Andrelândia), Formações Gandarela (Grupo Itabira) e Fecho do Funil (Grupo Piracicaba), Formação Barroso (Grupo São João del Rei), Formação Vazante, Formação Uberaba (Grupo Bauru) e Formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí). Embasado em dados de campos e em outras pesquisas, o autor afirma que para o

desenvolvimento de 1m de solo em um carste tropical úmido, são necessários de 250.000 a 850.000 anos, e segundo Piló são necessários 5m de rocha carbonática inalterada para a formação de 30 cm de solo, sendo que o tempo médio para o desenvolvimento do perfil fica entre 50 e 100 mil anos (Figura 8, ponto 10). Outro dado importante levantado pela pesquisa de Piló é que, para cada metro cúbico de argila produzida por descalcificação, são necessários 80m³ de calcário.

Em estudos recentes Piló e Castro (2020) fizeram uma descrição detalhada de solos em carstes da Lagoa Santa que compõe a Formação Sete Lagoas no estado de Minas Gerais, entre os quais destaca-se a presença de Latossolos, Organossolos.

No trabalho de Costa et al. (2015), foi feita uma compilação de dados de solo na África Ocidental tropical a partir de documentos bibliográficos incluindo teses, relatórios, artigos e mapas relacionados a levantamentos de solo em cada país da área estudada. O autor se embasou em dados de campo, metodologias de classificação e datação para diagnosticar os solos tropicais. A conclusão foi que o desenvolvimento do solo na África Ocidental inclui o intemperismo progressivo, a iluviação de argila, a segregação de ferro, o acúmulo de oxihidróxidos de ferro e alumínio, o endurecimento ("indurated") e o aumento da espessura do solo com o tempo. E, normalmente algumas características de solos maduros desenvolvidos em áreas tropicais podem não estar relacionadas com o saprolito subjacente, mas sim derivarem de um material parental diferente que desapareceu ao longo do tempo geológico (Costa et al., 2015).

Legenda

Formações Cársicas	● 4 - Ferreira et al, 2012	● 8 - Maniçoba et al, 2016	● 12 - Shinzato, 1998
● 1 - Araújo, 2016	● 5 - Ferreira et al, 2017	● 9 - Oliveira et al, 1998	● 13 - Silva et al, 2013
● 2 - Barradas et al, 2014	● 6 - Jaqueto et al, 2016	● 10 - Piló, 1998	● 14 - Travassos, 2010
● 3 - Dias, 2000	● 7 - Karmann et al, 2004	● 11 - Piló e Casto, 2020	● 15 - Vasconcelos et al, 2013

Figura 8. Mapa de pesquisas de solos em áreas cársicas, com a localização das rochas Calcíticas e Dolomíticas. Fonte: Produzido pelo autor com a base de dados do CPRM (1997).

Os solos em áreas cársticas normalmente são bem drenados, podendo conter cascalho e calcário, argila e marga como os descritos por Hu et al. (2015). O autor explica que o solo em áreas cársticas no sudeste da China, apresentam taxa de infiltração estável variando 0,43 a 4,25 mm/min; o teor de matéria orgânica do solo é relativamente alto, variando de 2,2% a 10,1%, e podem apresentar cristais de calcita neoformados, concreções ferruginosas, com horizontes silte arenoso, e estrutura de blocos subangulares, finos e friáveis que se quebram em grânulos, estrutura granular bem desenvolvida, com bioturbação, como os solos estudados por Cabadas-Báez et al. (2010). Sendo assim, conclui-se que não existe um padrão composicional, mas é possível determinar similaridades devido ao material de origem e clima, que são os únicos fatores com características semelhantes, que podem fornecer uma base de partida para classificação dos solos desenvolvidos em carstes tropicais.

No trabalho de Maranhão et al. (2016), foi verificado que, no sudoeste do Tocantins (Figura 8, Ponto 8), a variação do solo, principalmente com a relação à profundidade, foi determinada pela topografia, porém o material de origem proveniente de rochas do grupo Bambuí, teve papel secundário no que diz respeito a morfologia, textura e outras propriedades químicas do solo, pois todos os perfis investigados apresentaram alto teor de silte e argila. O alto teor de Ca e Mg, alto pH e baixo teor de Al são representativos para solos desenvolvidos sobre rochas carbonáticas. A saturação por bases e o equivalente de carbonato de cálcio também foram elevados.

