



A importância do relevo e do manejo agrícola nas transformações pedogenéticas: estudo de um sistema pedológico no norte do Paraná – Sul do Brasil

The importance of relief and agricultural management in pedogenetic transformations: study of a pedological system in northern Paraná – South Brazil

Francieli Sant'ana Marcatto* ; Hélio Silveira ; Gustavo Henrique Andrade da Cruz 

Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil.

E-mail: hsilveira@uem.br (HS); gusttavohnq@gmail.com (GHAC)

*Email para correspondência: fran_marcatto@hotmail.com

Recebido (Received): 15/04/2024

Aceito (Accepted): 01/07/2024

Resumo: As transformações pedogenéticas são comandadas por diversos fatores, entre aqueles de maior destaque está o relevo, que condiciona a direção e velocidade dos fluxos hídricos e interfere na formação e distribuição dos solos na paisagem. Entretanto, em solos cultivados, o tipo de uso do solo e o manejo adotado também corrobora para as transformações pedogenéticas, alterando a distribuição de matéria e energia ao longo de uma vertente. Este trabalho tem por objetivo analisar as transformações pedogenéticas e a sua relação com o relevo e com o manejo da cana-de-açúcar, a partir do estudo de uma topossequência de solos derivados de arenitos, localizada em Guaraci-PR. O levantamento dos solos foi realizado em topossequências, identificando as transições verticais e laterais dos horizontes por meio de sondagens a trado e da abertura de trincheiras. Nos pontos selecionados, foram coletadas amostras para a determinação de parâmetros físicos e hídricos dos solos. Os resultados indicaram uma topossequência que apresenta um sistema pedológico complexo, constituído por Latossolo - Argissolo - Neossolo Litólico – Argissolo - Neossolo Quartzarênico. As transformações pedogenéticas foram comandadas por fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais, influenciados pelo relevo e pelo manejo da cana-de-açúcar. O aumento da declividade favoreceu o desenvolvimento do escoamento superficial e a instalação de fluxos laterais subsuperficiais, que comandaram os processos e-iluviais e atuaram na gênese dos Neossolos Litólicos, Argissolos e Neossolos Quartzarênicos. Adicionalmente, o manejo agrícola ocasionou a compactação do horizonte subsuperficial dos solos, contribuindo para mudanças na intensidade e direção dos fluxos hídricos, motores dos processos de transformação pedogenética.

Palavras-chave: Gênese dos solos; Fluxos hídricos; Cana-de-açúcar; Compactação.

Abstract: Pedogenetic transformations are controlled by various factors, among the most prominent being the relief, which determines the direction and speed of water flows and interferes in the formation and distribution of soils in the landscape. However, in cultivated soils, the type of land use and management adopted also corroborate pedogenetic transformations, altering the distribution of matter and energy along a slope. The aim of this paper is to analyze pedogenetic transformations and their relationship with the relief and sugarcane management, based on the study of a toposequence of sandstone-derived soils located in Guaraci-PR. The soils survey was made by toposequences, identifying the vertical and lateral transitions of the horizons by means of auger borings and the opening of trenches. Samples were taken at the selected points to determine the physical and hydric parameters of the soils. The results indicated a toposequence with a complex pedological system, consisting of Latosol - Argisol – Litholic Neosol - Argisol – Quartzarenic Neosol. The increase in slope favored the development of surface runoff and the installation of subsurface lateral flows, which controlled the e-iluvial processes and acted in the genesis of Litholic Neosols, Argisols and Quartzarenic Neosols. Additionally, agricultural management has led to the compaction of the subsurface soil horizon, contributing to changes in the intensity and direction of water flows, drivers of pedogenetic transformation processes.

Keywords: Soil genesis; Water flows; Sugarcane; Compaction.

1. Introdução

O estudo dos solos envolve compreender uma série de fatores que contribuem para a sua formação e transformação ao longo do tempo. O clima, o relevo, o material parental, o tempo de exposição e a atividade biológica são fatores que alteram a velocidade de formação dos solos e a sua distribuição na paisagem (VORONEY, 2007). Entre estes, a interação do solo com o relevo tem um papel central, se influenciando mutuamente e possibilitando o desenvolvimento de paisagens com características distintas (VIDAL-TORRADO *et al.* 2005; WYSOCKI *et al.* 2005).

O relevo tem um papel importante na formação dos solos, principalmente por atuar na regulação da direção e intensidade dos fluxos hídricos, sendo considerado um motor da pedogênese e também da morfogênese (VIDAL-TORRADO *et al.* 2005). Além disso, a distribuição dos materiais ao longo de uma vertente depende diretamente da topografia e das formas de uma encosta, determinando as taxas de erosão e redistribuição dos nutrientes (CHADWICK; ASNER, 2016).

A relação solo-relevo foi expressa nos estudos de Burke *et al.* (2007), que demonstraram a interação entre o grau de intemperismo dos solos e a topografia de uma vertente. Neste estudo, as taxas de intemperismo químico foram maiores em declives suaves, enquanto em maiores declividades houve uma diminuição do intemperismo, visto que há maior escoamento superficial, diminuindo o tempo de contato entre a água e a rocha. Khormali *et al.* (2009) investigaram a variação das propriedades dos solos em diferentes setores de uma vertente, indicando que há uma forte interação entre os atributos dos solos e a posição que ocupam no relevo. Nakashima (1999) estudou os sistemas pedológicos do noroeste do Paraná, relacionando-os com o relevo e a suscetibilidade erosiva. Nessa região, os sistemas pedológicos derivados de arenitos foram mais suscetíveis à erosão quando associados a relevos dissecados, onde os fluxos de água têm maior energia e atuam na remoção de partículas na superfície e em subsuperfície, ocasionando na transformação dos horizontes dos solos. Neste sentido, Oliveira *et al.* (2020) também analisaram a relação solo-relevo em uma toposequência no noroeste paranaense, determinando o modelo de evolução da cobertura pedológica, condicionada por mudanças na morfologia da vertente. Os autores identificaram um sistema pedológico constituído por Argissolo – Neossolo Quartzarênico, que foi interpretado como pertencente a um estágio final de evolução, cujos processos pedogenéticos foram fortemente influenciados pela posição topográfica e declividade da vertente.

Apesar da dinâmica própria dos sistemas naturais, a interferência humana tem acelerado a transformação das paisagens, aumentando a degradação ambiental (ABDEL-RAHMAN, 2023). A erosão pode ser mencionada como exemplo, pois apesar de se tratar de um processo natural, quando acelerada ou provocada pela atividade humana, se torna um grave problema ambiental (FIORENTIN *et al.* 2017).

No Brasil, a erosão acelerada é consequência da conversão de solos naturais em agricultáveis, explorando esse recurso intensamente, além da sua capacidade de recuperação (MEDEIROS *et al.* 2016). As consequências dessa conversão na qualidade dos solos têm sido reportadas em diversos estudos, que apontam para o aumento da compactação, perda da qualidade estrutural, diminuição no volume e continuidade dos poros, redução da infiltração e aumento do escoamento superficial (CHERUBIN *et al.* 2016; CANISARES *et al.* 2020; FRANCO *et al.* 2020). Essas mudanças trazem implicações que vão além do aumento da erosão, interferindo sobre os fluxos de fertilizantes e sedimentos que chegam aos cursos d'água, ocasionando na sua contaminação e assoreamento (HUNKE *et al.* 2015; DIDONÉ *et al.* 2021).

Os impactos negativos sobre a qualidade do solo ocasionados pelo manejo agrícola interferem na sua dinâmica natural, o que pode implicar em transformações pedológicas significativas ao longo do tempo. A erosão acelerada que decapita os horizontes superficiais (BERTOLANI; VIEIRA, 2001), as mudanças nos parâmetros hidrológicos dos solos (CUNHA *et al.* 2008; VANACKER *et al.* 2019) e o adensamento (GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.* 2019) representam alterações que podem acelerar a formação e evolução dos sistemas pedológicos em uma vertente. Assim, além da interação entre os fatores naturais, como relevo, clima, material de origem e atividade biológica que atuam sobre a formação e evolução dos solos ao longo do tempo, a interferência antrópica mostra-se como um elemento adicional.

Neste sentido, Evans *et al.* (2019) mencionam a erosão acelerada como predisponente a ocasionar a remoção das camadas superiores dos solos, expondo o material de origem. Vanacker *et al.* (2019), em estudo realizado no Rio Grande do Sul, observaram que a erosão acelerada promovida pela conversão de florestas em áreas agricultáveis alterou os fluxos laterais dos solos e a redistribuição de materiais ao longo de vertentes íngremes, o que ocasionou a exposição de solos menos intemperizados. Além da exposição de solos mais jovens, a erosão tem promovido a formação de depósitos de sedimentos antropogênicos (JAMES, 2013).

