

Caracterização granulométrica dos depósitos alúvio-colúviais de microbacias do rio Copiapó – região de Atacama (Chile).

Granulometric characterization of the alluvial-colluvial deposits in microbasins of the Copiapó river – Atacama region (Chile).

Keyla Manuela Alencar da Silva Alves¹; Drielly Fonseca²; Marcelo Lagos³; Jaime Carrasco Barra⁴

- ¹ Universidad Tecnológica Metropolitana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Industria, Escuela de Geomensura. Santiago, Chile. E-mail: keyla.dasilva@utem.cl
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7635-2430>
- ² Universidad Tecnológica Metropolitana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Industria, Escuela de Geomensura. Santiago, Chile. E-mail: dfonseca@utem.cl
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1374-8697>
- ³ Pontificia Univesidad Católica de Chile, Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política, Instituto de Geografía, Santiago, Chile. E-mail: mlagoslo@uc.cl
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8320-5855>
- ⁴ Universidad Tecnológica Metropolitana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Industria, Escuela de Industria. Santiago, Chile. E-mail: jcarrascob@utem.cl
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4123-4228>

Resumo: Este estudo tem como foco caracterizar a granulometria dos sedimentos presentes em depósitos alúvio-colúviais da bacia do rio Copiapó, no Chile, com o objetivo de gerar informações detalhadas sobre sua composição e contribuir para a compreensão do comportamento dos fluxos de detritos (aluviais). Esses fluxos correspondem a eventos de movimento em massa, desencadeados por precipitações intensas e concentradas, sendo frequentes nas zonas áridas da Cordilheira da Costa e da Cordilheira dos Andes. Caracterizam-se por sua alta densidade e por uma mistura de cascalhos e água que lhes confere propriedades de fluido não-newtoniano e viscoplástico, permitindo-lhes mobilizar grandes volumes de material. Os resultados da análise granulométrica indicam que as microbacias avaliadas contêm sedimentos com baixa coesão e alta suscetibilidade à erosão, predominando partículas angulosas e não coesas de cascalhos e areias. Essas características favorecem a geração e o transporte de fluxos de detritos em encostas íngremes, típicas de regiões áridas com alta energia erosiva. O estudo contribui para estabelecer vínculos entre a composição dos sedimentos e a dinâmica dos fluxos, fornecendo dados relevantes para a caracterização do material transportado em eventos de movimento em massa.

Palavras-chave: Composição granulométrica; Fluxos de detritos; Bacia do rio Copiapó.

Abstract: This study aims to characterize the grain size distribution of sediments in alluvial-colluvial deposits within the Copiapó River basin, Chile, to provide detailed information on their composition and enhance the understanding of debris flow behavior. Debris flows are mass-wasting events triggered by intense and localized rainfall, commonly occurring in the arid zones of the Coastal Range and the Andes. These flows are defined by their high density and a composition largely made up of gravel mixed with water, giving them non-Newtonian and viscoplastic fluid properties that enable the transport of large volumes of material. Grain size analysis revealed that the studied microcatchments contain sediments with low cohesion and high susceptibility to erosion, predominantly composed of angular and non-cohesive gravel and sand particles. These characteristics facilitate the initiation and mobilization of debris flows on steep slopes, which is typical of arid regions with high erosive energy. This research contributes to clarifying the relationship between sediment composition and debris flow dynamics, offering key granulometric data for the characterization of materials transported during mass movement events.

Keywords: Granulometric composition; Debris flows; Copiapó river basin.

Recebido: 12/03/2025; Aceito: 05/05/2025; Publicado: 13/06/2025.

1. Introdução

A composição granulométrica dos sedimentos é um fator relevante na classificação dos tipos de fluxos de material. Os fluxos de detritos apresentam em sua composição um alto percentual de material com grãos grossos misturados e, em menor proporção, mas de extrema importância para sua dinâmica, uma concentração de materiais finos, principalmente argilas. Esses fluxos ocorrem com velocidade variável, em resposta ao conteúdo de água, declividade local e outros parâmetros de fricção (JAAPAR *et al.*, 2023; ZAINOL & AWAHAB, 2018; ELMES, 2016).