Mas segundo Shinzato (1998), solos desenvolvidos sob a influência de rochas calcárias apresentam algumas características que podem distingui-los parcialmente de outros perfis (Figura 8, Ponto 11). Os solos seriam rasos e, raras vezes, profundos ou muito profundos, sendo eutróficos (com saturação de bases superior a 50%), possuindo argila de atividade alta, isto é, capacidade de troca catiônica superior a 27 cmolc kg⁻¹ de argila e possuem razões elevadas de SiO₂/Al₂O₃, normalmente superiores a 2,5.

Tem sido um consenso científico que em áreas cársticas, os processos de transporte podem contribuir mais para pedogênese que o material de origem. Tal processo é relatado por Bautista et al. (2011), que realizou mapeamento em escala de detalhes de solos em áreas cársticas na península de Yucatán, e também por Olson et al. (1980), que em seu trabalho buscou estabelecer fatores

prevalentes na formação de Terra Rossa sobre rochas calcárias no Sul da Índia.

Segundo Silva et al. (2013) no Brasil, apesar de os sistemas cársticos representarem uma área significativa do território nacional (cerca de 6 %), ainda carecem de estudos, sobretudo no que refere-se à sua cobertura pedológica. Os dados de solos são insuficientes para classificações bibliográficas, devendo ter apoio de dados de campo para que uma pesquisa de pedogênese em áreas cársticas seja adequadamente embasada.

O mapeamento de horizontes cálcicos e petrocálcicos é uma importante ferramenta que pode auxiliar na identificação e caracterização de solos em áreas cársticas, já que a lixiviação dos carbonatos em horizontes superficiais e, posteriormente sua percolação e reprecipitação em camadas subjacentes é comum nestes ambientes (Silva et al., 2013) (Figura 8, ponto 13). Estes horizontes foram descritos por Mack et al. (1994), sendo utilizados como diagnósticos de paleoclimas como também paleoambientes. No caso do Brasil o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SIBCS, EMBRAPA, 2018), descreve o horizonte cálcico como “apresentando uma espessura de 15 cm ou mais, é enriquecido com carbonato de cálcio secundário e contém 150 g kg⁻¹ ou mais de carbonato de cálcio equivalente, tendo no mínimo 50 g kg⁻¹ a mais de carbonato que o horizonte ou camada subjacente. Este último requisito é expresso em volume, se o carbonato secundário do horizonte cálcico ocorre como pendentes em cascalhos, como concreções ou na forma pulverulenta. Se tal horizonte cálcico está sobre mármore, marga ou outros materiais altamente calcíticos (400 g kg⁻¹ ou mais de carbonato de cálcio equivalente), a percentagem de carbonatos não necessita decrescer em profundidade.

O SIBCS, 2018, afirma que com o enriquecimento em carbonatos, o horizonte cálcico tende progressivamente a se tornar obturado com carbonatos e, cimentado, formando um horizonte contínuo, endurecido, maciço, que passa a ser reconhecido como horizonte petrocálcico. “Nos estágios iniciais do horizonte cálcico, este tem carbonatos de consistência macia e disseminados na matriz do solo, ou acumulados em concreções endurecidas ou ambos. O horizonte petrocálcico evidencia o avanço evolutivo do processo de calcificação” (SIBCS, EMBRAPA, 2018). Podendo haver ainda a presença acessória de sílica, e sendo muito rígido quando seco, com estruturação laminar e poros totalmente obstruídos, apresentando espessura mínima superior a 10 cm,

exceto no caso de horizonte laminar sobre rocha consolidada.

Para Silva et al. (2013), as pedoformas côncavas proporcionam maior desenvolvimento pedogenético em razão da maior infiltração da água no solo, já nas superfícies convexas predominam solos menos evoluídos, em razão da intensificação do processo erosivo (Figura 8, ponto 12). A coexistência de concreções ferromangnosas com pontuações de carbonato de cálcio foram correlacionados pelos autores ao clima atual mais seco, responsável pela preservação do CaCO_3 no solo. Em topossequência da base para o topo foram mapeados Argissolos Vermelhos eutróficos (nitossólico), Argissolos vermelhos distróficos, e Cambissolo háplico.