A conversão da floresta em áreas agricultáveis tem contribuído para aumentar a degradação dos solos (KHORMALI *et al.* 2009), sobretudo quando o tipos de usos e os manejos adotados desconsideram a sua fragilidade natural. No norte e noroeste do Paraná, o avanço da cana-de-açúcar sobre as áreas de solos de textura média e arenosa aumentou sua degradação física e o risco de erosão (MARCATTO *et al.* 2022). Diante disso, este trabalho visa trazer contribuições para o entendimento do papel do relevo e da utilização agrícola dos solos como motores da pedogênese, em áreas de solos naturalmente vulneráveis à erosão. Assim, objetiva-se analisar as transformações pedogenéticas e a sua relação com o relevo e com o manejo da cana-de-açúcar, a partir do estudo de uma topossequência de solos localizada em Guaraci-PR.

2. Materiais e métodos

2.1. Localização e caracterização da área de estudo

A topossequência de solos em estudo está localizada na margem esquerda do ribeirão Água do Leite, no município de Guaraci-PR. A área encontra-se entre as coordenadas geográficas 22°57'3.44" e 22°57'11.40" de latitude sul e 51°43'1.14" e 51°43'25,40" de longitude oeste (**Figura 1**), pertencendo a unidade hidrográfica da bacia do Pirapó.

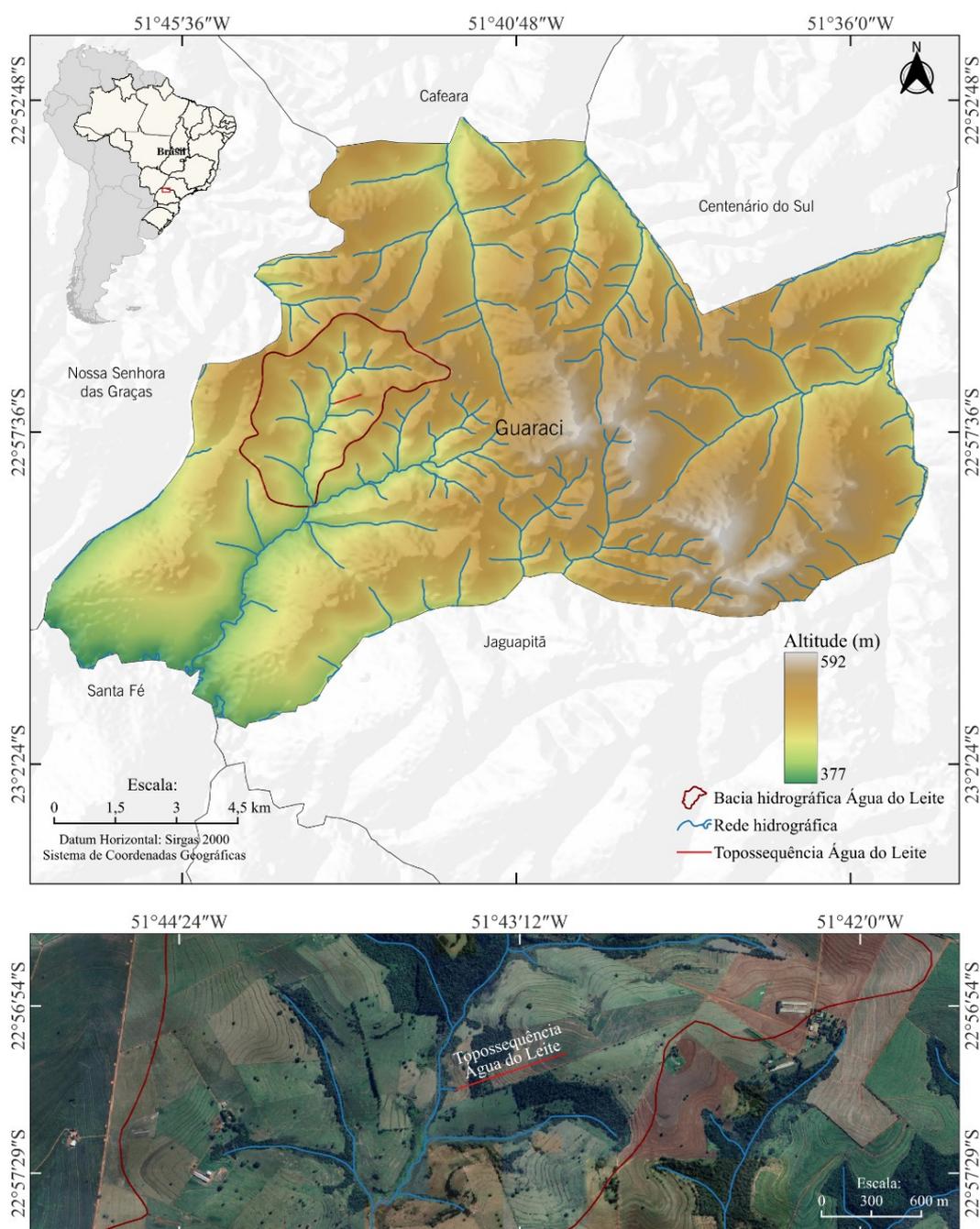


Figura 1: Localização da topossequência Água do Leite. Fonte: Os autores (2024).

A topossequência ocorre associada a uma vertente com relevo ondulado, sendo que o topo apresenta cota altimétrica de 530 metros e o desnível topográfico é de 70 metros, com declividade média de 11%. A vertente analisada é típica da área de ocorrência dos arenitos da Formação Vale do Rio do Peixe na região de estudo, onde dominam vertentes curtas e convexas, com desníveis topográficos que ultrapassam 50 m.

O substrato geológico abrange os arenitos da Formação Vale do Rio do Peixe, pertencente ao Grupo Bauru, conforme a proposta litoestratigráfica de Fernandes (1998) adotada pelo Serviço Geológico do Brasil (BESSER *et al.* 2021). Os arenitos se formaram durante o Cretáceo Superior e se caracterizam por apresentar textura fina a muito fina, cor de vermelho claro a marrom alaranjado, ocorrendo associados a siltitos e lamitos de cor marrom (BESSER *et al.* 2021).

Na região de ocorrência dos arenitos no norte e noroeste paranaense são dominantes os usos com cana-de-açúcar e pastagens. A cana-de-açúcar tem avançado sobre as áreas de pastagem, com significativo aumento na área plantada (NÓBREGA *et al.* 2015). No município de Guaraci, onde localiza-se a topossequência de solos em estudo, a área plantada com cana-de-açúcar aumentou 104% entre os anos de 2017 e 2022, segundo os dados disponibilizados pelo IBGE (2017; 2022).

Na área de estudo, o cultivo com cana-de-açúcar foi implementado há mais de 18 anos. A unidade sucroalcooleira adota como procedimento de cultivo uma operação de subsolagem que atinge até 50 cm de profundidade para descompactar o solo antes do plantio. A colheita é realizada em cana crua, de forma mecanizada.

2.2. Procedimentos para o levantamento, coleta e análise física e hídrica dos solos

O procedimento metodológico adotado para a realização deste estudo partiu da definição de uma vertente com característica típica da sua região de ocorrência em relação às formas de relevo, geologia, tipos de solos e usos da terra. A partir disso, foi realizado o levantamento topográfico da vertente e a distribuição vertical e lateral dos horizontes pedológicos, conforme a metodologia da Análise Bidimensional da Cobertura Pedológica, proposta por Boulet *et al.* (1982). Essa metodologia possibilita compreender o funcionamento da cobertura pedológica, a sua evolução e a relação dos solos com os tipos de usos aos quais estão submetidos (QUEIROZ NETO, 1988).

O levantamento pedológico foi realizado a partir de sondagens a trado e da abertura de trincheiras, alocadas conforme os procedimentos descritos na metodologia adotada (BOULET *et al.* 1982). Na topossequência foram realizadas 13 sondagens a trado, com a coleta de amostras a cada 20 cm até a profundidade de 2 metros. As amostras coletadas foram submetidas ao ensaio de granulometria e utilizadas para a confecção dos gráficos de isovalores de areia e argila, que indicam a distribuição dessas frações na vertente e auxiliam na interpretação das transformações pedogenéticas.

Nas trincheiras, procedeu-se a descrição macromorfológica dos perfis, conforme os critérios de Santos *et al.* (2015). Em cada horizonte pedológico descrito, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas para a determinação dos parâmetros físicos dos solos, e foram realizados os ensaios hídricos. Os atributos físicos dos solos foram determinados conforme os procedimentos descritos pela Embrapa (2017) e incluíram: análise granulométrica e argila dispersa em água, ambas determinadas pelo método da pipeta; densidade do solo e porosidade total obtidas pelo método do anel volumétrico, em três repetições; macroporosidade e microporosidade obtidas pelo método da mesa de tensão, em triplicatas.

