

Simulação física de escoamentos superficiais com concentração de pedosedimentos entre 6 e 8%

Physical simulation of overland flow with pedosediment concentration between 6 and 8%

Julio Cesar Paisani¹; Antonio Carlos de Barros Côrrea²; Rafael Manica³; Flávia Jorge de Lima⁴; Gustavo Gallardo Aere⁵; Matheus Vinícius dos Santos⁶; Josielle Samara Pereira⁷

¹ Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Núcleo de Estudos PaleoAmbientais (NEPA), Francisco Beltrão/PR, Brasil. Email: juliopaisani@hotmail.com; julio.paisani@unioeste.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8911-6477>

² Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Ciências Geográficas (DCG), Recife/PE, Brasil. Email: dbiase2001@terra.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9578-7501>

³ Universidade Federal de Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Porto Alegre/RS, Brasil. Email: manica@iph.ufrgs.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0527-1374>

⁴ Universidade Federal de Alagoas, Campus Sertão, Delmiro Gouveia/AL, Brasil. Email: flavia.lima@delmiro.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4176-5854>

⁵ Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Núcleo de Estudos PaleoAmbientais (NEPA), Francisco Beltrão/PR, Brasil. Email: gustavogallardoaere@outlook.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4924-3256>

⁶ Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Núcleo de Estudos PaleoAmbientais (NEPA), Francisco Beltrão/PR, Brasil. Email: matheusvini.geo@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3031-7925>

⁷ Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Núcleo de Estudos PaleoAmbientais (NEPA), Francisco Beltrão/PR, Brasil. Email: josy.samara@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4309-1833>

Resumo: Com base em resultados prévios de experimentação física em laboratório o objetivo desse trabalho foi verificar se simulações do escoamento superficial com concentrações de pedosedimentos de 6 a 8 % geram depósitos semelhantes a fluxos de menor (~ 3 %) ou de maior (>14 %) concentração relativa. Duas repetições de fluxos exibiram concentrações nesses intervalos e foram analisadas suas velocidades médias, números de Froude e Reynolds, e seus depósitos. Predominou regime de fluxo supercrítico-turbulento entre as condições iniciais e sua chegada no plano de sedimentação, passando paulatinamente a subcrítico-laminar até minguar. Estruturas de superfície dos depósitos são semelhantes quanto à disposição, mas diferiram quanto a largura, preservação da acreção vertical e desenvolvimento de marcas de sulcos; bem como em relação a microestratigrafia de leito, sobretudo pela espessura, organização e o número de laminações. O fato de os depósitos serem formados por mais de uma laminação mostra os efeitos da cauda/corpo do fluxo em resedimentar os materiais previamente depositados pela cabeça do fluxo. Estruturas de superfície e microestratigrafia de leito coincidem com aquelas encontradas tanto em depósitos de fluxos de menor e de maior concentração relativa, acarretando que as concentrações de sedimentos dos fluxos analisados expressam o contínuo entre fluxos de baixa densidade e fluxos transitórios entre baixa e alta densidades.

Palavras-chave: Escoamento superficial; Pedosedimentos; Microestratigrafia.

Abstract: Based on previous results of physical experimentation in the laboratory, the objective of this work was to verify whether overland flow simulations with sediment concentrations of 6 to 8% generate deposits similar to lower (~3%) or higher (>14%) flows relative. Two replications of flows exhibited concentrations in these ranges and their mean velocities, Froude and Reynolds numbers, and their deposits were analyzed. A supercritical-turbulent flow regime prevailed between the initial conditions and its arrival in the sedimentation plane, gradually changing to subcritical-laminar flow until it waned. Surface structures of the deposits are similar in layout, but differ in width, preservation of vertical accretion and development of groove marks; as well as in relation to bed microstratigraphy, mainly due to the thickness, organization and number of laminations. The fact that the deposits are formed by more than one lamination shows the effects of the tail/body of the flow in re-settling the materials previously deposited by the head of the flow. Surface structures and bed microstratigraphy coincide with those found in both lower and higher relative concentration flow deposits, meaning that the sediment concentrations of the analyzed flows express the continuum between low density flows and transitional flows between low and high densities.

Keywords: Overland flow; Pedosediments; Microstratigraphy.

Recebido: 08/04/2023; Aceito: 14/09/2023; Publicado: 05/10/2023.

1. Introdução

O escoamento superficial, também designado de *wash, sheet flow, sheetwash, waterflow, runoff, surface runoff*, é um processo geomórfico importante na morfodinâmica das paisagens, especialmente no semiárido brasileiro, cujo regime de chuvas associado a uma cobertura vegetal pouco densa contribui para o desenvolvimento do escoamento difuso não canalizado (FONSECA *et al.*, 2017). Com o avanço do uso das terras para produção de alimentos e a progressiva perda de solo pelo manejo inadequado, as respostas da paisagem ao escoamento superficial têm recebido atenção nas últimas décadas, sobretudo na tentativa de mitigar efeitos da erosão por cultivos (*tillage erosion*). Contudo, ainda pouco se sabe a respeito dos processos e produtos da sedimentação do escoamento superficial, o que leva alguns geocientistas a classificar seus depósitos enquanto “alúvios de encosta” (*slope alluvium*) (MILLER; JULLIERET, 2020). Essa interpretação pressupõe que o escoamento superficial gera fluxos com comportamento dinâmico similar ao comportamento da água canalizada (p.ex. dinâmica fluvial), cujas propriedades seguem o modelo reológico Newtoniano em que o fluxo tem baixa concentração de sedimentos e a gravidade interfere diretamente sobre a água, que por sua vez, interfere na sedimentação (BENVENUTI; MARTINI, 2002).

Registros estratigráficos arenosos em encostas e adjacências são interpretados como decorrentes do escoamento superficial em sequências quaternárias de área temperadas a subtropicais, com diferentes regimes pluviométricos e seguem essa concepção de forma intrínseca (BERTRAND *et al.*, 1995; BLIKRA; NEMEC, 1998; NEMEC; KAZANCI, 1999; OLIVEIRA *et al.*, 2001; 2008; VENTRA *et al.*, 2013). No Nordeste do Brasil, em ambientes climaticamente transicionais entre o semiárido e o sub-úmido depósitos sobre rampas pedimentares da Serra da Baixa Verde, Pernambuco, apresentam características claras de retrabalhamento de colúvios derivados de fluxos gravitacionais mais antigos da média e alta encosta, sugerindo o acúmulo de vários episódios de fluxo decorrentes da erosão laminar (CORREA; MONTEIRO, 2020). Devido à sua cronologia histórica e preservação parcial das organização laminada-paralela, esses materiais foram interpretados como decorrentes da ação do escoamento superficial sob condições de erradicação da cobertura vegetal e exposição do solo nú em tempos históricos pós-ocupação colonial da área.