Nesse contexto, a granulometria dos sedimentos depositados em canais, leitos fluviais e ravinas emerge como um parâmetro fundamental para determinar o tipo de fluxo, sua potência e velocidade. Os sedimentos presentes em ambientes áridos, como os estudados neste artigo, são heterogêneos em termos de tamanho de partícula e composição mineralógica (GONÇALVES *et al.*, 2021; SIVAK & VOLKOVA, 2020; ANTONI *et al.*, 2019; PRANOTO & SUBARI, 2019). A distribuição do tamanho das partículas, que abrange desde argilas até cascalhos, desempenha um papel essencial na determinação das propriedades reológicas e de transporte dos fluxos de detritos. Particularmente, as partículas finas e coesivas tendem a aumentar a viscosidade do fluido em suspensão, o que pode promover a formação de fluxos de detritos ao dificultar a rápida sedimentação (GUTIÉRREZ *et al.*, 2018; HAAS & WOERKOM, 2016; BIN & MING, 2014).

Mais de 80% da massa sólida dos fluxos de detritos é composta por partículas superiores a 2 mm, enquanto 20% são compostas por partículas inferiores a 2 mm (valores médios). Os fluxos de detritos caracterizam-se por serem um tipo de fluxo em que o material está saturado de água e apresenta uma concentração de material sólido que se comporta mecanicamente como um fluido não-newtoniano. À medida que aumenta a quantidade de sólidos transportados e a densidade da mistura ultrapassa a da água, a resistência à deformação cresce, de modo que a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação se torna não linear. Em geral, os fluxos de detritos possuem alta densidade (60–70% de sólidos em peso), e entre 20% e 80% das partículas excedem 2 mm. São fluxos com alto potencial de transporte, capazes de arrastar grandes blocos rochosos e objetos (casas, carros, estradas etc.) (HU *et al.*, 2017; PELLEGRINO & SCHIPPA, 2017; WU *et al.*, 2015).

Entretanto, considerando os fatores condicionantes que influenciam o comportamento mecânico dos fluxos de detritos, destaca-se a composição granulométrica da matriz e a concentração volumétrica de sedimentos finos. O percentual de sedimentos finos (<100–200 µm) presente na mistura de um fluxo de detritos influencia seu comportamento mecânico e sua velocidade (WU *et al.*, 2021; BLASIO, 2011). Em geral, os fluxos de detritos se comportam como fluidos viscoplásticos, caracterizados por uma tensão mínima de cisalhamento, acima da qual o fluido começa a se mover. Isso ocorre devido à ação do fluido intersticial e à interação entre as partículas.

Quando a matriz possui uma concentração de finos superior a 10%, o fluido intersticial lubrifica as partículas de sedimentos, pois, para partículas de diâmetro pequeno, como os sedimentos finos, a viscosidade predomina na mecânica do fluido. Por outro lado, se a matriz apresenta concentrações volumétricas de sedimentos finos inferiores a 10%, a dinâmica do fluxo é controlada pelo contato direto entre os cascalhos, predominando assim as forças inerciais (LLORENTE *et al.*, 2023; LÓPEZ *et al.*, 2021; MORENO, 2014).

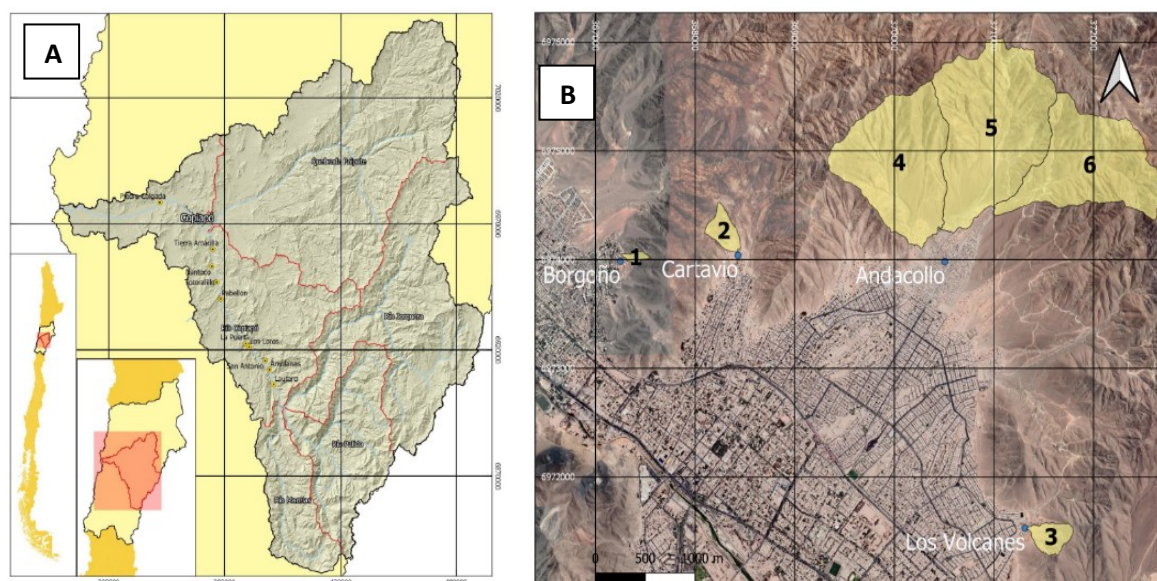
Estudos empíricos e modelagens numéricas têm fornecido uma base sólida para compreender como as variações na distribuição do tamanho das partículas influenciam a dinâmica desses eventos (IVERSON & GEORGE, 2023). Do mesmo modo, a suscetibilidade dos sedimentos à erosão e mobilização, em combinação com as condições hidroclimáticas e topográficas locais, contribui para a ocorrência e magnitude dos fluxos de detritos (OUYANG *et al.*, 2019; HÜRLIMANN *et al.*, 2019).