A permeabilidade do solo, expressa pela condutividade hidráulica saturada, foi determinada em campo, utilizando o permeâmetro de Guelph. O procedimento adotado foi descrito por Elrick *et al.* (1989), sendo aplicada uma carga hidráulica constante no reservatório combinado. O ensaio foi realizado em todos os horizontes pedológicos descritos nas trincheiras, em três repetições. Os dados obtidos pelos ensaios de densidade do solo, porosidade e condutividade hidráulica corroboram com a interpretação do funcionamento e atuação dos fluxos hídricos em superfície e subsuperfície, que são condicionantes das transformações pedogenéticas. Além disso, são variáveis sensíveis às alterações impostas pelo manejo agrícola.

As análises estatísticas foram realizadas no software R e Excel. O coeficiente de correlação de Pearson (r) a um nível de significância de 0,05 foi classificado segundo a intensidade de correlação, conforme a proposta de Santos *et al.* (2012) (**Tabela 1**).

A representação gráfica da topossequência contendo os horizontes pedológicos foi elaborada com auxílio do software CorelDraw, enquanto as curvas de isovalores de areia e argila foram elaboradas a partir dos softwares Surfer, CorelDraw e AutoCad.

Tabela 1: Classes de intensidade do coeficiente de correlação de Pearson.

Intensidade de correlação	Correlação positiva	Correlação negativa
Muito fraca	0 a 0,2	0 a -0,2
Fraca	0,2 a 0,4	-0,2 a -0,4
Moderada	0,4 a 0,6	-0,4 a -0,6
Forte	0,6 a 0,8	-0,6 a -0,8
Muito forte	0,8 a 1	-0,8 a -1

Fonte: Santos *et al.* (2012).

3. Resultados e discussão

A toposequência em estudo está localizada na margem esquerda do ribeirão Água do Leite, no município de Guaraci-PR. Possui 656 metros de extensão e desnível topográfico de 70 metros, com morfologia convexa no topo, um segmento retilíneo que se prolonga entre a alta e a média vertente, uma leve ruptura côncava na baixa vertente e o retorno da forma convexa no sopé. Os solos encontram-se sob o cultivo da cana-de-açúcar em quase toda a extensão da vertente, sendo substituído por um fragmento de floresta na baixa vertente e por pastagens no sopé, a partir da sondagem 11.

A cobertura pedológica reconhecida ao longo da vertente apresenta variações na organização dos horizontes pedológicos, sendo possível a distinção de quatro setores: um no topo, com sequência de horizontes Ap, AB, Bw1, Bw2, caracterizado como um Latossolo Vermelho (TRI); um setor na alta vertente, onde há um aumento da declividade e a formação de um Argissolo Vermelho (TRII), com sequência de horizontes Ap, E, Bt/E, Bt1, Bt2 e Bw e de um solo raso (Neossolo Litólico), com sequência de horizontes Ap, C e R (TRIII); na média vertente o solo se espessa, formando novamente um Argissolo, com sequência de horizontes Ap, E, Bt, C; o quarto setor ocorre na baixa vertente que se estende até o sopé, onde verifica-se a formação de um Neossolo Quartzarênico (TRIV), com um volume arenoso espesso e sequência de horizontes Ap, C (camada de sedimentos) e E (**Figura 2**).

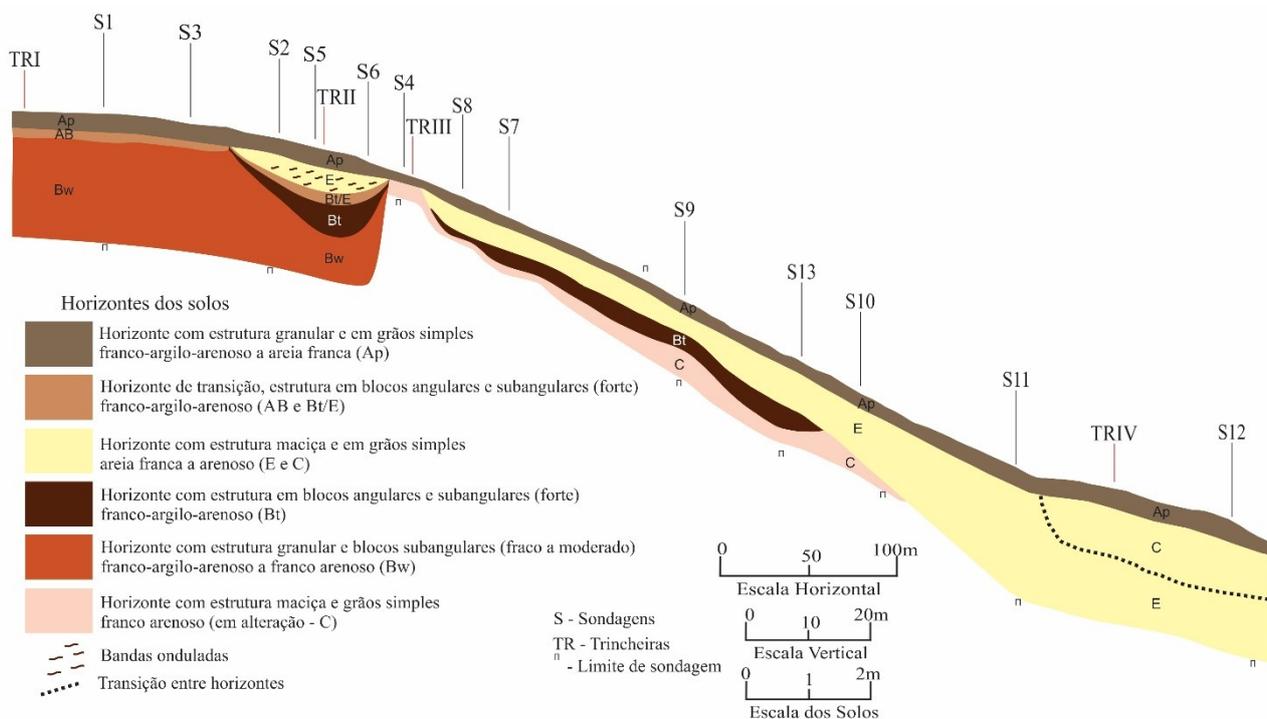


Figura 2: Distribuição vertical e lateral dos solos ao longo da vertente. Fonte: Os autores (2024).

3.1. Morfologia dos horizontes

As características morfológicas dos horizontes variam nos diferentes setores das vertentes, relacionadas a intensidade e direção dos fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais, comandados pela declividade. Essa relação pode ser expressa no horizonte Ap, que se estende por toda a vertente e tem espessura relacionada com a declividade e atuação dos fluxos d'água. Nos setores mais íngremes, entre as sondagens 6 e 11, há indícios de decapitação parcial devido à ação erosiva da água da chuva. A dominância do Argissolo neste

setor da vertente favorece a erosão, devido à mudança textural entre o horizonte superficial e o subsuperficial, que interfere na infiltração de água, contribuindo para a formação do escoamento superficial. Essa condição é ressaltada nos estudos de Bertolani e Vieira (2001), que obtiveram resultados semelhantes.

A textura do horizonte Ap varia de franco-argilo-arenosa a areia franca, sendo mais arenosa quando associado à cobertura argissólica e quartzarênica. Na cobertura litólica, esse horizonte aparece mais enriquecido em argila, conforme observado na descrição morfológica e na análise granulométrica. Essa condição está ligada à presença de uma lente de material argiloso, possivelmente um lamito arenoso, que ocorre intercalado entre os arenitos. As lentes de lamitos entre estratos de arenitos, associados a Fm. Vale do Rio do Peixe, foram identificadas e descritas por Fernandes (1998), no município de Santo Inácio - PR, na proximidade da área de estudo.

A estrutura do horizonte Ap é granular e se desfaz em grãos simples, quando associado ao Latossolo e Neossolo Litólico, e possui aspecto maciço, se desfazendo em grãos simples, associado ao Argissolo e ao Neossolo Quartzarênico (Tabela 2). Verticalmente, o Ap transiciona para os horizontes AB, E e C, nos diferentes setores da vertente.

O horizonte AB ocorre associado a cobertura latossólica, se estendendo por aproximadamente 100 m no topo da vertente. Possui espessura média de 27 cm, textura franco-argilo-arenosa e estrutura em blocos angulares e subangulares. Este horizonte transiciona verticalmente para o Bw e lateralmente desaparece e dá lugar ao horizonte E, marcando a transição do Latossolo para o Argissolo.

Tabela 2: Descrição morfológica simplificada dos perfis da topossequência de solos Água do Leite.