Atribuir exclusivamente ao modelo reológico Newtoniano enquanto processo de sedimentação do escoamento superficial pressupõe que esse tipo de escoamento sempre se comporta como fluxo de baixa concentração de sedimentos (*low-density flow*). Na realidade a concentração de sedimentos altera o comportamento dinâmico do fluxo, e certa quantidade de sedimentos implica no fato da gravidade atuar diretamente sobre o sedimento, promovendo comportamento dinâmico e reológico diferente do modelo newtoniano, resultando em fluxos tipo não-newtonianos ou simplesmente fluxos de alta densidade (*high-density flows*). Além disso, há situações em que o comportamento dinâmico é transicional entre baixa e alta densidade (*transitional high to low density flows*) (DASGUPTA, 2003). Na literatura não há consenso quanto aos valores de concentração de sedimentos que determinem o enquadramento dos fluxos enquanto baixa, transicional e alta densidades (SHANMUGAM, 1996). Valores absolutos para o limite de tipos de fluxo de baixa e alta densidade são difíceis de estabelecer porque dependem da distribuição de tamanho de grão, teor de argila e variáveis reológicas (PIERSON; COSTA 1987; SHANMUGAM, 1996; MANICA, 2012). Considerando que a experimentação em laboratório é uma ferramenta útil para se compreender os processos e produtos da sedimentação sob condições controladas (BENNET *et al.*, 2015), procurou-se estabelecer a experimentação em laboratório para caracterizar diferentes concentrações de fluxos com propriedades afins ao escoamento superficial, com vistas a compreender a relação entre concentração de sedimentos e fábricas/estruturas sedimentares resultantes. Até o momento foram gerados fluídos com fração sólida de pedosedimentos (agregados de solo e outros constituintes pedológicos granulares - PAISANI *et al.*, 2023a, b) em concentrações volumétricas baixas ($C_v \sim 3\%$) e transicional a alta ($C_v 14-25\%$), que implicam em fluxos nas categorias de baixa, transicional e alta densidades para fluídos constituídos de pedosedimentos. Contudo, ainda resta dúvida se fluxos com concentrações intermediárias (entre 3 à 14%) a estes referidos percentuais geram depósitos semelhantes a fluxos de baixa ou transicional a alta densidade. É justamente responder a essa questão a que se propõe o presente trabalho.

2. Métodos

Para a geração de fluxos com diferentes concentrações de pedosedimentos foi utilizada a estação experimental em laboratório do Núcleo de Estudos PaleoAmbientais da Unioeste (NEPA), que simula uma encosta retilínea seguida de

quebra de declividade para criar uma zona de acumulação de sedimentos. O local de quebra se assemelha a uma mudança de morfologia como a passagem da base de encosta para o fundo de cabeceiras de drenagem (*hollow*), fundos de vales de baixa ordem ($< 4^{\text{a}}$ ordem hierárquica na classificação de STRAHLER, 1952) ou rampas de pedimentos. O experimento é composto de três partes independentes: a) cilindro de armazenamento/liberação de água; b) rampa (*unchanneled flume*) de deslocamento de fluxo simulando encosta retilínea; e c) plano de sedimentação simulando área de acomodação de sedimentos (Figura 1).

A rampa foi ajustada para a inclinação de 23° , enquanto o plano de sedimentação teve inclinação regulada em 4° . Sobre ambas foram instaladas régua medidoras (acurácia de 1 mm e espaçadas em 12 cm) fixadas em moldura perpendicular à direção dos fluxos para determinar as respectivas profundidades com base em Ali *et al.* (2011) (Figura 1). O método experimental aplicado neste estudo não propõe um modelo em escala com semelhança dinâmica direta com os depósitos naturais, mas sim propor uma aproximação empiricamente controlada aos contextos de campo mais comuns para a ocorrência do escoamento superficial (PAOLA *et al.*, 2009). A afinidade com o contexto de campo se deve principalmente: (a) a pedosedimentos previamente destacados do solo e disponíveis para transporte pelo escoamento superficial em encostas - constituinte dominante no fluido no escoamento superficial (ALBERTS *et al.*, 1980; LIU *et al.*, 2020); (b) o tamanho e a composição dos pedosedimentos; (c) aos escoamentos não confinados que misturam água e sedimentos na encosta; e (d) a topografia marcada por uma quebra de gradiente entre o setor de transporte (encosta) e o setor de sedimentação (área de acomodação).

Diante disso, a fração sólida dos fluxos utilizada no experimento é constituída por pedosedimentos naturais originados de horizontes Bi e BC de Cambissolos e Neossolos litólicos expostos à superfície, que se depositaram em sopé de encosta na forma de colúvio de agregados de solo. Os pedosedimentos do depósito coluvial tiveram os tamanhos individualizados por peneiramento nas frações areia muito fina a seixo fino (escala de WENTWORTH, 1922). Esses sedimentos foram despejados no centro da rampa em proporções de 0,167 a 212 kg de massa seca (Figura 1). A mistura de água e sedimentos foi espontânea a partir da liberação do volume de água contido no cilindro, que variou de 250 a 300 ml. A concentração volumétrica (C_v %) de sedimentos/sólidos dos fluídos foi determinada a partir de coletores retangulares (0,16 x 0,13 x 0,13 m) instalados no início do plano de sedimentação (Figura 1), e considerando 998 e 2180 kg.m^{-3} como densidade média da água e dos sedimentos, respectivamente. Enfim, foram geradas quatorze repetições, das quais apenas duas (códigos R13 e R14) atingiram as concentrações desejadas (C_v 3% > intermediário < 14 %), enquanto as demais tiveram $C_v > 14\%$.