Ferreira et al. (2016), estudaram a gênese de solos de ambiente cárstico na Chapada do Apodi em busca de horizontes cálcicos ou petrocálcicos, tentando identificar os fatores de formação que podem levar a formação de solos com estes horizontes. Os autores buscaram identificar os diferentes minerais presentes no solo e, como os processos de intempéries agiram sobre o material de origem na evolução pedogenética (Figura 8, ponto 5). No trabalho De Ferreira et al. (2016), para validação da pesquisa os autores se valeram de diversos testes para cálculos de percentagens químicas, entre eles o equivalente de carbonato de cálcio através do ataque com HCL. Outro dado importante do trabalho é a análise espectroscópica, na qual foi obtida a faixa UV-visível entre 465 e 665 nm de absorbância do solo. Com auxílio da difratometria de raios X foi possível caracterizar as frações granulométricas para os perfis analisados.

Ferreira et al. (2016) chegaram à conclusão que alguns perfis receberam contribuição de materiais coluvionares, enquanto que outros estão associados aos ciclos de pedogênese/morfogênese com combinação de clima de semiaridez. A eluviação de argilas foi outro processo atuante na pedogênese. Resultados semelhantes aos do trabalho de Silva et al. (2017), demonstrando que a contribuição do material parental tem forte influência no desenvolvimento pedológico, apesar de o relevo ser determinante. Alguns trabalhos no Brasil têm feito um levantamento de dados em áreas cársticas como Dias (2000) (Figura 8, ponto 3), e Cruz et al (2005) que mesmo não tendo como foco principal o estudo pedogenético, trazem alguns dados de solo como subproduto.

A ocupação do solo em áreas cársticas também tem sido objeto de estudo devido ao risco de colapso nestas áreas, de forma que a geotecnia tem trazido contribuições importantes para o

entendimento do comportamento do solo em regiões de rochas carbonáticas. O trabalho de Araújo (2006) (Figura 8, ponto 1), e Barradas et al. (2014) tentaram fazer uma avaliação e mapeamento de colapsos e subsidências de solos em áreas cársticas, no entanto não avaliaram condições de pedogênese e mineralogia que poderiam fornecer uma base importante para este tipo de processo, pois o entendimento das micro estruturas dos solos fornece suporte para estimativas da evolução na frente de intemperismo, fator principal que leva ao colapso de cavernas e consequentemente dos materiais de cobertura subjacentes.

Para Vestena et al. (2002), e Travassos (2010) (Figura 8, ponto 13) a atividade antrópica pode acelerar a erosão aumentando a susceptibilidade de solo e rocha em área cárstica, mas o uso e ocupação destas áreas não é descartado. Um uso racional dos recursos e potencialidades pode ser viável desde que seja planejado de forma a minimizar os impactos. Pois além da erosão e colapso, estas áreas são muito sensíveis a atividades agrícolas, aterros sanitários, atividades turísticas, extração de água subterrânea, mineração, ocupação urbana, dentre outras.

A determinação do parâmetro potencial erosivo do solo permite fazer previsões da quantidade de perda de solo por escoamento superficial. Em um modelo para recuperação ou preservação de uma área esta estimativa é de extrema importância para se adotar medidas eficientes que evitem a perda de solo, e principalmente para áreas cársticas que são muito mais susceptíveis à erosão. No trabalho de Ferreira e Morais (2017) (Figura 8, ponto 5), foi feito um cruzamento de informações de geologia, geomorfologia, pedologia, declividade, uso e ocupação da terra para definir o potencial erosivo na bacia do córrego Cana-Brava, TO, para fins de conservação do ambiente cárstico. Nesse trabalho foi realizada uma análise multicriterial levando em consideração os fatores citados anteriormente, e foram definidas quatro classes de áreas de acordo com o potencial erosivo, sendo Classe 1 para o mais baixo e 4 para o mais alto, verificando que o carste descoberto e o carste em exumação apresentam potencial erosivo moderadamente alto.