TR*	Hor. ¹	Prof. (cm)	Cor	Estrutura ²			Consistência ³			Transição
				Tipo	Grau	Tam.	Seca	Úmida	Molhada	
TRI	Ap	0-29	2,5YR 5/4 a 4/4	gran./ g. simples	fraco	peq.	solta	solta	ñ. plástica ñ. pegajosa	ondulada/ gradual
	AB	29-56	2,5YR 4/4 a 4/6	Bl.ang. e subang.	forte	médio/ grande	lig.dur	firme	lig.plástica lig.pegajosa	plana/difusa
	Bw 1	56-115	2,5 YR 4/6 a 4/8	gran.e bl.subang.	fraco	médio/ grande	solta	muito friável	lig.plástica lig.pegajosa	plana/ difusa
	Bw 2	115-200+	2,5 YR 4/8	gran.	fraco	peq./ médio	solta	muito friável	lig.plástica lig.pegajosa	-
TRII	Ap	0-27	5YR 5/4	g. simples	-	-	solta	solta	ñ. plástica ñ.pegajosa	ondulada/ gradual
	E	27-64	5YR 4/6	mac/ g.simples	-	-	solta	solta	ñ. plástica ñ.pegajosa	ondulada/ abrupta
	Bt/ E	64-84	2,5 YR 4/6	bl. ang. e subang.	forte	médio/ grande	macia	friável	plástica pegajosa	ondulada/ clara
	Bt1	84-131	10R 3/6	bl. ang., subang., prism.	forte	grande	macia	friável	m. plástica m. pegajosa	plana/ difusa
	Bt2	131-154	2,5YR 4/6	bl. ang. e subang.	forte	médio/ grande	macia	muito friável	plástica pegajosa	plana/ difusa
	Bw	154-200+	2,5YR 4/8	gran.e bl.subang.	mod.	peq./ médio	macia	muito friável	plástica pegajosa	-
TRIII	Ap	0-7	2,5YR 4/6	gran./ g. simples	fraco	peq.	solta	solta	lig. plástica lig.pegajosa	ondulada/ clara
	C	7-26	2,5YR 3/6; 10R 3/2	mac/ g.simples	-	-	macia	muito friável	lig. plástica lig.pegajosa	-
	R	26+	a 3/3 2,5 YR 4/6	-	-	-	-	-	-	-
TRIV	Ap	0-28	2,5YR 4/4 10YR	mac/ g.simples	-	-	solta	solta	ñ. plástica ñ.pegajosa	ondulada/clara
	C1 a C11	28-110	5/6; 6/6; 7/6 e 7,7 YR 7/6; 6/6	mac/g.sim ples/ bl.subang.	- fraco	- Peq.	solta	solta/ muito friável	ñ. plástica ñ.pegajosa	ondulada/clara
	2 E	110-200+	10YR 5/8	g. simples	-	-	solta	solta	ñ. plástica ñ.pegajosa	-

TR= trincheira, Hor.= horizonte; prof.=profundidade, gran.= granular, g. simples = grãos simples, mac.= maciça, bl. subang.= blocos subangulares, bl.ang.= blocos angulares, prism.= prismática; mod.=moderado; ñ. plástica= não plástica, ñ. pegajosa= não pegajosa, lig. plástica= ligeiramente plástica; lig. pegajosa= ligeiramente pegajosa. Fonte: Os autores (2024).

O horizonte Bw é encontrado no topo e na alta vertente, ocorrendo abaixo do AB associado ao Latossolo e abaixo do Bt associado ao Argissolo. É mais espesso no topo da vertente (TRI), dividindo-se em Bw1 e Bw2. A textura de ambos é franco-arenosa, entretanto, os agregados são granulares e em blocos subangulares para o Bw1 e somente granulares no Bw2. Quando associado ao Argissolo, o Bw é menos espesso, possui textura franco-argilo-arenosa e estrutura com agregados granulares e em blocos subangulares.

O horizonte E se inicia na alta vertente, tem a sua continuidade interrompida e surge novamente a partir da sondagem 8, se estendendo até a base da vertente, onde é recoberto por sedimentos. Na alta vertente, o horizonte E possui textura areia franca e bandas onduladas de textura franco-argilo-arenosa. Não possui estrutura definida, apresentando material maciço que se desfaz em grãos simples. Na baixa vertente, este horizonte está recoberto por uma camada de sedimentos com 110 cm de espessura e se diferencia daquele da alta vertente por apresentar textura areia e cor mais clara, possivelmente associada a perda de óxido de ferro (**Tabela 2**).

O pacote de sedimentos que recobre o horizonte E na baixa vertente se caracteriza por apresentar coloração variada, sendo distinguíveis 11 camadas de origem coluvial. Essas camadas têm texturas que variam de areia a areia franca, com estrutura ausente quando mais arenosos e estrutura em agregados subangulares pequenos e fracos, que se desfazem com facilidade, quando a textura é areia franca.

As características heterogêneas do pacote arenoso do Neossolo Quartzarênico sugerem uma origem mista para este solo, sendo que nos primeiros 110 cm o pacote arenoso demonstra indícios de material transportado, onde a pedogênese ainda não atuou significativamente, seguido por um volume de solo homogêneo que se estende até os 200 cm, sugerindo origem *in situ*, formado por processos eluviais.

Retornando à alta vertente, na cobertura argissólica, logo abaixo do horizonte E foi observado um horizonte de transição classificado como Bt/E, com aproximadamente 20 cm de espessura. Este horizonte possui manchas de areia lavada de textura areia, que contrastam com o material mais argiloso. A granulometria do material argiloso indicou textura franco-argilo-arenosa e a descrição morfológica aponta para uma estrutura em blocos angulares e subangulares, de grau forte, e tamanho médio a grande. Verticalmente, o Bt/E transiciona para um Bt de caráter abrupto.

O Bt descrito na alta vertente (TRII) se diferencia morfológicamente em Bt1 e Bt2, sendo que o primeiro possui cor vermelha escura e o segundo foi classificado como vermelho. Em ambos, a textura é franco-argilo-arenosa e a estrutura em blocos angulares e subangulares, entretanto, no Bt1 foram observados macroagregados prismáticos que se desfazem em blocos e a presença de cerosidade de grau moderado. Em profundidade, o Bt desaparece e dá lugar ao Bw, na alta vertente, e ao horizonte C, na média vertente.

O horizonte C foi descrito e caracterizado na alta vertente, associado a cobertura litólica (TRIII), entretanto, se estende lateralmente para a média vertente associado ao Argissolo. A textura é franco arenosa e a estrutura é ausente, sendo comum a presença de cascalhos e uma grande variação de cores, resultado da alteração da rocha (**Tabela 2**). Verticalmente, o horizonte C transiciona para a rocha.

3.2. Parâmetros físicos e hídricos dos solos

A análise granulométrica dos perfis de solos aponta para a dominância da fração areia nos horizontes pedológicos, sobretudo a areia fina. Verticalmente, a distribuição das partículas indica maior concentração de areia nos horizontes superficiais do Latossolo e Argissolo e uma diminuição em profundidade, o que implica em aumento da fração argila. Ao contrário, nos Neossolos foram observados horizontes superficiais mais argilosos e aumento da fração areia em profundidade. Entretanto, no Neossolo Quartzarênico, o teor de argila é pouco expressivo em todo o perfil, com valores inferiores a 67 g Kg^{-1} (**Tabela 3**).

Os teores de silte são pouco expressivos na maioria dos perfis analisados, exceto no Neossolo Litólico descrito na alta vertente, onde as maiores concentrações podem estar ligadas ao grau de desenvolvimento deste solo, com a presença de minerais primários menos resistentes em processo de intemperização.

As curvas de isovalores da fração areia e argila ao longo da topossequência, obtidas a partir da análise granulométrica das sondagens a trado, podem ser visualizadas na **Figura 3** e **Figura 4**.

A fração areia possui maior concentração nos horizontes superficiais de todos os solos, demonstrando uma tendência de arenização superficial, mesmo no Latossolo. Apesar disso, essa condição é observada de forma mais significativa no Argissolo e no Neossolo Quartzarênico. No sopé da vertente, a elevada concentração de areia em toda a espessura do solo indica a ocorrência de uma zona de eluviação, onde os fluxos hídricos têm atuado para a remoção da fração argila e o acúmulo residual de areia. Esse padrão de

distribuição da fração areia foi observado nos resultados de Oliveira *et al.* (2020), em estudos realizados no noroeste do Paraná.

Tabela 3: Granulometria, grau de dispersão e floculação da argila, e relação silte/argila dos horizontes pedológicos da topossequência Água do Leite.