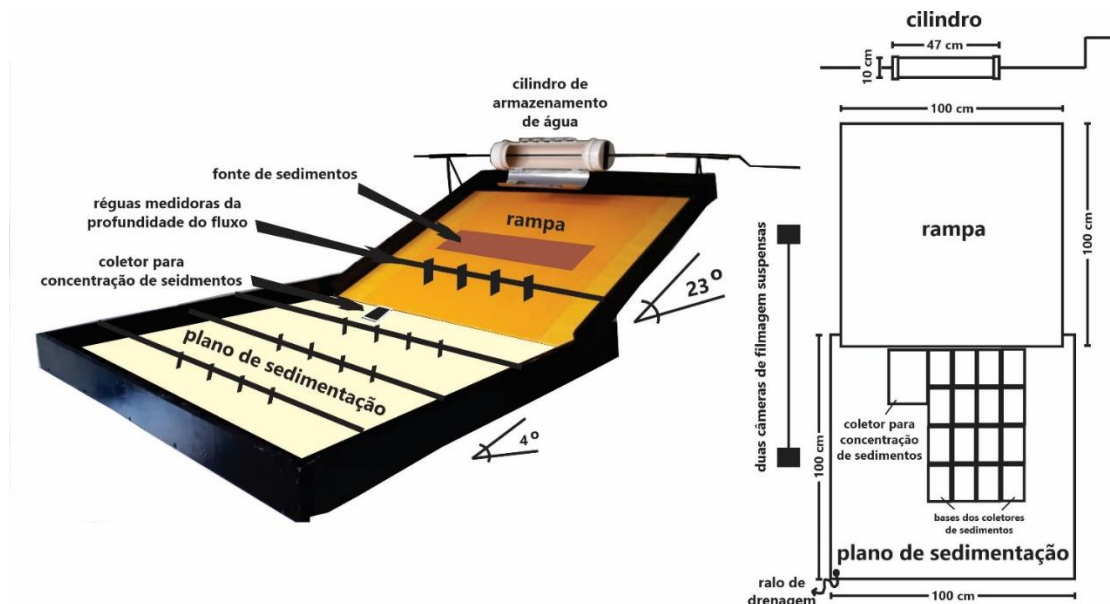


Figura 1 – Estação experimental em laboratório do Núcleo de Estudos PaleoAmbientais da Unioeste (NEPA).

Fonte: Autores (2023).

A velocidade média de cada fluxo foi mensurada mediante filmagem, tanto na rampa quanto no plano de sedimentação, pela extração do deslocamento do fluxo por unidade de tempo (V_m m.s⁻¹). Diante das modificações na V_m de cada fluxo ao se deslocar pelo plano de sedimentação, fracionou-se a V_m entre três estágios: fluxo de chegada, fluxo intermediário e fluxo minguante. Na sequência foram determinados parâmetros médios dos números de Froude (Fr) e número de Reynolds (Re).

Equação 1 números de Froude (Fr)

$$Fr = V_m / \sqrt{g \cdot h}$$

Em que, Fr é o número de Froude, V_m é a velocidade média do fluxo, g é a força da gravidade e h é a profundidade média do fluxo.

Equação 2 números de Reynolds (Re)

$$Re = V_m \cdot h / \nu$$

Em que, Re é o número de Reynolds, V_m é a velocidade média do fluxo, h é a profundidade média do fluxo e ν é a viscosidade cinemática da água. Os parâmetros hidráulicos levantados foram comparados com parâmetros similares aos obtidos para os fluxos de baixa (~ 3%) e de transicional a alta (> 14%) concentração volumétrica relativa (PAISANI *et al.*, 2023a, in press). As duas repetições (R13 e R14) que atingiram as concentrações intermediárias desejadas tiveram seus sedimentos coletados e impregnados (mistura de resina epóxi, acetona e secante à base de amina) a vácuo (15 mm Hg), secos (estufa 32° e ao ar livre até a cura) e fatiados paralelamente e transversalmente à direção de fluxo. Os blocos foram processados no LabMulti de Laminação do NEPA, onde procedeu-se a reimpregnação (obliteração de imperfeições), colagem em vidros e confecção de lâminas delgadas de cada direção de fluxo nas dimensões de 7,2 x 2,5 cm até a espessura aproximada de 30 μ m. As lâminas delgadas foram analisadas no LabMulti de Microscopia Ótica do NEPA com uso de microscópio petrográfico Leica DM 2500 P com objetiva de 1.25x e captura de imagem usando câmera Leica EC 3 e software Leica Application Suite (LAS EZ) versão 1.4. A partir deste procedimento foram individualizadas laminações e se reconheceu os seguintes atributos: espessura média (mm), limite superior, textura, composição, arredondamento-esfericidade, seleção e fábrica. Para determinar o limite superior, textura, arredondamento-esfericidade e seleção, utilizou-se dos diagramas de Campbell (1967), Powers (1953) e Harrel (1983), respectivamente. Os percentuais de tamanho de grão se basearam no diagrama de Fitzpatrick (1980) e a classe textural no diagrama de conglomerados (NICHOLS, 1999).

3. Resultados e discussão

3.1 Parâmetros e índices hidráulicos

Dada as condições espontâneas de mistura de água-sedimentos, à C_v dos fluxos R14 e R13 ficaram no intervalo de 6,19 a 8,76 %, respectivamente, dentro da amplitude de fluxos maiores que 3% e menores que 14%, como já mencionado. A V_m dos fluxos com $C_v \sim 3\%$ e $C_v > 14\%$ mensuradas nas condições iniciais (rampa) variaram de 1,71 a 14,66 m.s⁻¹, sendo que fluxos com $C_v \sim 3\%$ tiveram V_m relativamente maiores que fluxos com $C_v > 14\%$ (Figura 2). Os fluxos da R13 e R14 tiveram velocidades intermediárias de 0,66 a 1,08 m.s⁻¹, respectivamente. Percebe-se que a V_m tem correlação inversa com a concentração de sedimentos decrescendo proporcionalmente com o aumento na concentração, o que por sua vez implica no aumento da viscosidade do fluxo (Figura 2), como esperado. A V_m dos fluxos decresceu significativamente da passagem da rampa para o plano de sedimentação, sobretudo para fluxos com concentrações menores que 6,19 % (R14) e decresceu paulatinamente para os demais fluxos com concentração maior (Figura 2). A elevada V_m dos fluxos nas condições iniciais é superior à obtida em experimentos com inclinação de calha menor que a desta contribuição, tanto em condições de laboratório quanto de campo (ABRAHAMS *et al.*, 1986; ALI *et al.*, 2011; GUO *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2020). Tal fato se deve à elevada inclinação da rampa (23°). Por sua vez, a elevada V_m inicial dos fluxos acarretaram valores expressivos dos números de Froude e Reynolds (Figura 2).

O número de Froude, que relaciona a velocidade média dos fluxos com a força da gravidade e sua profundidade média, ficou majoritariamente acima do valor de 1 para as condições iniciais (rampa), indicando um comportamento supercrítico (escoamento rápido). Fluxos com concentrações de sedimentos $\leq 8,76\%$ (R13) tiveram valores maiores, entre 6 e 10, enquanto para fluxos com concentrações relativamente maiores os valores do número de Froude foram menores (Figura 2). O número de Froude dos fluxos junto ao plano de sedimentação é relativamente menor que nas condições iniciais, se tornando menor que 1 à medida que os fluxos perdem aceleração no plano sedimentação. Neste caso, o escoamento torna-se subcrítico, tendo passado por um ressalto hidráulico entre os diferentes estágios do fluxo no plano de sedimentação. O súbito aumento do número de Froude foi detectado no estágio intermediário do fluxo para alguns fluxos com $C_v > 14\%$ (Figura 2). Supostamente isso se deve ao aumento da profundidade do fluxo com onda de cavalgamento da cauda e do corpo do fluxo sobre a sua cabeça. Tal situação poderia resultar da quebra de ondas de rolo como postulam modelos matemáticos de fluxos unidirecionais (CARTIGNY *et al.*, 2014), porém para as condições físicas do experimento ora relatado, pode-se dizer que ocorreu um aumento da profundidade do fluxo, e respectiva elevação no número de Froude, por conta da onda de cavalgamento (PAISANI *et al.*, 2023a), como observado pela sequência de imagens capturadas da R13 (Figura 4). Em geral, predominou regime de fluxo supercrítico ($Fr > 1$) entre as condições iniciais e sua chegada no plano de sedimentação, passando paulatinamente a subcrítico ($Fr < 1$) até minguar; cujo deslocamento do fluxo no plano de sedimentação foi marcado por um ressalto hidráulico.