Este estudo foi realizado com o objetivo de caracterizar a composição granulométrica dos depósitos aluvio-coluviais localizados nas zonas de aporte sedimentar de seis microbacias situadas na bacia do rio Copiapó, região de Atacama (Chile).

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

As microbacias selecionadas para esta pesquisa estão localizadas na sub-bacia do Rio Copiapó Inferior, a jusante da confluência entre o Rio Copiapó e a Quebrada Paipote (Figura 1a). As microbacias analisadas situam-se nas encostas dos morros que margeiam a parte norte da cidade de Copiapó (Figura 1b).



Microbacia	Assentamento	Área Total (km²)	Declividade Média da Bacia (m/m)	Altitude Mínima (m s.n.m.)	Altitude Máxima (m s.n.m.)	Comprimento do Canal (m)
1	Borgoño	0,019	0,28	408	531,1	250,7
2	Cartavio	0,087	0,33	484,7	690,8	478
3	Los Volcanes	0,094	0,26	474,4	630,4	573,8
4	Andacollo (esquerda)	1,142	0,29	535,4	1012,4	1630
5	Andacollo (central)	1,473	0,28	556,6	1007	2291
6	Andacollo (direita)	1,007	0,34	606,8	984,1	2005,5

Figura 1a e b – Características das microbacias selecionadas na sub-bacia do Rio Copiapó Inferior.

Fonte: Autores (2024).

Na bacia do Rio Copiapó, os canais fluviais percorrem estratos geológicos compostos por depósitos fluvioaluviais, como cascalhos, areias e siltes, tanto dos rios atuais quanto de suas terraças e planícies de inundação (DGA - CONAMA, 2009; citado em ARANEDA, 2016). A Carta Geológica de Copiapó (ARÉVALO, 2005), em escala 1:100.000, mostra que a bacia de Copiapó é composta majoritariamente por rochas mesozoicas, incluindo rochas intrusivas cretáceas, sedimentares e vulcânicas (Figura 2). Estas são cobertas por depósitos não consolidados que variam do Mioceno até a atualidade (LARRONDO, 2017).

As microbacias selecionadas para o estudo apresentam uso do solo urbano, com presença de assentamentos informais instalados sobre depósitos aluviais e coluviais antigos (MsPliac), bem como sobre depósitos aluviais inativos (PIHa). Além disso, nas microbacias 4, 5 e 6 (setor Andacollo), parte da área está inserida na Formação Punta del Cobre (JKpc), uma unidade geológica que consiste em uma sequência vulcânica e sedimentar.

A Formação Punta del Cobre está presente em ambos os flancos do vale do rio Copiapó e do vale de Paipote. A litologia apresenta forte alteração, com seções vulcânicas e clásticas. Os depósitos aluviais e coluviais antigos (MsPliac) estão presentes na microbacia 1 (setor Borgoño), microbacia 2 (setor Cartavio) e outras, com elementos como cones aluviais e depósitos coluviais. Os depósitos aluviais inativos (PIHa) encontram-se em áreas como o sul da microbacia 1 e partes das microbacias 4, 5 e 6, além da microbacia 3 (setor Los Volcanes), com sedimentos consolidados que não apresentam evidências de atividade recente.