Hor.	Prof. (cm)	Granulometria (g Kg ⁻¹)								GD (%)	GF (%)	S/A
		AMG	AG	AM	AF	AMF	AT	S	A			
<u>TRI – Latossolo Vermelho</u>												
Ap	0-29	0	3	109	419	272	803	70	127	68,9	31,1	0,55
AB	29-56	0	1	77	396	224	698	84	218	82,8	17,2	0,38
Bw1	56-115	0	1	92	399	245	737	89	174	82,5	17,5	0,51
Bw2	115-200+	0	2	70	398	266	736	89	175	69,7	30,3	0,51
<u>TRII – Argissolo Vermelho</u>												
Ap	0-27	0	1	117	419	316	853	76	71	71,8	28,2	1,07
E	27-64	0	1	93	456	295	845	73	82	78,3	21,7	0,89
Bt/E	64-84	0	1	89	337	266	693	79	228	75,5	24,5	0,35
Bt1	84-131	0	1	64	281	233	579	87	334	69,1	30,9	0,26
Bt2	131-154	0	1	79	299	264	643	84	273	74,3	25,6	0,31
Bw	154-200+	0	0	67	310	293	670	96	234	62,1	37,9	0,41
<u>TRIII - Neossolo Litólico</u>												
Ap	0-7	8	7	57	257	263	592	151	257	76,7	23,3	0,59
C	7-26	0	2	44	295	305	646	195	159	89,6	10,4	1,23
<u>TRIV - Neossolo Quartzarênico</u>												
Ap	0-28	3	9	144	406	283	845	88	67	67,2	32,8	1,31
C1 a	28-110	0	6	195	392	253	846	101	53	63,4	36,6	1,9
C11												
2 E	110-200+	0	32	416	369	109	926	39	35	62,1	37,9	1,11

AMG – areia muito grossa, AG- areia grossa, AM- areia média, AF- areia fina, AMF – areia muito fina, AT- areia total, S – silte, A – Argila, AN – argila natural, GD – grau de dispersão, GF – grau de floculação, S/A- relação silte/argila. Fonte: Os autores (2024).

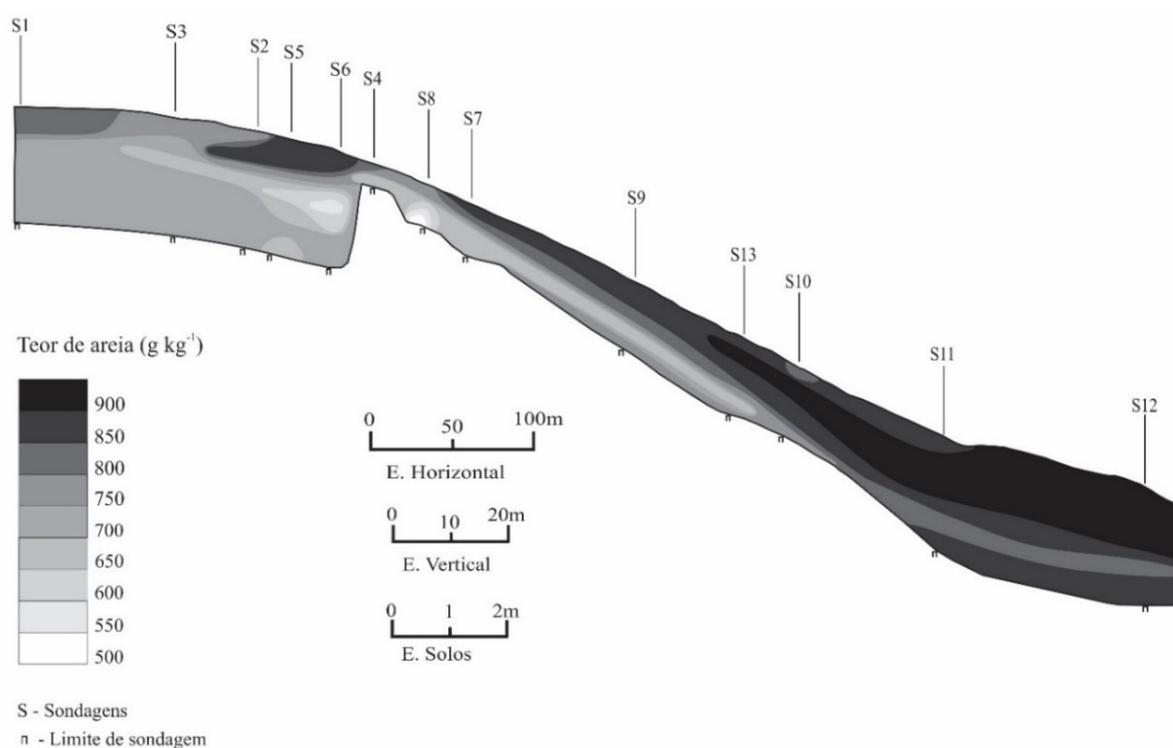


Figura 3: Distribuição da fração areia por meio de curvas de isovalores na topossequência Água do Leite. Fonte: Os autores (2024).

Em relação à distribuição da fração argila, nota-se que no topo da vertente há uma maior homogeneidade vertical e lateral, devido à ocorrência do Latossolo. Entretanto, a partir da sondagem 2, a mudança na morfologia da vertente e o aumento da declividade resultam em mudanças mais significativas na distribuição dessa fração (**Figura 4**).

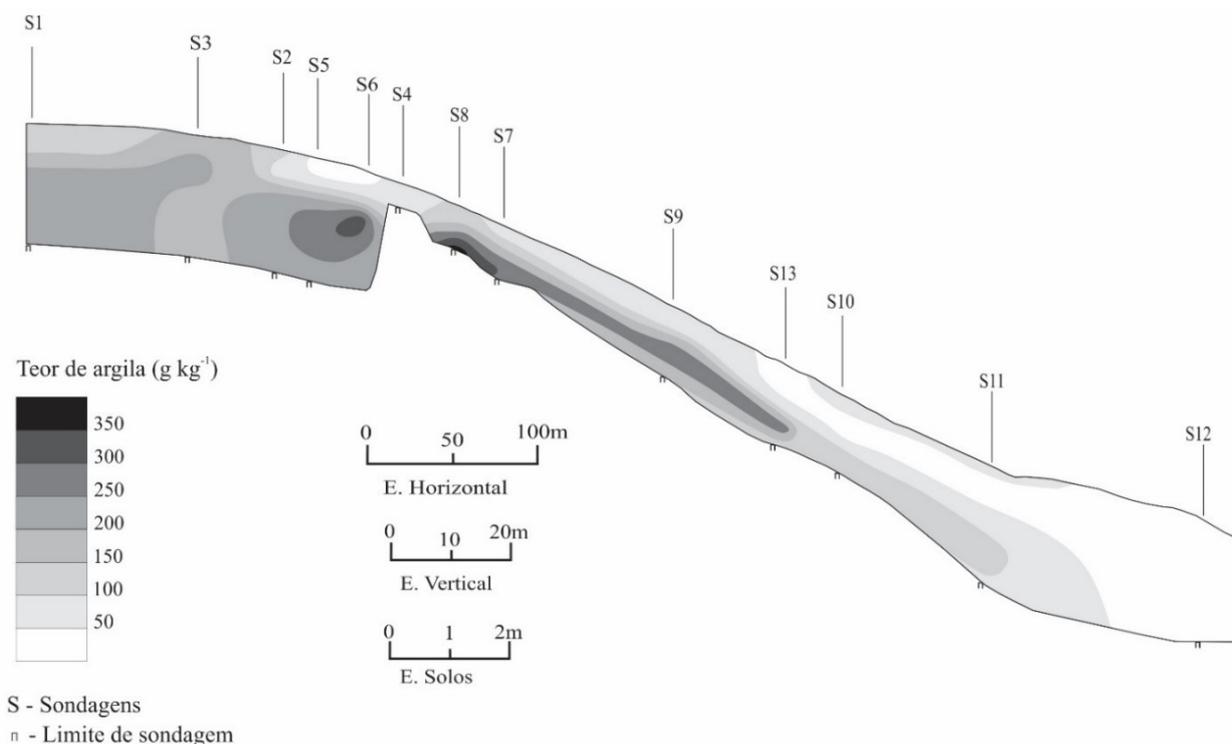


Figura 4: Distribuição da fração argila por meio de curvas de isovalores na topossequência Água do Leite. Fonte: Os autores (2024).

Entre a alta e a média vertente, os horizontes mais próximos da superfície contém menos argila, indicando eluviação, enquanto em profundidade ocorre um incremento de materiais finos, chegando a valores superiores a 350 g Kg^{-1} em alguns locais (sondagem 8). Lateralmente, em direção a média/baixa vertente, ocorre uma perda progressiva da argila, que atinge valores inferiores a 150 g Kg^{-1} , demonstrando uma tendência de arenização remontante, expressa também nas curvas de isovalores de areia. O empobrecimento de argila e o espessamento do horizonte eluvial a partir da sondagem 10 ocasionam na formação do Neossolo Quartzarênico, cujo teor de argila é inferior a 50 g Kg^{-1} .

Os dados de argila naturalmente dispersa em água e argila floculada apontam para a dominância da dispersão em todos os horizontes pedológicos (**Tabela 3**), inclusive no horizonte Bw do Latossolo. Estes dados demonstram que a fração argila encontra-se em mobilidade e sugere a instabilidade do sistema pedológico. A elevada dispersão em solos cultivados tem sido estudada por alguns autores, que apontam para a adição de fertilizantes e corretivos como responsáveis por alterar o complexo sortivo dos solos e aumentar a dispersão da fração argila (CARVALHO JÚNIOR *et al.* 1998; PRADO e CENTURION, 2001; HUNKE *et al.* 2015).