O número de Reynolds variou de 11568 a 2243 para as condições iniciais (rampa) se tornando menor nos diferentes estágios de fluxo do plano de sedimentação até o mínimo de 30 no estágio de fluxo minguante (Figura 2). Para as condições iniciais e a chegada dos fluxos ao plano de sedimentação predominaram números de Reynolds superiores a 2000, enquanto a partir do estágio de fluxo intermediário os valores resultaram entre 4000 à 52 (Figura 2), não havendo uma correlação do número de Reynolds com as C_v iniciais. Enfim, um número de Reynolds (Re) > 2000 indica fluxo turbulento, enquanto o intervalo $500 < Re < 2000$ caracteriza uma zona de transição em que o fluxo é ora laminar ora turbulento e um $Re < 500$ indica um fluxo laminar.

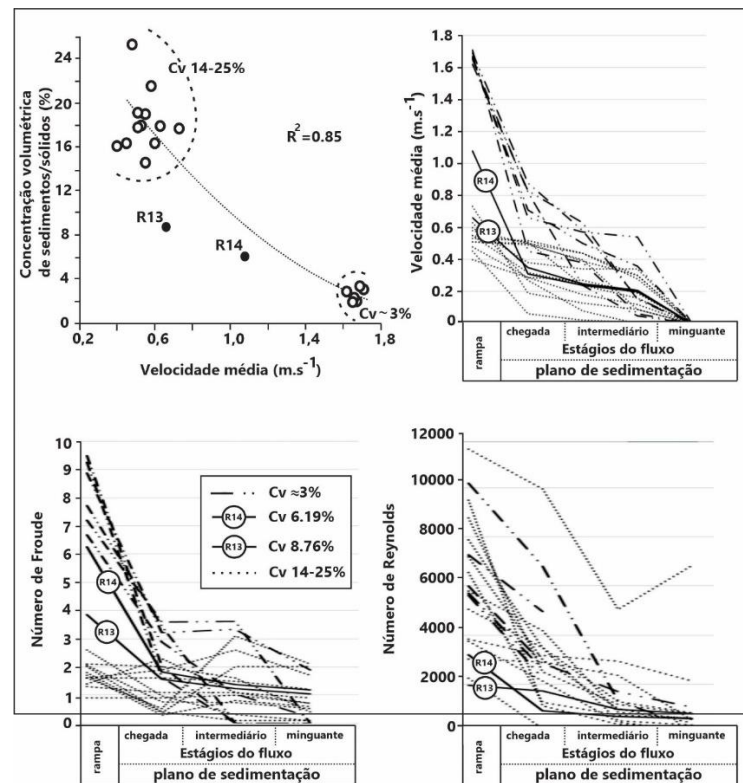


Figura 2 – Parâmetros e índices hidráulicos extraídos de fluxos com diferentes concentrações volumétricas de pedosedimentos obtidos em estação experimental de simulação de escoamento superficial.

Fonte: Autores (2023).

3.2 Estrutura de superfície e Microestratigrafia de leito

Os depósitos de sedimentos resultantes de fluxos gerados na estação experimental permitem analisar a estrutura de superfície e a microestratigrafia de leito. Assim, aqueles resultantes dos fluxos R13 (C_v 8,76) e R14 (6,19%) foram analisadas por meio de imagens das filmagens e seções delgadas, respectivamente.

Os fluxos R13 e R14 geraram depósitos com estruturas de superfície semelhantes quanto à disposição alongada, diques marginais, acreção vertical e marcas de lavagem (*scour marks*), mas diferiram quanto a largura dos depósitos, preservação da acreção vertical e desenvolvimento de marcas de sulcos (*rill marks*) (Figura 3). A acreção vertical, a disposição alongada e os diques marginais são estruturas de superfície encontradas na experimentação em fluxos de $C_v > 14\%$, enquanto as marcas de lavagem e marcas de sulco são estruturas de superfície encontradas na experimentação em fluxos de $C_v \sim 3\%$ (PAISANI *et al.*, 2023a, in press). Analisando as filmagens dos fluxos responsáveis pelos depósitos dos fluídos R13 e R14, observou-se que as marcas de lavagem e marcas de sulcos foram geradas pelo cavalcamento da cauda e corpo do fluxo sobre sua cabeça (Figura 4). Supostamente tal processo ocorre diante da maior desaceleração relativa da cabeça devido ao seu maior conteúdo de sedimentos (PAISANI *et al.*, 2023a). Esse cavalcamento não promoveu aumento significativo na profundidade do fluxo, pois não alterou a tendência decrescente do número de Froude (Figura 2), como sugerido para alguns fluxos com $C_v > 14\%$.

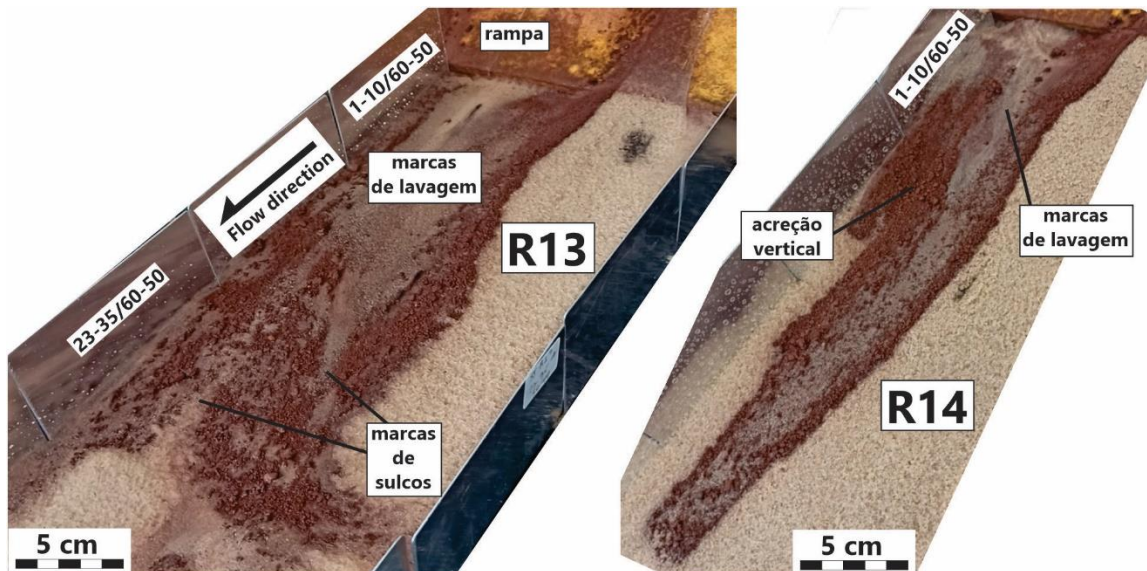


Figura 3 – Estrutura de superfície dos depósitos dos fluxos R13 (C_v 8,76 %) e R14 (C_v 6,19 %).