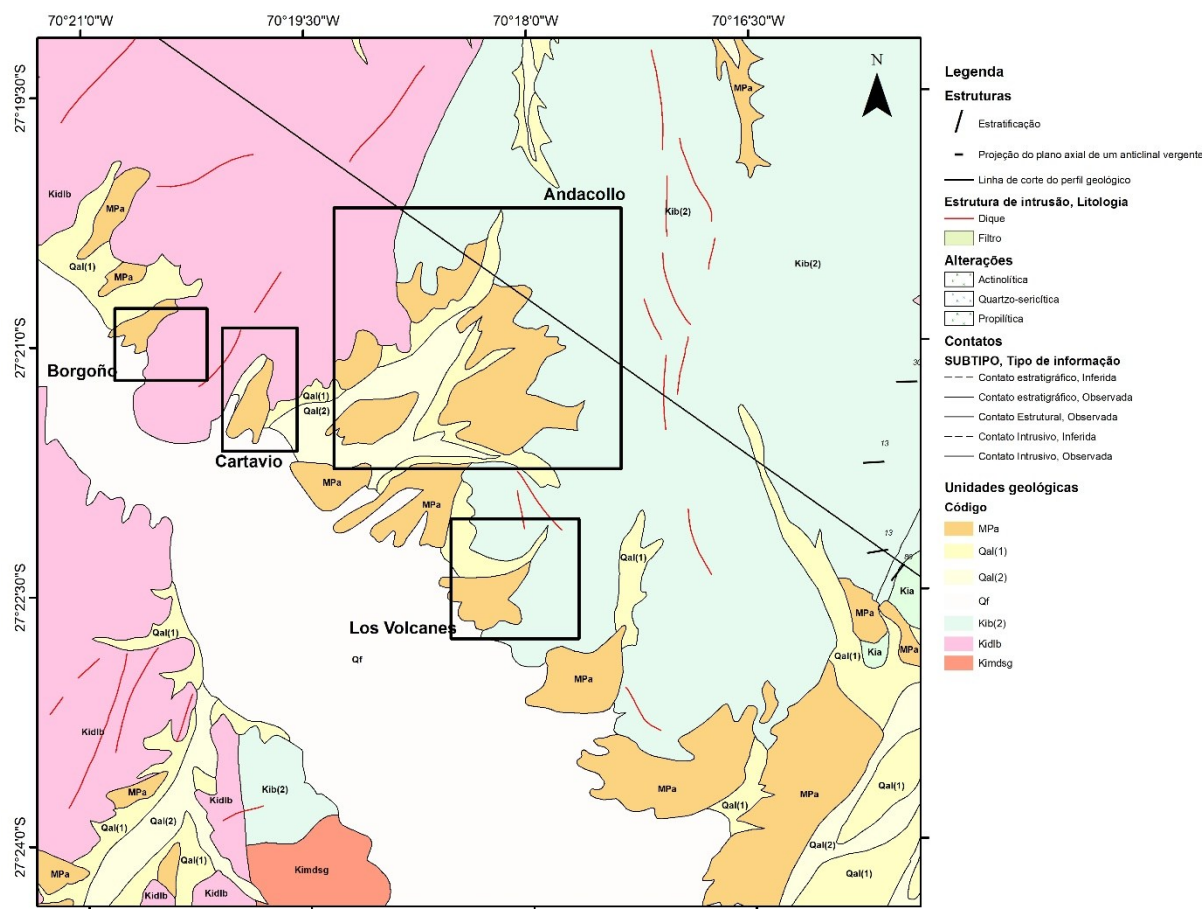


Figura 2 – Caracterização geológica das microbacias da sub-bacia do Rio Copiapó Inferior.

Fonte: Arévalo (2005), modificada pelos autores (2025).

A geomorfologia da bacia do rio Copiapó é marcada por um relevo irregular, composto por vales transversais e cadeias montanhosas. Entre os principais elementos fisiográficos destacam-se a Cordilheira dos Andes, os Vales Transversais, a Cordilheira da Costa e as Planícies Litorâneas (Figura 3). A área urbana da comuna de Copiapó está localizada sobre uma planície aluvial, na confluência da Quebrada Paipote com o rio Copiapó, cercada por morros de altitudes variadas.