Os ambientes cársticos também são palcos de estudos paleontológicos, arqueológicos e antropológicos, pois as estruturas com grandes profundidades servem como depósitos de fosséis. Animais podem facilmente se acidentar nestas estruturas e serem soterrados rapidamente, além disso o ambiente de deposição deste tipo de rocha

pode abrigar muitas espécies marinhas. Cavernas também foram utilizadas como abrigo por humanos ao longo do desenvolvimento das civilizações, guardando registros arqueológicos que ajudam a remontar a história da Terra e a história humana. Nesse sentido Vasconcelos et al. (2013), estudou Antropossolos em áreas cársticas, que devido aos restos e refugos de alimentos (e.g. ossos, vísceras, espinhas de peixes), excrementos humanos e de animais, cinzas de lenha queimada em fogueira, restos de cerâmicas e artefatos líticos, apresentam estruturas químicas e físicas muito diferente dos padrões naturais, mas as características químicas mais evidentes são os elevados teores de fosfato. A descontinuidade das cores observada em trincheiras de estudo de Vasconcelos et al. (2013) também indicam inexistência de relação pedogenética entre os horizontes investigado (Figura 8, ponto 14).

Considerações Finais

Os trabalhos já realizados sobre a pedogênese cársticas deixam claro a complexidade destes sistemas, e ao tentar enquadrar solos desenvolvidos nestas áreas aos grupos hidrológicos de solos verifica-se uma lacuna extensa de informações neste objeto de estudo. Observando as pesquisas em áreas cársticas, pode-se afirmar que estes ambientes não estabelecem um padrão de relevo clássico, porém a composição do material de origem apresentam semelhanças passíveis de comparação, sem se levar em consideração o material alóctone subjacente, que normalmente participa da composição pedogenética com a maior porcentagem do sedimento transportado para a área. Ao tentar enquadrar os solos cársticos tropicais aos grupos existentes, previamente se deve fazer parte destes estudos dados de tradagens, trincheiras ou poços, associados a outras análise químicas e físicas destes solos para que a classificação não seja especulativa.

O desenvolvimento pedogenético em carste não obedece às clássicas topossequências, devido às rápidas variações que podem ocorrer nestes terrenos, sendo assim as contribuições coluvionares e aluvionares podem ser interrompidas ou retomadas rapidamente. Colapsos, abatimento ou subsidências fazem parte do ciclo cárstico, e as mudanças geomórfica nestas áreas ocorrem em um período muito mais curto que nas paisagens clássicas nas quais foram definidas leis entre a interação física e química entre a água e o solo.

Metodologias clássicas como ensaios hidrológicos de campo também não devem ser utilizados como única ferramenta diagnóstica, já que se não existir um horizonte cálcico ou petrocálcico. A água deverá infiltrar totalmente, sem que se possa alcançar o ponto de saturação para medir a velocidade da infiltração.

Embora as afirmativas anteriores sejam conclusivas, alguns perfis de solos em áreas de rochas carbonáticas, podem se desenvolver semelhante aos sistemas clássicos conhecidos, antes que ocorra o desenvolvimento de carste subterrâneo ou externo. Com o desenvolvimento do sistema cárstico, a água poderá passar muito rápido pelo sistema, cessando ou diminuindo a velocidade do desenvolvimento pedogenético. A velocidade com que a água passa por este sistema pode desencadear perda de vegetação natural ao ponto que o solo exposto se enfraqueça e provoque a desertificação cárstica.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UNB (Universidade de Brasília) que forneceu uma estrutura adequada para a realização da pesquisa, além da Capes, ICMBIO e CECAV, que tem trabalhado em parceria com os autores via Laboratório de Geografia Física da UNB, para a realização de diversos trabalhos.