Fonte: Autores (2023).

Os depósitos da R13 e R14 são distintos, sobretudo pela espessura, organização e o número das laminações (Figura 5, Tabela 1). O depósito R13 ($C_v = 8,76\%$) tem laminações delgadas (1,58 a 1,63 mm de espessura), predominantemente com limites superficiais contínuos-ondulados-não paralelos, textura areia, tamanho de grão máximo areia muito grossa, com composição de mistura de pedosedimentos com quartzo/arcosiano do plano de sedimentação, pobre seleção e fábrica maciça a inversa com escape de fluídos intersticiais (ar ou água). Ao passo que o depósito da R14 ($C_v = 6,19\%$) exhibe depressão erosiva de morfologia côncava assimétrica, na qual as laminações são mais espessas e passam a delgadas lateralmente. O limite superficial das laminações é predominantemente contínuo-ondulado-não paralelo, textura entre areia a cascalho fino com composição de mistura de pedosedimentos com quartzo/arcosiano do plano de sedimentação, pobre a moderada seleção e fábrica maciça a inversa e inclinada, com escape de fluídos intersticiais (ar ou água); com corte e preenchimento onde ocorre a depressão erosiva.

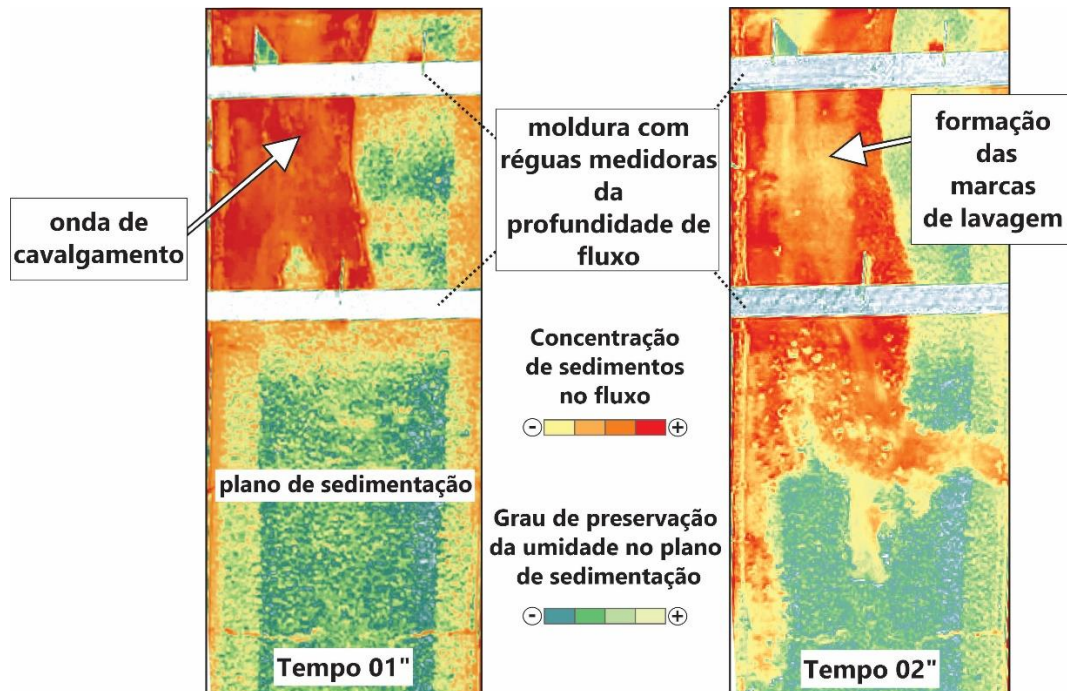


Figura 4 – Sequência de imagens capturadas por filmagem do fluxo R13 (C_v 8,76 %), cuja classificação digital permite observar marca de lavagem iniciando sua formação após o cavalgamento da cauda e do corpo do fluxo sobre sua cabeça.

Fonte: Autores (2023).

As seções delgadas transversais aos depósitos dos fluxos R13 e R14 revelaram uma sequência de cristas e cavidades, com ocorrência de estrutura de superfície tipo marcas de desgaste na R14 (Figura 5). As seções delgadas longitudinais estabelecidas no setor marcas de lavagem do depósito da R13 exibem sedimentos com difícil individualização de laminações devido à homogeneidade na mistura de pedosedimentos com quartzo/arcosiano do plano de sedimentação, aqui distinguidas em apenas duas, com organizações internas e externas semelhantes (Figura 5, Tabela 1). Já no depósito da R14 foi possível individualizar laminações, se distinguindo do depósito da R13 principalmente pelo predomínio da textura areia e fábrica exclusivamente maciça.

Analisando as seções delgadas longitudinais e transversais aos depósitos, bem como as longitudinais estabelecidas no setor de marcas de lavagem, alguns aspectos se destacam. O fato dos depósitos serem formados por mais de uma laminação mostra os efeitos da cauda/corpo do fluxo em resedimentar os materiais previamente depositados pela cabeça do fluxo. Isso se assemelha ao verificado sobretudo em fluxos de maior concentração volumétrica relativa que tiveram desaceleração gradual (C_v 14-25%), mas no presente contexto expressa a maior diluição da cauda/corpo dos fluxos. Não foram identificadas microestruturas tipo galáxia (*galaxy*) comuns a fluxos de maior concentração volumétrica relativa (C_v 14-25%). A organização externa descontínua ou contínua, ondulada e não paralela é comum tanto aos depósitos de fluxos de baixa ($C_v \sim 3\%$) e de transicional a alta ($C_v > 14\%$) concentração volumétrica relativa de pedosedimentos. Ela pode expressar os limites laterais da sedimentação da cabeça dos fluxos ou corte seguido pelo preenchimento decorrente da resedimentação da cauda/corpo dos fluxos. A mistura de pedosedimentos com sedimentos quartzo/arcosiano do plano de sedimentação denota fricção/cisalhamento entre o fluxo e o leito arenoso, comum em fluxos turbulentos. A turbulência do fluxo foi suficiente para gerar depressão erosiva no início do plano de sedimentação, fenômeno detectado apenas no depósito do fluxo R14 (C_v 8,76 %). As seções delgadas transversais aos depósitos dos fluxos R13 e R14 revelaram uma sequência de cristas e cavidades, comum em depósitos de fluxos de baixa ($C_v \sim 3\%$) concentração volumétrica relativa de pedosedimentos, e são interpretadas enquanto estruturas de superfície tipo lineações de partição (*parting lineations*).