Os dados físicos de densidade do solo e porosidade total apresentaram correlação negativa significativa ($r = -0,71$), ou seja, o adensamento do solo ocasionou a diminuição do volume de poros (**Tabela 4**). Os resultados indicaram valores menores de densidade e maior volume de poros nos horizontes superficiais da maioria dos solos observados na vertente, sendo que a densidade variou de $1,5$ a $1,7 \text{ g.cm}^3$ e a porosidade total entre $28,3$ e $36,4\%$ (**Tabela 5**). Em contrapartida, foi observado um adensamento subsuperficialmente, principalmente a partir de 25 cm de profundidade.

Os horizontes AB, E, Bt/E e C apresentaram valores de densidade superiores a $1,8 \text{ g.cm}^3$ e porosidade total inferior a 30% , sugerindo a compactação desses horizontes, uma vez que os valores de densidade do solo são considerados críticos, conforme os limites propostos por Reichert *et al.* (2003) e Reinert *et al.* (2008) para solos de textura média.

Tabela 4: Coeficiente de correlação de Pearson dos dados físicos e hídricos dos solos da topossequência Água do Leite.

	Ma	Mi	Pt	Kfs	A	AMF	AF	AM	AT	AD	AFLO
Ds	-0,44*	0,11	-0,71*	-0,2	0,34*	-0,19	-0,10	-0,17	-0,34	0,66*	-0,66*
Ma		-0,9*	0,7	0,46*	-0,35*	-0,02	0,12	0,24	0,37*	-0,44*	0,45*
Mi			0,36*	-0,3	0,31*	0,15	-0,1	-0,26	-0,35*	0,23	-0,23
Pt				0,53	-0,04	0,3	0,04	-0,08	0,06	-0,55*	0,55*
Kfs					-0,5*	-0,59*	-0,28	0,88*	0,58*	-0,49*	0,49*
A						0,1	-0,59*	-0,65*	-0,95*	0,25	-0,25
AMF							0,32*	-0,69*	-0,23	0,30	-0,30
AF								0,14	0,81*	-0,09	0,09
AM									0,71*	-0,53*	0,53*
AT										-0,63*	0,40*
AD											-1

Ds – densidade do solo, Ma – macroporosidade, Mi- microporosidade, Pt – porosidade total, Kfs – condutividade hidráulica, A - argila, AMF- areia muito fina, AF – areia fina, AM – areia média, AT – areia total, AD – argila dispersa, AFLO – argila floculada. * Correlações significativas ($p < 0,05$). Fonte: Os autores (2024).

Tabela 5: Macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo, condutividade hidráulica saturada seguido do desvio padrão, dos horizontes pedológicos descritos na topossequência Água do Leite.

Horizonte	Prof. (cm)	Macroporosidade		Microporosidade (%)		Pt	Ds (g.cm ³)	Kfs (mm h ⁻¹)
		Relativa	Absoluta	Relativa	Absoluta			
<u>TRI – Latossolo Vermelho</u>								
Ap	0-29	19,8	70	8,5	30	28,3	1,73	4,1 ± 2,98
AB	29-56	3,2	13	22,0	87	25,2	1,98	0,6 ± 0,4
Bw1	56-115	19,4	72	7,5	28	26,9	1,77	11,9 ± 1,9
Bw2	115-200+	16,6	55	13,6	45	30,2	1,65	11,9 ± 1,9
<u>TRII – Argissolo Vermelho</u>								
Ap	0-27	22,1	63	13,0	37	35,1	1,53	16,2 ± 8,7
E	27-64	20,9	73	7,6	27	28,5	1,82	1,2 ± 0
Bt/E	64-84	3,6	12	27,5	88	31,1	1,87	3,0 ± 0
Bt1	84-131	3,8	12	29,0	88	32,8	1,73	2,0 ± 1,7
Bt2	131-154	18,6	59	13,1	41	31,7	1,70	2,0 ± 1,7
Bw	154-200+	24,2	72	9,2	28	33,4	1,66	11,9 ± 1,9
<u>TRIII – Neossolo Litólico</u>								
Ap	0-7	21,3	71	8,8	29	30,0	1,68	20,1 ± 6,9
C	7-26	3,4	12	24,6	88	28,1	1,86	11,9 ± 0
<u>TRIV - Neossolo Quartzarênico</u>								
Ap	0-28	7,3	20	29,1	80	36,4	1,55	32,2 ± 0
C1 a C11	28-110	20,0	64	11,3	36	31,3	1,64	79,9 ± 30,2
2 E	110-200+	22,8	80	5,6	20	28,4	1,70	205,8 ± 103,9

Prof. – profundidade, Pt – porosidade total, Ds – densidade do solo, Kfs – condutividade hidráulica saturada. Fonte: Os autores (2024).

O adensamento do solo subsuperficialmente está associado ao manejo empregado na cana-de-açúcar, que promove o revolvimento dos horizontes superficiais e o adensamento em subsuperfície, devido ao acúmulo de pressão ocasionada pelo tráfego de maquinários agrícolas. Resultados semelhantes foram observados por Cavalcanti *et al.* (2019), que obtiveram maior compactação no subsolo de Argissolos cultivados com cana-de-açúcar. Nos horizontes superficiais, os menores valores de densidade podem estar ligados ao maior aporte de matéria orgânica e a composição granulométrica dos solos (CASTILHO *et al.* 2016), uma vez que a textura mais arenosa do horizonte superficial pode lhe conferir menor compressibilidade comparado ao horizonte subsuperficial.

Além da densidade e da porosidade total, foram quantificados os macroporos e microporos dos solos, que são importantes para compreender a movimentação de água no perfil. Na maioria dos perfis descritos foi observado um maior volume de macroporos nos horizontes superficiais, favorecidos pela textura mais arenosa e por apresentarem estruturas granulares ou em grãos simples, sugerindo uma drenagem mais rápida da água, uma vez que a macroporosidade e a condutividade hidráulica saturada apresentaram correlação positiva e significativa (**Tabela 4**). Resultado semelhante também foi observado nos horizontes Bw descritos

ao longo da toposequência, cujo maior volume de macroporos está ligado à organização estrutural dos elementos sólidos do solo, onde a estrutura granular é dominante.

A compactação promovida pelo manejo agrícola, a textura e a organização estrutural influenciaram nos resultados de porosidade em subsuperfície. Nos horizontes AB, Bt/E e C, os resultados de macroporosidade concordaram com os de densidade do solo e porosidade total, apresentando correlações significativas. Nestes horizontes, ocorreu a compactação e redução do volume de poros grandes, possivelmente relacionado ao manejo agrícola, com quantidades inferiores a 4%. No horizonte Bt1 do Argissolo, apesar de menos adensado do que aqueles anteriormente mencionados, houve um acréscimo significativo no teor de argila e uma mudança estrutural, que pode ter corroborado para o reduzido valor de macroporosidade observado (**Tabela 5**). Neste caso, a argila que migra dos horizontes superficiais para o Bt pode preencher os macroporos, diminuindo o seu volume (SILVA; CABEDA, 2005; CUNHA *et al.* 2008).

Em relação à capacidade de infiltração e movimentação de água no solo, determinada por meio da condutividade hidráulica saturada, houve uma correlação positiva e significativa desta com os dados de macroporosidade ($r= 0,46$), evidenciando a participação dos poros grandes dos solos como responsáveis pela movimentação de água no perfil. Resultados semelhantes foram observados por Holthusen *et al.* (2018) e Kim *et al.* (2010).

A permeabilidade foi maior nos horizontes superficiais do Latossolo, Argissolo e Neossolo Litólico, comparado ao horizonte subsuperficial, concordando com os dados de densidade e macroporosidade, que apontaram para a compactação subsuperficial. A redução da permeabilidade em profundidade foi mais significativa no Argissolo, cujo horizonte Ap apresentou permeabilidade de $16,2 \text{ mmh}^{-1}$, passando a valores inferiores a 3 mmh^{-1} nos horizontes E, Bt/E e Bt, subsequentes. Nos horizontes Bt/E e Bt, a redução da condutividade hidráulica foi acompanhada de redução da macroporosidade e aumento do teor de argila, justificando os resultados observados.

O Neossolo Quartzarênico apresentou comportamento diferente dos demais solos observados na vertente, uma vez que houve aumento da permeabilidade em profundidade, passando de $32,2 \text{ mmh}^{-1}$ no Ap para $79,9 \text{ mmh}^{-1}$ nas camadas de sedimentos, em consonância com os dados de macroporosidade.

A redução da infiltração entre o horizonte superficial e o subsuperficial, ocasiona na mudança de direção dos fluxos hídricos subsuperficiais, favorecendo as transformações pedogenéticas. A diferença de permeabilidade entre os horizontes superficiais e subsuperficiais ocasiona na diminuição dos fluxos d'água verticais e na formação de fluxos laterais, que podem se instalar no topo do horizonte AB da cobertura latossólica, no topo do horizonte E do Argissolo e no horizonte C, do Neossolo Litólico.