Eventos de chuvas intensas ativam as ravinas transversais, promovendo o transporte de sedimentos em direção ao leito principal e aumentando o risco de transbordamento (IZQUIERDO *et al.*, 2024; GONZALES *et al.*, 2023). Os solos do vale são constituídos por sedimentos fluviais recentes, com formas mais jovens nas porções altas e médias, enquanto nas áreas mais baixas predominam superfícies suavemente inclinadas, características de uma peniplanície (BÄUERLE *et al.*, 2010; CORREA *et al.*, 2009).

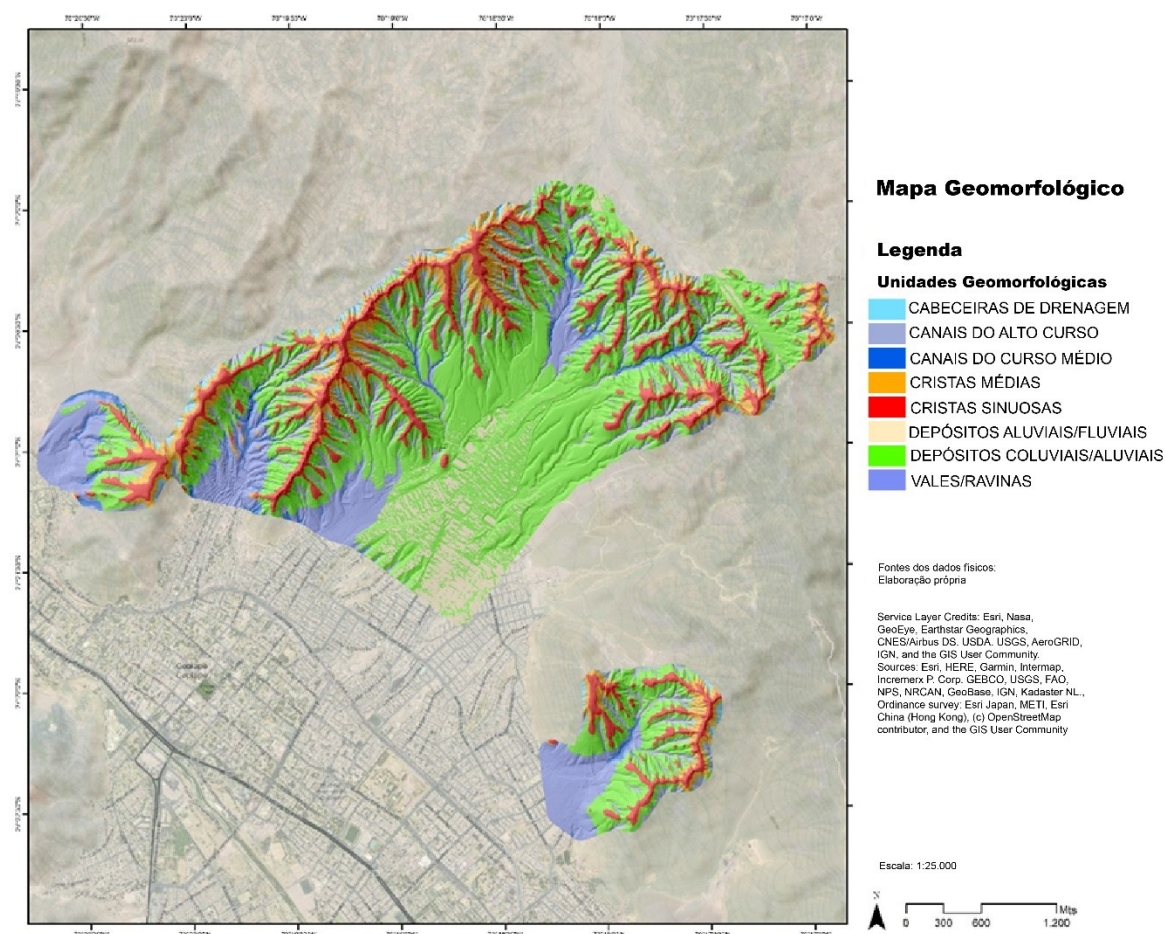


Figura 3 – Caracterização geomorfológica das microbacias selecionadas na sub-bacia do Rio Copiapó Inferior.
Fonte: Autores (2025).