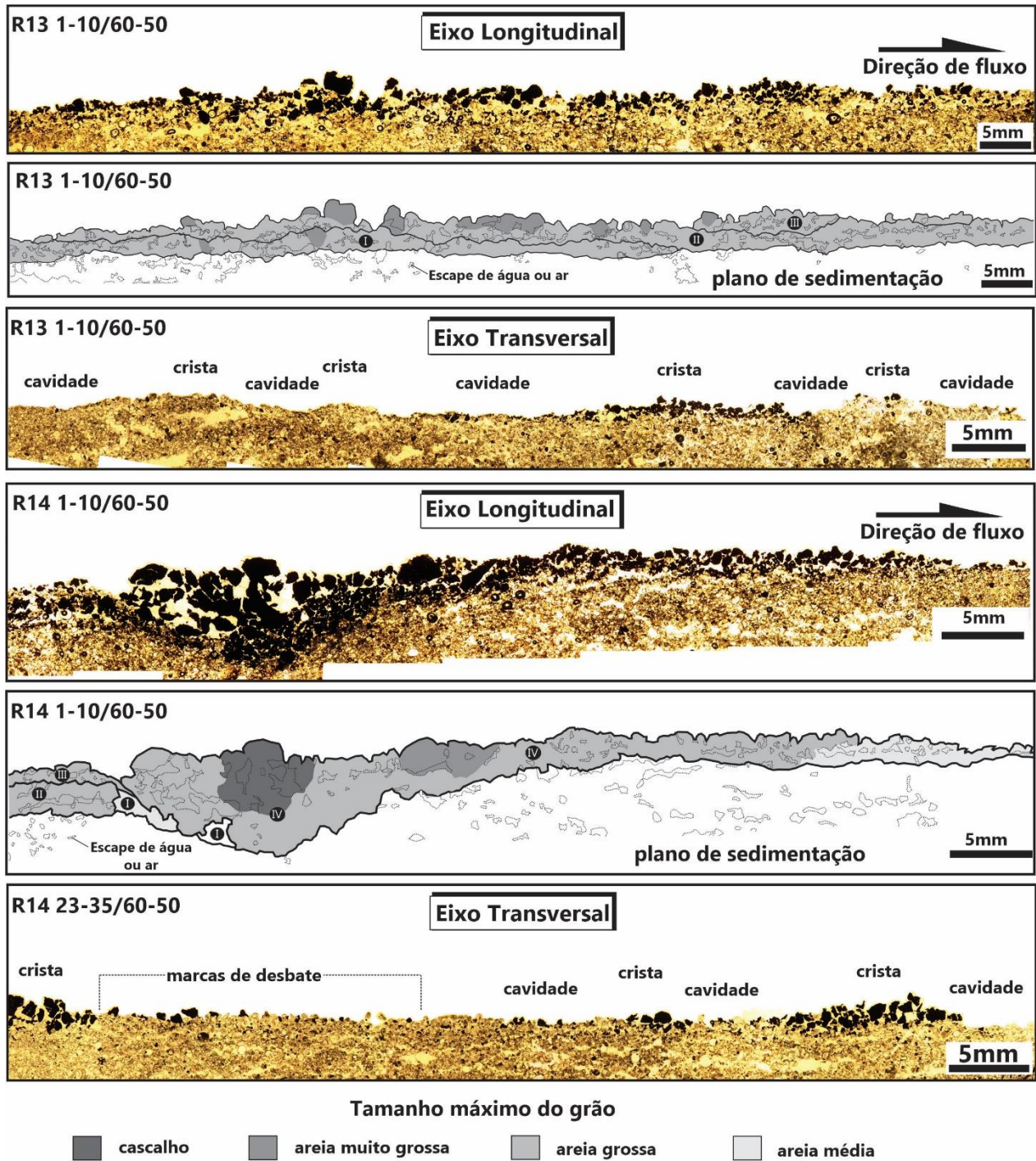


Figura 5 – Imagens e esboços com a microestratigrafia dos depósitos dos fluxos da R13 e R14 no plano de sedimentação.

Fonte: Autores (2023).

Tabela 1 – Descrição da microstratigrafia dos depósitos dos fluxos R13 e R14 – Seções longitudinais.

| Cl ¹ | Em ² (mm) | Organização externa | Organização interna | | |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|--|----------------------|--|
| | | Limite superior ³ | Textura ⁴ , composição, esfericidade-arredondamento ⁵ | Seleção ⁶ | Fábrica |
| R13 | | | | | |
| 1-10/60-50 | | | | | |
| III | 1,58 | contínuo, ondulado, não paralelo | areia, mistura pedosetimentos com quartzo/arcosiano, muito angular a subarredondado, baixa à alta esfericidade | mal selecionado | maciça à gradação inversa, fluído intersticial (ar ou água) |
| II | 1,65 | contínuo, ondulado, não paralelo | areia, mistura pedosetimentos com quartzo/arcosiano, muito angular a subarredondado, baixa à alta esfericidade | mal selecionado | maciça à gradação inversa, fluído intersticial (ar ou água) |
| I | 1,63 | descontínuo, ondulado, não paralelo | areia, mistura pedosetimentos com quartzo/arcosiano, muito angular a subarredondado, baixa à alta esfericidade | mal selecionado | maciça à gradação inversa, fluído intersticial (ar ou água) |
| Setor marcas de lavagem - 12-23/60-50 | | | | | |
| II | 5,83 | descontínuo, ondulado, não paralelo | areia cascalhenta, mistura pedosetimentos com quartzo/arcosiano, muito angular a subarredondado, baixa à alta esfericidade | mal selecionado | maciça à gradação inversa, fluído intersticial (ar ou água) |
| I | 3,55 | descontínuo, ondulado, não paralelo | areia cascalhenta, mistura pedosetimentos com quartzo/arcosiano, muito angular a subarredondado, baixa à alta esfericidade | mal selecionado | maciça |
| R14 | | | | | |
| 1-10/60-50 | | | | | |
| IV | 4,20 | contínuo, ondulado, não paralelo | areia cascalhenta, mistura pedosetimentos com quartzo/arcosiano, muito angular a subarredondado, baixa à alta esfericidade | mal selecionado | corte e preenchimento com maciça à gradação inversa e lateralmente inclinada, fluído intersticial (ar ou água) |
| III | 1,00 | contínuo, ondulado, não paralelo | areia, mistura pedosetimentos com quartzo/arcosiano, muito angular a subarredondado, baixa à alta esfericidade | mal selecionado | maciça à gradação inversa e lateralmente inclinada, fluído intersticial (ar ou água) |
| II | 2,00 | descontínuo, ondulado, não paralelo | areia cascalhenta, mistura pedosetimentos com quartzo/arcosiano, muito | mal selecionado | maciça à gradação inversa, fluído intersticial (ar ou água) |