Referências

- Adegbule, A.O., Kibbey, T.C.G. 2020. Exploring the Impact of Long-Term Evaporation on the Relationship Between Capillary Pressure and Water Saturation in Unsaturated Porous Media. *Journal of Hydrology*, 124557. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124557. Acesso: 22 jun. 2020.
- Araújo, M.L.M.A. 2006. Influência do aquífero carste em Almirante Tamandaré. *Revista Eletrônica Geografar*, 1, 20–37,
- Badía, D., Martí C. 2003. Plant ash and heat intensity effects on chemical and physical properties of two contrasting soils. *Arid Land Res Manage*, 17, 23–41.
- Barradas, M.T., Gomes, E., Carvalho, A., Vieira, C.I. 2010. Mapeamento dos colapsos e subsidências do solo em Teresina – Pi.
- Brady, N.C. 1984. *The Nature and Properties of Soils*. 9th Edition. Macmillan Publishing Company. New York.
- Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, Zinck J.A. 2011. *Spatial Distribution And Development Of Soils In Tropical Karst Areas From The Peninsula Of Yucatan, Mexico*.

- Geomorphology, 135, 308–321,
- Boero, V., Premoli, A., Melis, , Barberis, E., Arduino, E. 1992. Influence of climate on the iron oxide mineralogy of terra rossa. *Clays Minerals*, 40, 8–13.
- Cabadas, H., Solleiro, E., Sedov, S., Pi Puig, T., Gama-Castro, J. 2010. Pedosediments of karstic sinkholes in the eolianites of NE Yucatán: a record of Late Quaternary soil development, geomorphic processes and landscape stability. *Geomorphology* 122, 323–337.
- Chalcraft, D., Pye, K. 1984. Humid tropical weathering of quartzite in Southeastern Venezuela. *Zeitschrift für Geomorphologie*. Berlin: 28, 321-332.
- Chiapini, M., Oliveira J.J.C., Schellekens, J., Almeida, J.A., Buurman, P., Vidal-Torrado, P. 2020. Horizonte sombrico e xantização em solos subtropicais policromados do Sul do Brasil: implicações para a classificação de solos. *Scientia Agricola*, 78 (4), e20190115. Epub 08 de julho de 2020. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0115>. Acesso: 08 jul. 2020.
- Corrêa, M.M., Ker, J.C., Barrón, V., Fontes, M.P. F., Torrent, J., Curi, N. 2008. Caracterização de óxidos de ferro de solos do ambiente tabuleiros costeiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 32, 1017-1031.
- Cruz, F.W., Karmann, I., Magdaleno, G.B., Coichev, N., Viana, O. 2005. Influence of hydrological and climatic parameters on spatial-temporal variability of fluorescence intensity and DOC of karst percolation waters in the Santana Cave System, Southeastern Brazil. *Journal of Hydrology*, 302, 1-12,
- D’Affonseca, F.M., Finkel, M., Cirpka, O.A. 2020. Combining implicit geological modeling, field surveys, and hydrogeological modeling to describe groundwater flow in a karst aquifer. *Hydrogeology-Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02220-z>. Acesso: 22 jun. 2020.