2.2 Coleta de dados em campo

A seleção dos pontos de amostragem foi baseada em sua acessibilidade e na representatividade geológica das microbacias estudadas, com prioridade para áreas que preservassem depósitos bem conservados, possibilitando a análise de sequências sedimentares e de processos geomorfológicos recentes (MARTÍNEZ & FERNÁNDEZ, 2023).

Foram coletadas 13 amostras em depósitos localizados nos trechos superior, médio e inferior das ravinas, bem como em leques aluviais (Figura 4). Em depósitos aluviais com estratificação preservada, seguiu-se um protocolo sistemático de amostragem em cada estrato, garantindo a adequada representação das características físicas ao longo do perfil sedimentar. Essa abordagem permite interpretar a dinâmica aluviofluvial ao longo do tempo (GARCÍA & RUIZ, 2022; LÓPEZ et al., 2021; SMITH & JONES, 2020; THOMPSON et al., 2019).

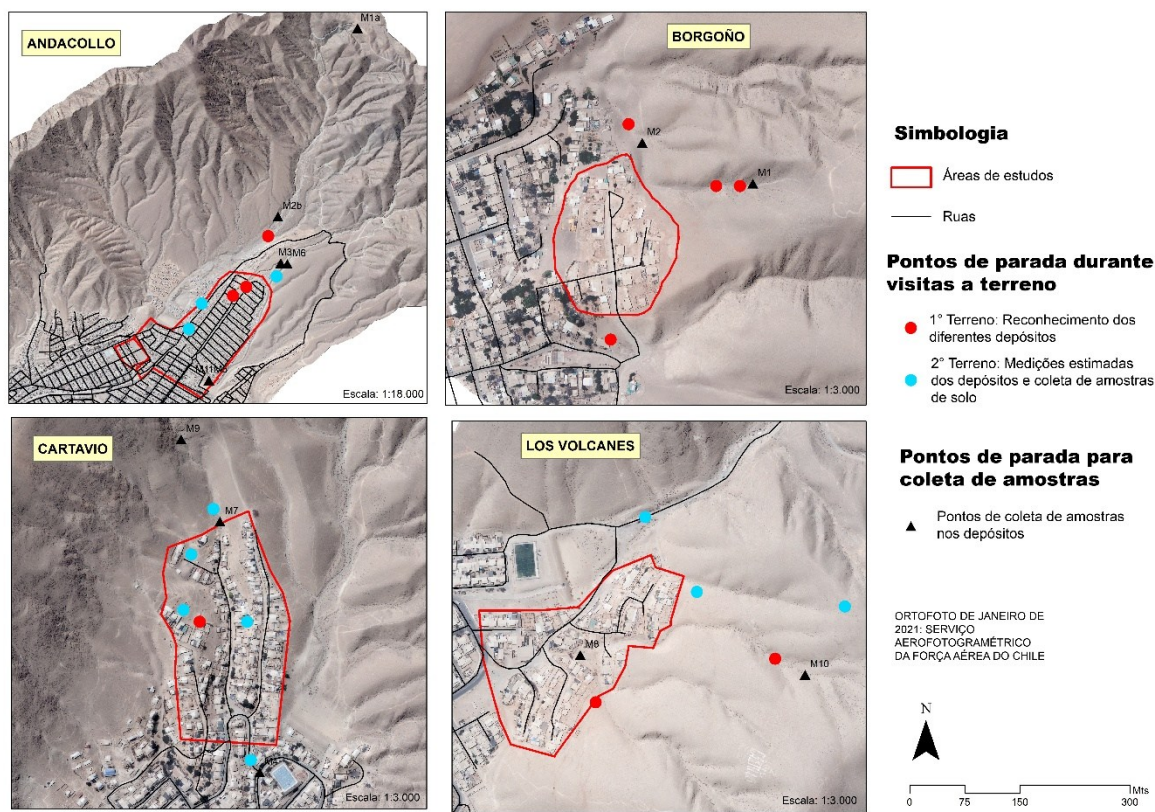


Figura 4 – Pontos de coleta de amostras e visitas de campo nas microbacias selecionadas.
Fonte: Autores (2025).