| | | | | | |
|---------------------------------------|------|-------------------------------------|--|---------------------------|---|
| | | | angular a subarredondado, baixa à alta esfericidade | | |
| I | 0,70 | descontínuo, ondulado, não paralelo | areia, mistura pedosetimentos com quartzo/arcosiano, muito angular a subarredondado, baixa à alta esfericidade | moderadamente selecionado | maciça à gradação inversa, fluído intersticial (ar ou água) |
| Setor marcas de lavagem - 23-35/60-50 | | | | | |
| III | 1,50 | descontínuo, ondulado, não paralelo | areia cascalhenta, mistura pedosetimentos com quartzo/arcosiano, muito angular a subarredondado, baixa à alta esfericidade | mal selecionado | maciça |
| II | 1,30 | descontínuo, ondulado, não paralelo | areia, mistura quartzo/arcosiano com pedosetimentos, muito angular a subarredondado, baixa a alta esfericidade | mal selecionado | maciça |
| I | 1,15 | descontínuo, ondulado, não paralelo | areia, mistura quartzo/arcosiano com pedosetimentos, muito angular a subarredondado, baixa a alta esfericidade | moderadamente selecionado | maciça |

¹Cl: Código das laminações

²Em: Espessura média

Baseado em ³Campbell (1967), ⁵Power (1953), ⁶Harrel (1983).

⁴Diagrama ternário para conglomerados (NICHOLS, 1999).

Fonte: Autores (2023).

A mistura de sedimentos e a morfologia de leito tipo depressão erosiva também foram geradas em fluxos com baixa concentrações volumétricas baixa ($C_v \sim 3\%$) de pedosedimentos. A organização interna de moderada a pobremente selecionada, bem como a fábrica maciça, a inversa também foi encontrada em depósitos de fluxos de baixa ($C_v \sim 3\%$) e de transicional a alta ($C_v > 14\%$) concentração volumétrica relativa de pedosedimentos. Por outro lado, em depósitos com baixa concentrações volumétricas de pedosedimentos ($C_v \sim 3\%$), as fábricas maciça e inversa ocorrem associadas a microlaminações difusas do tipo cruzada e dobrada, enquanto a fábrica inversa inclinada do fluxo R14 também foi detectada nos depósitos de transicional a alta ($> 14\%$) concentração volumétrica relativa de pedosedimentos. O escape de fluídos (ar e água) é comum aos depósitos dos fluxos R13 ($C_v 6,19\%$) e R14 ($C_v 8,76\%$), bem como aos depósitos dos fluxos de baixa ($\sim 3\%$) e de transicional a alta ($> 14\%$) concentração volumétrica relativa de pedosedimentos. O escape de fluídos nas laminações sugere que a fluidização foi um dos mecanismos de suporte dos pedosedimentos durante a deposição (LOWE, 1976), embora pressões dispersivas entre os grãos possa ser o mecanismo predominante (LOWE, 1982). Enfim, cabe destacar que há diferentes circunstâncias responsáveis pelo desenvolvimento da fábrica maciça, de deposição *en masse* à deposição por agradiação gradual (WALKER, 1978; LOWE, 1982; KNELLER; BRANEY, 1995), enquanto a fábrica inversa denota certo grau de concentração de sedimentos promovendo efeito de peneiramento cinemático durante a sedimentação (SOHN, 1997).

4. Considerações finais

O presente trabalho buscou compreender os efeitos da concentração de sedimentos na geração de estruturas sedimentares superficiais e de leito decorrentes do escoamento superficial. As questões que nortearam a pesquisa foram elaboradas com base em resultados prévios de experimentação física em laboratório, assim a pergunta-chave a ser respondida foi: simulações do escoamento superficial com concentrações de pedosedimentos de 6 a 8 % geram depósitos

semelhantes a fluxos de menor ($C_v \sim 3\%$) ou de maior ($C_v 14-25\%$) concentração relativa? Duas repetições de fluxos (R13 e R14) exibiram concentrações nesses intervalos e foram analisadas suas velocidades médias, números de Froude e Reynolds, e seus depósitos. Anomalias na tendência decrescente nos valores do número de Froude durante a sedimentação e as marcas de lavagem podem representar a ação de uma onda de cavalgamento da cauda e do corpo do fluxo em resposta à maior desaceleração da cabeça. Estruturas de superfície tipo acreção vertical, disposição alongada e diques marginais são comuns aos depósitos resultantes dos fluxos R13 e R14 e de fluxos com $C_v > 14\%$ (transicional a alta densidade). As marcas de lavagem mais pronunciadas, lineações de partição e estrutura de leito em que há mistura de pedosedimentos com quartzo/arcosiano do plano de sedimentação são comuns aos depósitos de ambos os fluxos. Essas estruturas são encontradas em depósitos de fluxos de menor ($C_v \sim 3\%$) concentração relativa (baixa densidade). A textura das laminações resultantes nos depósitos desses fluxos é semelhante em termos de organização externa e interna, sendo sutis as diferenças. Assim, fluxos de escoamento superficial com concentrações de pedosedimentos de 6 a 8% geram depósitos semelhantes tanto a fluxos de menor ($C_v \sim 3\%$) quanto de maior ($C_v 14-25\%$) concentração relativa, representando um contínuo entre fluxos de baixa densidade e fluxos transicionais entre baixa e altas densidades. Isso leva a pensar que, assim como preconiza a literatura para outros ambientes sedimentares, no caso do escoamento superficial, não é possível estabelecer um valor absoluto de concentração de sedimentos, aqui pedosedimentos, para delimitar fluxos de baixa densidade de fluxos de densidades transicionais a altas. Esses achados são importantes para discernir a dinâmica do escoamento superficial de forma generalizada para depósitos de pedosedimentos, mas ainda não são suficientes para compreender as características dos fluxos responsáveis pelo retrabalhamento de colúvios antigos em rampas pedimentares do nordeste do Brasil.

Agradecimentos

Ao CNPq (Proc. 302976/2021-3) e a Fundação Araucária do Paraná (Convênios n. 072/2021 e 288/2022) pelo fomento à pesquisa.