- Da Costa, P.Y.D., Nguetnkam, J.-P., Mvoubou, C.M., Togbé, K.A., Ettien, J.B., Yaokouame, A. Old Landscapes, pre-weathered materials, and pedogenesis in tropical Africa: How can the time factor of soil formation be assessed in these regions? *Quaternary International*, 376, 47-74.
- DIAS, J. 2000. A região cárstica de Bonito, MS: uma proposta de zoneamento geoecológico a partir de unidades de paisagem. *Ensaios e Ciência*, 4, 9–43.
- Doerr, S.H. 1999. Karst-like landforms and Hydrology in Quartzites of the Venezuelan Guyana Shield: Pseudokarst or "Real" Karst? *Zeitschrift für Geomorphologie*. Berlin: 43, 1-17.
- Embrapa (Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária, Solos, E., Ministério Da Agricultura, P.E A. 2017. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília: [s.n.]
- Evans, D.L., Rodés, Á., Tye, A.M. 2020. The Sensitivity of Cosmogenic Radionuclide Analysis to Soil Bulk Density: Implications for Soil Formation Rates. *European Journal of Soil Science*. doi:10.1111/ejss.12982. Acesso: 25 ago. 2020.
- Ferreira, T.O. 2014. Soil genesis and iron nodules in a karst environment of the Apodi Plateau. *Revista Ciência Agronômica*, 45(4), 683–695. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000400006>. Acesso: 30 set. 2019.
- Ferreira, E.P., Anjos, L.H.C., Pereira, M.G., Valladares, G.S., Silva R.C., Azevedo, A.C. 2016. Genesis and classification of soils containing carbonate on the apodi plateau, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40, 1–20.
- Ferreira, Z. A., Morais, F. 2018. Physical diagnostic-conservationist of karstic environment of watershed Cana-brava river, Aurora do Tocantins (TO, Brasil). Diagnóstico físico-conservacionista do ambiente cárstico da bacia do córrego Cana-brava, Aurora do Tocantins (TO, Brasil). *Ciência e Tecnologia do Tocantins*, 28, 244–73.
- Foth, H.D., Schafer, J.W. 1980. Soil geography and land use.
- Ford, D.C., Williams, P.W. 1989. Karst Geomorphology and Hydrology, Unwin Hyman, London.
- Girão, R.O., Moreira, L.J.S., Girão, A.L. De A., Romero, R.E., Ferreira, T.O. 2014. Soil Genesis And Iron Nodules In A Karst Environment Of The Apodi Plateau. Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. *Revista Ciência Agronômica*, 45, 683-695.
- Gleick, P.H. 1996. Recursos de água. Na Enciclopédia do Clima e Tempo, ed. Por Superlogo H., Schneider, Oxford University Press, Nova Iorque, 2, 817-823.
- Hu, K., Chen, H., Nie, Y., Wang, K. 2015. Seasonal recharge and mean residence times of soil and epikarst water in a small karst catchment of southwest China. *Scientific Reports*, 5(May), 1–12. <https://doi.org/10.1038/srep10215>. Acesso: 25 ago. 2019.