3.3. O papel do relevo e do manejo nos processos pedogenéticos

Os tipos de solos e as suas características foram fortemente influenciadas pelo relevo e pelo tipo de manejo dos solos. No topo da vertente, o relevo plano a suave ondulado favorece o fluxo de água vertical, possibilitando a formação de um espesso manto de intemperismo, identificado e descrito como Latossolo.

Entretanto, o aumento da declividade e a convexidade da vertente contribuem para a formação de fluxos hídricos laterais, superficiais e subsuperficiais, que comandam mudanças importantes nos sistemas pedológicos. Neste estudo, o escoamento superficial contribuiu para a ocorrência de horizontes superficiais menos espessos, que foram identificados nos setores de maior declividade da vertente, onde o fluxo d'água ganha velocidade e se torna mais erosivo, ocasionando no desprendimento e arraste de materiais. Essas condições explicam a ocorrência de um Neossolo Litólico na alta vertente e um Argissolo pouco espesso na média vertente, demonstrando o papel da morfogênese no rejuvenescimento dos solos. A dominância de processos geomórficos em encostas íngremes também foram identificados por Vanacker *et al.* (2019), que destacaram o papel da erosão na exposição de solos menos intemperizados em superfície.

Além da decapitação de horizontes, o escoamento hídrico superficial tem contribuído para o processo de elutriação, uma vez que foi identificada a arenização do horizonte A devido à remoção das frações finas ao longo de toda a vertente, conforme representado na **Figura 4**. No sopé da vertente, a ocorrência de um depósito de origem coluvial, associado ao Neossolo Quartzarênico, também reforça o papel dos fluxos superficiais no transporte de materiais.

Em subsuperfície, o gradiente topográfico contribui para a formação de fluxos laterais, que por sua vez, comandam as frentes de transformação dos horizontes pedológicos. A principal transformação ocorre entre a média e a baixa vertente, onde os fluxos laterais atuam na movimentação da argila e no desenvolvimento de uma zona de eluviação, que aumenta de espessura em direção ao sopé da vertente. Os mecanismos descritos

indicam a destruição remontante do horizonte Bt e o espessamento do horizonte E, representando a degradação lateral do Argissolo e o avanço do Neossolo Quartzarênico. A degradação remontante do horizonte iluvial também foi descrita em outras pesquisas realizadas no noroeste do Paraná, como em Nakashima (1999), que destaca a condição de desequilíbrio pedobioclimático e o papel da ação antrópica em contribuir para a instabilidade dos sistemas pedológicos.

A direção e velocidade dos fluxos também foram influenciados pelo manejo adotado na cana-de-açúcar. A utilização de maquinários pesados é a principal causa de compactação dos solos cultivados com cana, uma vez que as pressões estáticas e dinâmicas que atuam sobre os solos tendem a aproximar as partículas e reduzir o volume de poros, sobretudo quando este é manejado em condições de umidade acima de sua capacidade de campo (MAZURANA *et al.* 2017). Cherubin *et al.* (2016) apontam que a compactação em canaviais reduz significativamente a capacidade dos solos em desempenhar suas funções físicas, indicando que os solos estudados funcionaram com apenas 56% do seu potencial quando cultivado com cana.

A compactação e a alteração nas propriedades físicas e hídricas de solos cultivados com cana-de-açúcar foram relatadas em diversas pesquisas (HUNKE *et al.* 2015; MARCATTO *et al.* 2022; NOVAK *et al.* 2019) e ocorrem principalmente em subsuperfície, onde há o acúmulo da pressão e o solo não é revolvido nas operações de preparo (CHERUBIN *et al.* 2016; CAVALCANTI *et al.* 2019). Neste sentido, observou-se neste estudo que a permeabilidade e a formação do escoamento superficial foram fortemente influenciadas pela compactação dos horizontes e, conseqüentemente, impactaram nos processos pedogenéticos.

Nos Latossolos e Argissolos, a compactação no horizonte subsuperficial diminuiu a quantidade de água que infiltra verticalmente, possibilitando o desenvolvimento de fluxos laterais suspensos no topo dos horizontes adensados. Estes fluxos suspensos podem desencadear condições de hidromorfia temporária, que afeta o estado de oxidação do ferro e causa a sua mobilização. Nos Latossolos, a permanência de condições como essa por um longo período, corroborado pela dispersão da fração argila, pode contribuir para a instalação de processos e-iluviais, contribuindo para a sua transformação. A alteração da circulação hídrica em Latossolos do noroeste do Paraná foram documentadas por Cunha *et al.* (2008), atribuindo o resultado ao manejo agrícola dos solos, que interfere nos fluxos superficiais e subsuperficiais.

Nos Argissolos, a compactação subsuperficial alterou significativamente as propriedades hidráulicas do horizonte E, que naturalmente tende a apresentar a dominância de fluxos verticais rápidos, devido a sua textura arenosa e ausência de estrutura (CUNHA *et al.* 2008). Entretanto, os resultados dessa pesquisa apontaram para um horizonte E com reduzida capacidade de conduzir água e para a ocorrência de um gradiente hidráulico entre os horizontes A e E, que pode contribuir para a formação de fluxos laterais suspensos no topo do horizonte E. Em condições naturais, os fluxos suspensos tendem a se formarem no topo do horizonte Bt, devido ao gradiente hidráulico dos horizontes E e Bt, contribuindo para a remoção da argila do Bt e a sua transformação em E (NÓBREGA *et al.* 2023).

Ainda que a situação atual dos Argissolos corrobore para que os fluxos suspensos se instalem no topo do horizonte E, a presença de bandas onduladas neste horizonte sugere uma condição diferente no passado. Possivelmente havia um horizonte Bt, que em condições de hidromorfia temporária passou por eluviação, possibilitando a formação do horizonte E, que guarda as bandas argilosas como vestígio do processo. A presença de bandas onduladas como testemunhos da destruição de horizontes iluviais foram relatadas por Furquim *et al.* (2013) e Santos e Castro (2006).

4. Considerações finais

A topossequência Água do Leite é constituída por um sistema pedológico complexo, apresentando uma sequência de solos na vertente, de montante para jusante, formada por Latossolo, Argissolo, Neossolo Litólico, Argissolo e Neossolo Quartzarênico.

Os resultados indicaram que os fluxos hídricos, motores dos processos pedogenéticos, foram fortemente condicionados pelo relevo e pelo tipo de uso e manejo dos solos. Os Latossolos ocorrem associados a relevos mais suaves, no topo da vertente, onde domina a pedogênese. Entretanto, foi identificada a arenização do horizonte superficial, a ocorrência de argila predominantemente dispersa e a formação de horizontes subsuperficiais compactados, que tem contribuído para a ocorrência de fluxos laterais, em detrimento dos fluxos verticais, que são mais comuns nessa condição de relevo.

Nos setores que ocorrem os Argissolos Vermelhos, o aumento da declividade intensificou o escoamento superficial, ocasionando na decapitação parcial do horizonte A e na formação de um solo pouco desenvolvido, denominado de Neossolo Litólico. Em subsuperfície, a instalação de fluxos laterais comandou os processos de e-iluviação, resultando na transformação dos horizontes pedológicos e na gênese dos

Argissolos. A compactação dos horizontes subsuperficiais, ocasionada pelo manejo da cana-de-açúcar, intensificou o escoamento superficial e alterou as propriedades hidráulicas dos horizontes em profundidade, contribuindo para a formação de fluxos laterais.

O Neossolo Quartzarênico identificado no sopé da vertente tem a sua gênese ligada a ocorrência de material de origem coluvial, com uma sequência de camadas essencialmente arenosas, mas de cores distintas. Abaixo destas, ocorrem horizontes arenosos e homogêneos quanto a cor e textura, sugerindo a sua origem por processo e-iluviais. Os fluxos superficiais corroboraram para o transporte e deposição dos materiais de origem coluvial no sopé da encosta, enquanto os fluxos subsuperficiais atuaram na retirada da fração argila, restando somente os minerais primários mais resistentes (quartzo) em tamanho areia.

Referências

ABDEL-RAHMAN, M.A.R. **An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications**. *Rendiconti Lincei*, v. 34, 767–808, 2023.

BERTOLANI, F. C.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 4, p. 987–995, 2001.

BESSER, M.L.; BRUMATTI, M.; SPISILA, A.L. **Mapa Geológico e de recursos minerais do estado do Paraná**. Programa de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Curitiba: SGB-CPRM, 2021.

BOULET, R.; CHAUVEL, A.; HUMBEL, F. X.; LUCAS, Y. I - Analyse structurale et cartographie en pédologie: Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique: les études de toposéquences et leurs principaux apports à la connaissance des sols. **Cah O.R.S.T.O.M.**, v. XIX, n.4, p.309-321,1982.

BURKE, B. C.; HEIMSATH, A. M.; WHITE, A. F. Coupling chemical weathering with soil production across soil-mantled landscapes. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 32, p. 853–873, 2007.

CANISARES, L. P.; CHERUBIN, M. R.; DA SILVA, L. F. S.; FRANCO, A.L.C.; COOPER, M.; MOONEY, S.J.; CERRI, C.E.P. Soil microstructure alterations induced by land use change for sugarcane expansion in Brazil. **Soil Use and Management**, v. 36, n. 2, p. 189–199, 2020.