Referências

- Abrahams, A. D.; Parsons, A. J.; Luk, S. H. Resistance to overland flow on desert hillslopes. *Journal of Hydrology*, n.88, 343–363, 1986.
- Alberts, E. E.; Moldenhauer, W. C.; Foster, G. R. Soil aggregates and primary particles transported in rill and interrill flow. *Soil Science Society of America Journal*, n. 44, 590–595, 1980.
- Ali, M.; Sterk, G.; Seeger, M.; Boersema, M. P.; Peters, P. Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds. *Hydrology and Earth System Sciences*, n. 16, 591-601, 2011.
- Bennet, S.J.; Ashmore, P.; Neuman, C. M. Transformative geomorphic research using laboratory experimentation. *Geomorphology*, n. 244, 1-8, 2015.
- BENVENUTI, M.; MARTINI, I. P. Analysis of terrestrial hyperconcentrated flows and their deposits. In: Martini, V. R.; Baker, V. R.; Garzón, G. (Eds.). *Flood and megaflood processes and deposits: recent and ancient examples*. Spec. Publ. Int. Ass. Sediment. n.32, 2002. p.167-193.
- BERTRAN, P., FRANCOU, B. AND TEXIER, J. P. Stratified slope deposits: the stone-banked sheets and lobes model. In: Slaymaker, O. (Ed.). *Steepland geomorphology*. John Wiley and Sons: New York, 1995, p.147-169.
- Blikra, L. H.; Nemeç, W. Postglacial colluvium in western Norway: depositional processes, facies and palaeoclimatic record. *Sedimentology*, n. 45, 909-959, 1998.
- Campbell, C. V. Lamina, laminaset, bed and bedset. *Sedimentology*, n. 8, 7-36, 1967.

Cartigny M. J. B.; Ventra, D.; Postma, G.; Van der Berg, J.H. Morphodynamics and sedimentary structures of bedforms under supercritical-flow conditions: new insights from flume experiments. *Sedimentology*, n. 61: 712-748, 2014.

CORRÊA, A.C.B.; MONTEIRO, K.A. Geomorphological dynamics of the elevated geosystems of the Borborema Highlands, Northeast of Brazil, from optically stimulated luminescence dating of hillslope sediments. *William Morris Davis - Revista de Geomorfologia*, v. 1, n. 1, 2020, p. 162-185.

Dasgupta, P. Sediment gravity flow – the conceptual problems. *Earth-Science Reviews*, n. 62, 265-281, 2003.

FITZPATRICK, E. A. *The micromorphology of soils: a manual for the preparation and description of thin sections of soils*. Aberdeen, Soil Science, 1980, 380 p.

Fonseca, D. N.; Silva, A. C. da; Barros, A. C. M. de; Silva, J. C. B. da; Silva, O. G. da. Mapeamento morfodinâmico como suporte à análise de processos de degradação em áreas do município de Cabrobó – Pernambuco. *Revista da Casa da Geografia de Sobral*, v. 19, n. 2, p. 92-107, 2017.

Guo, Z.; Ma, M.; Cai, C.; Wu, Y. Combined effects of simulated rainfall and overland flow on sediment and solute transport in hillslope erosion. *Journal of Soils and Sediments*, n. 4, 1-13, 2017.

Harrell, J. A visual comparator for degree of sorting in thin and plane sections. *Journal of Sedimentary Research*, n. 54, 646-650, 1983.

Kneller, B. C.; Branney, M. J. Sustained high-density turbidity currents and the deposition of thick massive sands. *Sedimentology*, n. 42, 607-616, 1995.

Liu, C.; Li, Z.; Fu, S.; Ding, L.; Wu, G. Influence of soil aggregate characteristics on the sediment transport capacity of overland flow. *Geoderma*, n. 369, 114338, 2020.

Lowe, D. R. Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Journal of Sedimentary Research*, n. 52, 279-297, 1982.

Lowe, D. R. Subaqueous liquefied and fluidized sediment flows and their deposits. *Sedimentology*, n.23, 285-308, 1976.

MANICA, R. Sediment gravity flow: study based on experimental simulations. In: Schulz, H.; Lobosco, R.; Simoes, A. (Eds.) *Hydrodynamics: natural water bodies.*, London: Interch Open, 2012, p.263-286.

Miller, B. A.; Juilleret, J. The colluvium and alluvium problem: Historical review and current state of definitions. *Earth-Science Reviews*, n. 209, 103316, 2020.

Nemec, W.; Kazanci, N. Quaternary colluvium in west-central Anatolia: sedimentary facies and palaeoclimatic significance. *Sedimentology*, n. 46, 139-170, 1999.

NICHOLS, G. *Sedimentology and stratigraphy*, Blackwell Science, 1999. 355 p.

Oliveira, M. A. T.; Behling, H.; Pessenda, L. C. R. Late-Pleistocene and mid-Holocene environmental changes in highland valley head areas of Santa Catarina state, Southern Brazil. *Journal of South America Earth Sciences*, n. 26, 55–67, 2008.

-
- Oliveira, M. A. T.; Camargo, G., Paisani, J. C.; Camargo Filho, M. Caracterização paleohidrológica de estruturas sedimentares quaternárias através de análise macroscópicas e microscópicas: do registro sedimentar local aos indícios de mudanças globais. *Pesquisas em Geociências*, v. 28, n. 2, 183-195, 2001.
- Paisani, J. C.; Manica, R.; Santos, M. C. P.; Ribeiro, R. A. R. Modern soil aggregate-colluvium generated by overland flow – stratigraphy and physical experiments. *Sedimentology*, online version, 1-25, 2023a.
- Paisani, J. C.; Pereira, J. S.; de Sordi, M. V.; Manica, R. Pleistocene-Holocene colluvial facies from the Volcanic Plateau of the Paraná Sedimentary Basin (Rio Grande do Sul, Brazil) – sedimentation processes and paleoenvironmental implications. *Journal South American Earth Sciences*, n. 126, 104344, 2023b.
- Paisani, J. C.; Santos, M. C.; de Sordi, M. V. Low-concentrated overland flow generated in laboratory experiments: sedimentar structures and fabric. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, in press.
- Paola, C.; Straub, K.; Mohrig, D.; Reinhardt, L. The “unreasonable effectiveness” of stratigraphic and geomorphic experiments. *Earth-Science Reviews*, n. 97, 1–43, 2009.
- Pierson, T. C.; Costa, J. E. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, VII, 1-12, 1987.
- Powers, M. C. A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, n. 23, 117-119, 1953.
- Shanmugam, G. High-density turbidity currents: are they sandy debris flow? *Journal of Sedimentary Research*, n. 66, 2-10, 1996.
- Sohn, Y. K. On traction-carpet sedimentation. *Journal of Sedimentary Research*, n. 67, 502-509, 1997.
- Strahler, A. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, n. 63, 1117-1142, 1952.
- Ventra, D.; Diaz, G. C.; de Boer, P. Colluvial sedimentation in a hyperarid setting (Atacama desert, northern Chile): geomorphic controls and stratigraphic facies variability. *Sedimentology*, n. 60, 1257-1290, 2013.
- Walker, R. G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: models for exploration for stratigraphic traps. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, n. 62, 932-966, 1978.
- Wentworth, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, n. 30, 377-392, 1922.