- IUSS Working Group WRB, 2006. World Reference Base for Soil Resources 2006. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome. 128.
- Imeson, A.C., Verstraten, J.M., Mulligen, E.J., Sevink, J. 1992. The effects of fire and water repellence on infiltration and runoff under Mediterranean type forest. *Catena* 19:345–361.
- Jaqueto, P., Trindade, R.I.F., Hartmann, G.A., Novello, V.F., Cruz, F.W., Karmann, I., Feinberg, J.M. 2016. Linking speleothem and soil magnetism in the Pau d'Alho cave (central South America). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, 7024-7039. DOI: 10.1002/2016JB013541. Acesso: 20 mar. 2019.
- Jones, W.K., Hobbs, H.H.I., Wicks, C.M., Currie, R.R., Hose, L.D., Kerbo, R.C., Goodbar, J.R. Trout, J. 2003. Recommendations and guidelines for managing caves on protected lands. Charles Town: Karst Waters Institute. 95.
- Karmann I., Teixeira W., Toledo M.C.M., Fairchild T.R., Taioli F. 2011. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: *Decifrando a terra*. São Paulo: Oficina de textos, 2000. LEPSCH, Igor F. 19 Lições de Pedologia. São Paulo: Oficina de Textos.
- Legrand, H.E. 1983. Perspective on Karst Hydrology. *Journal of Hydrology*. 61, 343-355.
- Liu, H., Dai, J., Xu, C., Peng, J., Wu, X., Wang, H. 2020. Bedrock-associated belowground and aboveground interactions and their implications for vegetation restoration in the karst critical zone of subtropical Southwest China. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. doi: 10.1177 / 0309133320949865. Acesso: 03 ago. 2020.
- Lynch, L.S. 2009. Gênese e geoquímica de solos em ambiente cárstico no cerrado da região de Planaltina de Goiás. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 167.
- Mack, G.H., Cole, D.R., Calvin James, W., Giordano, T.H., Salyards, S.L. 1994. Stable oxygen and carbon isotopes of pedogenic carbonate as indicators of PlioPleistocene paleoclimate in the Southern Rio Grande rift, South-Central New Mexico. *Am. J. Sci.* 294, 621-640.
- Maniçoba, F.E., Filho, F.G., Malala, C., Nairony, R., Carla, A. 2016. Mineralogia de solos calcários da Chapada do Apodi, Oeste Potiguar. 1, 1-4.
- Maranhão, D.D.C., Pereira, M.G., Collier, L.S., Anjos, L.H.C., Azevedo, A.C., Cavassani, R.S. 2016. Genesis and classification of soils containing carbonates in a toposequence of the Bambuí Group. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 40, 1-17.
- Mataix-Solera, J., Doerr, S.H. 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in southeastern Spain. *Geoderma*. 118, 77-88.
- Mota, J.C.A., Assis Júnior, R.N., Filho, J.A., Libardi P.L. 2008. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na Chapada do Apodi, RN, cultivados com melão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 49-58.
- Moore, O.W., Buss, H.L., Green, S.M., Liu, M., Song, Z. 2017. The importance of non-carbonate mineral weathering as a soil formation mechanism within a karst weathering profile in the SPECTRA Critical Zone Observatory, Guizhou Province, China. *Acta Geochim* 36, 566–571.
- Musgrave, G.W. 1955. How much of the rain enters the soil? In *Water: U.S. Department of Agriculture. Yearbook*. Washington, DC. 7, 151-159.
- NEH. National Engineering Handbook Hydrology USDA-NRCS. 2013. Hydrologic Soil Groups.
- Oliveira, C.V., Ker, J.C., Fontes, L.E.F., Curi, N., Pinheiro, J.C. 1998. Química e mineralogia de solos derivados de rochas do Grupo Bambuí no Norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22, 583-593.
- Olson, C.G., Ruhe, R.V, Mausbach, M.J. 1980. The {Terra Rossa} limestone contact phenomena in karst, southern {Indiana}. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 1075-1079.
- Piló, L.B., Castro, S.S. 1998. Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal macacos-bau - carste de Lagoa Santa, MG. 1998. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Piló, L.B., Castro S.S. 2020. Solos da Lagoa Santa Karst. In: S. Auler A., Pessoa P. (eds) *Lagoa Santa Karst: Brazil's Iconic Karst Region. Sistemas de cavernas e cársticos do mundo*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35940-9_6. Acesso: 25 ago. 2020.
- Piló, L.B., Auler, A. Introdução à Espeleologia. In: CECAV. 2011. III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental. Brasília: CECAV/ Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 1, 7- 23.
- Robichaud, P.R. 2000. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. *J Hydrol*. 231, 220-229.
- Ross, C.W., Prihodko, L., Anchang, J.Y., Kumar, S.S., Ji W., Hanan N.P. 2018. Global

- Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) para modelagem de escoamento baseado em número de curvas. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, EUA.
<https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1566>.
 Acesso: 22 jun. 2019.
- Sedov, S., Solleiro, R.E., Fedick, S.L., Gama, C.J., Palacios, M.S., Vallejo, G.E. 2007. Soil genesis in relation to landscape evolution and ancient sustainable land use in the northeastern Yucatan Peninsula, Mexico. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat. Mem.* 115-126.
- Sedov, S., Solleiro, R.E., Fedick, S.L., Pi, P.T., Vallejo, G.E., Flores, D.M. L. 2008. Micromorphology of a soil catena in Yucatán: pedogenesis and geomorphological processes in a tropical karst landscape. In: Kapur, S., Mermut, A., Stoops, G. (Eds.), *New Trends in Soil Micromorphology*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 3, 19-37.
- Schwertmann, U., Taylor, R.M. 1989. Iron oxides. In: Dixon, J.B. Weed, S.B. eds. *Minerals in soil environments*. Madison, Soil Science Society of America, 379-438.
- Shinzato, E. 1998. O carste da área de proteção ambiental de Lagoa Santa (MG) e a sua influência na formação dos solos. Campos dos Goytacazes - RJ dezembro - 1998. [s.l.] Universidade Estadual Do Norte Fluminense – Uenf.
- Silva, M.B., Dos Anjos, L.H.C., Pereira, M.G., Schiavo, J.A., Cooper, M., Cavassani, R.S. 2013. Gênese e classificação dos solos de uma topossequência em área de carste na serra da Bodoquena, MS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 37, 1464-1480.
- Silva, M.B., Anjos, L.H.C., Pereira, M.G., Schiavo, J.A., Cooper, M., Cavassani, R.S. 2017. Soils in the karst landscape of Bodoquena plateau in cerrado region of Brazil. *Catena*, Amsterdam, Elsevier BV. 154, 107-117. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.02.022>>. Acesso: 15 dez. 2018.
- Tárník, A., Leitmanová, M. 2017. Analysis of the Development of Available Soil Water Storage in the Nitra River Catchment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245.
- Thomaz, E.L. 2018. Interaction between ash and soil microaggregates reduces runoff and soil loss. *Science of the Total Environment*, 625, 1257-1263.
- Toohey, R.C., Boll, J., Brooks, E.S., Jones, J.R. 2018. Effects of land use on soil properties and hydrological processes at the point, plot, and catchment scale in volcanic soils near Turrialba, Costa Rica. *Geoderma*, 315, 138-148.
- Travassos, L.E.P. 2010. Considerações sobre o carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais, Brasil. Belo Horizonte, Tradição Planalto.
- Vasconcelos, B.N. F., Ker, J.C., Schaefer, C.E. G.R., Poirier, A.P.P., Andrade, F.V. 2013. Antropossolos em sítios arqueológicos de ambiente cárstico no norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 37, 986-996.
- Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J.W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., Vanderborght, J., Young, M.H., Amelung, W., Aitkenhead, M., Allison, S.D., Assouline, S., Baveye, P., Berli, M., Brüggemann, N., Finke, P., Flury, M., Gaiser, T., Govers, G., Ghezzehei, T., Hallett, P., Hendricks Franssen, H.J., Heppell, J., Horn, R., Huisman, J.A., Jacques, D., Jonard, F., Kollet, S., Lafolie, F., Lamorski, K., Leitner, D., McBratney, A., Minasny, B., Montzka, C., Nowak, W., Pachepsky, Y., Padarian, J., Romano, N., Roth, K., Rothfuss, Y., Rowe, E.C., Schwen, A., Šimůnek, J., Tiktak, A., Van Dam, J., van der Zee, S.E.A.T. M., Vogel, H.J., Vrugt, J.A., Wöhling T., Young, I.M. 2016. Modeling Soil Processes: Review, Key Challenges, and New Perspectives. *Vadose Zone Journal*, 15 (5), 0. doi: 10.2136 / vzj2015.09.0131. 2016. Acesso: 15 dez. 2018.
- Vestena, L.R., Kobiyama, M., Santos, L.J.C. 2002. Considerações Sobre Gestão Ambiental em Áreas Carste. *Raega*, 4, 81-94.
- Xu, Y., Wang, K., Qi, X. 2016. Spatial and temporal vegetation changes under geological settings of dolomite and limestone based on TM images. *Acta Ecologica Sinica*. 36, 180-189.
- Young, R.W. 1986. Tower Karst in Sandstone: Bungle Bungle massif, northwestern Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*. Berlin – Stuttgart. 30, 189-202.
- Young, I.M., Crawford, J.W. 2004. Interaction sand self-organization in the soil- microbe complex. *Science*, 304, 1634-1637.
- White, W.B. 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. New York, Oxford University Press, 464.
- Willems, L., Compère, P., Hatert, F., Poucllet, A., Vicat, J.P., Ek, C., Boulvain, F. 2002. Karst in granitic rocks, south Cameroon: Cave genesis and silica and taranakite speleothems. *Terra Nova*, Oxford, 14, 355-362.
- USGS. US Geological Survey, 2018. Science for changing world, The Water Cycle, USA.
- Zhang, L., Nan, Z., Yu, W., Zhao, Y., Xu, Y. 2018. Comparison of baseline period choices for

separating climate and land use/land cover change impacts on watershed hydrology using distributed hydrological models. *Science of the Total Environment*, 623, 1016-1028.

Zupančič, N., Turniški, R., Miler, M., Grčman, H. 2018. Impressão digital geoquímica de material insolúvel no solo em diferentes formações calcárias. *CATENA*, 170, 10–24. doi: 10.1016/j.catena.2018.05.040. Acesso: 18 fev. 2020.