CARVALHO JÚNIOR, I. A.; FONTES, L. E. F.; COSTA, L. M. Modificações causadas pelo uso e a formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo Vermelho-escuro textura média, na região do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 3, p. 505–514, 1998.

CASTILHO, S. C. DE P.; COOPER, M.; DOMINGUEZ, A.; BEDANO, J.C. Effect of land use changes in eastern Amazonia on soil chemical, physical, and biological attributes. **Soil Science**, v. 181, n. 3–4, p. 133–147, 2016.

CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; DE LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M. R.; GOMES, I. F. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 189, n. February, p. 140–147, 2019.

CHADWICK, K. D.; ASNER, G. P. Tropical soil nutrient distributions determined by biotic and hillslope processes. **Biogeochemistry**, v. 127, n. 2–3, p. 273–289, 2016.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, n. 2016, p. 156–168, 2016.

CUNHA, J.E.; NÓBREGA, M.T.; CASTRO, S.S. Infiltração da água no solo no sistema pedológico campus do Arenito, Cidade Gaúcha, Noroeste do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, 2008.

DIDONÉ, E. J.; MINELLA, J. P. G.; TIECHER, T.; ZANELLA, R.; PRESTES, O. D.; EVRARD, O.

- Mobilization and transport of pesticides with runoff and suspended sediment during flooding events in an agricultural catchment of Southern Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 29, p. 39370–39386, 2021.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de Análise de Solo**. 3.ed. Brasília: EMBRAPA, 2017. 573 p.
- ELRICK, D.E.; REYNOLDS, W.D.; TAN, K.A. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 1, p. 184–193, 1989.
- EVANS, D. L.; QUINTON, J. N.; TYE, A. M.; RODÉS, A.; DAVIES, J.A.C.; MUDD, S.M.; QUINE, T.A. Arable soil formation and erosion: A hillslope-based cosmogenic nuclide study in the United Kingdom. **Soil Science Society of America Journal**, v. 5, n. 2, p. 253–263, 2019.
- FERNANDES, L.A. **Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia do Bauru (Ks, Brasil)**. 1998. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, Universidade de São Paulo, 1998.
- FRANCO, A. L. C.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P.; SIX, J.; WALL, D.H.; CERRI, C.C. Linking soil engineers , structural stability , and organic matter allocation to unravel soil carbon responses to land-use change. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 150, n. August, 2020.
- FIorentin, A.M.X.; MIRANDA, R.B.; VITTI, D.M.C.; SCARPINELLA, G.D.A.; MAUAD, F.F. Spatial distribution of areas susceptible to sheet erosion in computing environment. **Management of Environmental Quality**, v.28, n.3, 2017.
- FURQUIM, S. A. C.; COLTRINARI, L.; DIAS FERREIRA, R. P.; CASTRO, S.S; PUGLIESE, G.R. Lamellae formation processes in tropical soils in southeastern Brazil. **Catena**, v. 107, p. 15–25, 2013.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W. DA S.; DISERENS, E.; DE MARIA, I.C.; ARAUJO-JUNIOR, C.F.; FARHATE, C.V.V.; SOUZA, Z.M.D. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. **Science of the Total Environment**, v. 681, p. 424–434, 2019.
- HOLTHUSEN, D.; BRANDT, A. A.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. **Soil and Tillage Research**, v. 177, n. December 2017, p. 113–124, 2018.
- HUNKE, P.; ROLLER, R.; ZEILHOFER, P.; SCHRODER, B.; MUELLER, E.N. Soil changes under different land-uses in the Cerrado of Mato Grosso, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 4, p. 31–43, 2015.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017**. Sistema de Recuperação Automática (SIDRA). Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 8 abril 2024.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes>. Acesso em: 8 abril 2024.
- JAMES, L. A. Legacy sediment: Definitions and processes of episodically produced anthropogenic sediment. **Anthropocene**, v. 2, p. 16–26, 2013.
- KHORMALI, F.; AJAMI, M.; AYOUBI, S.; SRINIVASARAO, C.; WANI, S. P. Role of deforestation and hillslope position on soil quality attributes of loess-derived soils in Golestan province, Iran. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 134, n. 3–4, p. 178–189, 2009.
- KIM, H.; ANDERSON, S. H.; MOTAVALLI, P. P.; GANTZER, C.J. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. **Geoderma**, v. 160, n. 2, p. 244–251, 2010.
- MARCATTO, F.S.; SILVEIRA, H.; CRUZ, G.H.A.; FONTANA, A.C. A influência do uso da terra na

qualidade física de solos derivados de arenitos no Paraná: uma revisão. *In*: SERRA, E.; SILVEIRA, H.; NÓBREGA, M.T. **Noroeste paranaense: paisagem e desenvolvimento rural**. Maringá: PGE/UEM, 2022.

MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; JUNIOR, A. V. I.; CONTE, O.; BRESSANI, L.A.; MULLER, J. Soil susceptibility to compaction under use conditions in southern Brazil. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 41, n. 1, p. 60–71, 2017.

MEDEIROS, G. DE O. R.; GIAROLLA, A.; SAMPAIO, G.; MARINHO, M. DE A. Estimates of annual soil loss rates in the state of São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 40, p. 1–18, 2016.

NAKASHIMA, P. **Sistemas Pedológicos da região noroeste do estado do Paraná: distribuição e subsídios para o controle da erosão**. 1999. Tese (Doutorado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, 1999.

NÓBREGA, M. T. DE; SILVEIRA, H.; CUNHA, J. E. DA; BECKAUSER, M.C.; BONIFÁCIO, C.M.; BALDO, M.C. As voçorocas no Noroeste do Paraná: locais preferenciais de ocorrência na paisagem. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 00, 2023.

NÓBREGA, M.T.; SERRA, E.; SILVEIRA, H.; TERASSI, P.M.B.; BONIFÁCIO, C.M. Landscape structure in the Pirapó, Paranapanema 3 and 4 hydrographic unit, in the state of Paraná, Brazil. **Braz.J. Biol.**, v. 75, n.4, 2015.

NOVAK, E.; DE CARVALHO, L. A.; SANTIAGO, E. F.; TOMAZI, M. Changes in the soil structure and organic matter dynamics under different plant covers. **Cerne**, v. 25, n. 2, p. 230–239, 2019.

OLIVEIRA, J. G.; SANTOS, L. J. C.; CALEGARI, M. R. Soil-relief relation in alisol-arenosol pedological system in the northeast region of the state of Paraná: Case of amaporã. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 2, p. 661–675, 2020.

PRADO, R. D. M.; CENTURION, J. F. Alterações na cor e no grau de floculação de um Latossolo Vermelho-Escuro sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuaria**, v. 36, p. 197–203, 2001.

QUEIROZ NETO, J.P. Análise estrutural da cobertura pedológica no Brasil. *In*: MONIZ, A.C.; FURLANI, A.M.C.; FURLANI, P.R.; FREITAS, S.S. **A responsabilidade social da ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 415-429, 1988.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v. 2, 2003.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, 2008.

SANTOS, L. J. C.; DE CASTRO, S. S. Lamelas (Bandas Onduladas) em Argissolo Vermelho- Amarelo como indicadores da evolução do relevo: O caso das colinas médias do Platô de Bauru (Sp). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 1, p. 43–64, 2006.

SANTOS, D.; SOUZA, E.G.; NÓBREGA, L.H.P.; BAZZI, C.L.; GONÇALVES JUNIOR, A.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 843-848, 2012.

SANTOS, R.D.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L. J. C.; SHIMIZU, S.H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. Viçosa: SBCS, 2015.

SILVA, A. J. N. DA; CABEDA, M. S. V. Influência de diferentes sistemas de uso e manejo na coesão, resistência ao cisalhamento e óxidos de Fe, Si E Al em solo de tabuleiro costeiro de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 447–457, 2005.

VANACKER, V.; AMEIJERAS-MARIÑO, Y.; SCHOONEJANS, J.; CORNÉLIS, J.T.; MINELLA, J.P.G.;

LAMOULINE, F.; VERMEIRE, M.L.; CAMPFORTS, B.; ROBINET, J.; BROEK, M.V.; DELMELLE, P.; OPFERGELT, S. Land use impacts on soil erosion and rejuvenation in Southern Brazil. **Catena**, v. 178, 2017, p. 256–266, 2019.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S. DE. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. **Tópicos Ciência do Solo**, v. 4, p. 145–192, 2005.

VORONEY, P.R. The soil habitat. In: PAUL, E. **Soil microbiology, ecology and biochemistry**. 3ed. Academic Press: EUA, p. 25-49, 2007.

WYSOCKI, D.A.; SCHOENEBERGER, P.J.; LAGARRY, H.E. Soil surveys: a window to the surface. **Geoderma**, v. 126, n.2, p. 167-180, 2005.



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