2.3 Procedimentos de laboratório

2.3.1 Método de peneiramento mecânico

A análise granulométrica por peneiramento é um procedimento mecânico que determina o percentual de massa acumulada em cada uma das peneiras utilizadas, em relação à massa total da amostra inicial. A relação entre o peso dos sedimentos retidos e passantes em cada peneira permite determinar o modelo que representa a distribuição do tamanho das partículas (CESTA *et al.*, 2016; KLEIN *et al.*, 2013; ARCHE, 2010).

Os parâmetros de calibração da peneiradora foram definidos com base na norma ISO 18400-104, Soil quality — Sampling — Part 104: Strategies. A seleção das peneiras, com aberturas representativas para determinar as concentrações de areias e siltes, foi realizada conforme a norma ASTM D422-63.

Também foi feita uma caracterização colorimétrica das amostras por meio da carta de cores Munsell, e o teor de argila foi determinado com o método de Stokes.

As amostras foram preparadas de acordo com os Métodos de Análisis Recomendados para los Suelos de Chile (SADZAWKA *et al.*, 2006). Todos os procedimentos pré e pós-peneiramento e pipetagem foram aplicados às 13 amostras coletadas. Os procedimentos de preparação e análise estão representados na Figura 5.

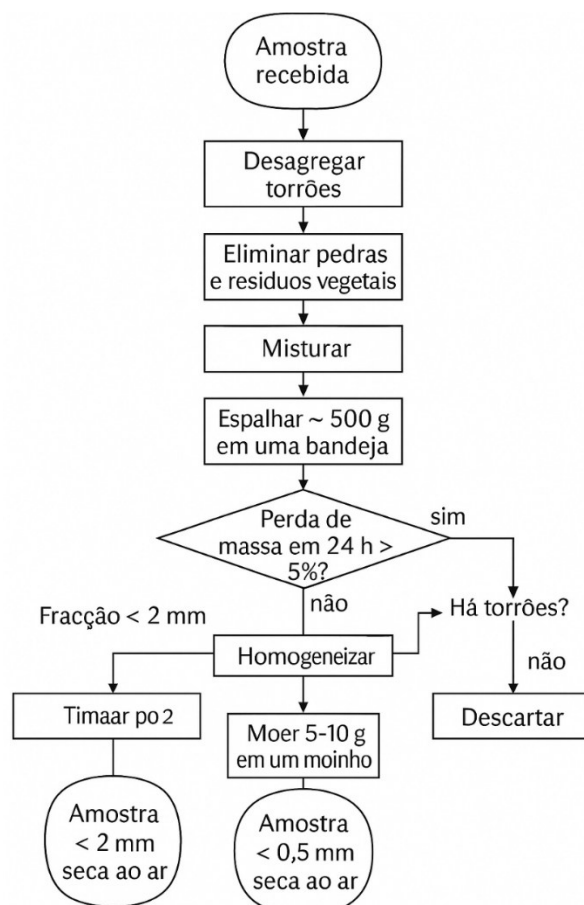


Figura 5 – Diagrama dos procedimentos de preparação das amostras antes do peneiramento.

Fonte: SADZAWKA *et al.* (2006).

Para a realização do processo de peneiramento, as peneiras foram organizadas em ordem decrescente com as seguintes aberturas: 2 mm, 850 μm , 250 μm , 90 μm , 63 μm , 53 μm , 45 μm e 38 μm . Cada amostra analisada foi inicialmente depositada na peneira superior. Esse procedimento foi executado durante um período de 10 minutos, com amplitude de 3,00 e sem interrupções, utilizando uma peneiradora analítica.

2.3.2 Método de Stokes

O método de Stokes por pipetagem é utilizado quando os sedimentos compostos por partículas finas (siltes finos e argilas) não podem ser analisados por peneiramento. Esse método baseia-se na Lei de Stokes (STOKES, 1851), que estabelece que uma partícula de determinado diâmetro e densidade, ao ser colocada em uma mistura de 1 litro de água com 10 g de hexametáfosfato de sódio, sedimenta-se em função do seu volume, da aceleração da gravidade, da viscosidade do fluido e da diferença de densidade entre a partícula e o líquido (LEYVA *et al.*, 2016).

Quando o diâmetro da partícula é inferior a 0,1 mm (menor que areia muito fina), a resistência oferecida pelo fluido é proporcional ao produto entre o diâmetro da partícula, sua velocidade e a viscosidade do meio (FILGUEIRA *et al.*, 2006) (Figura 6).

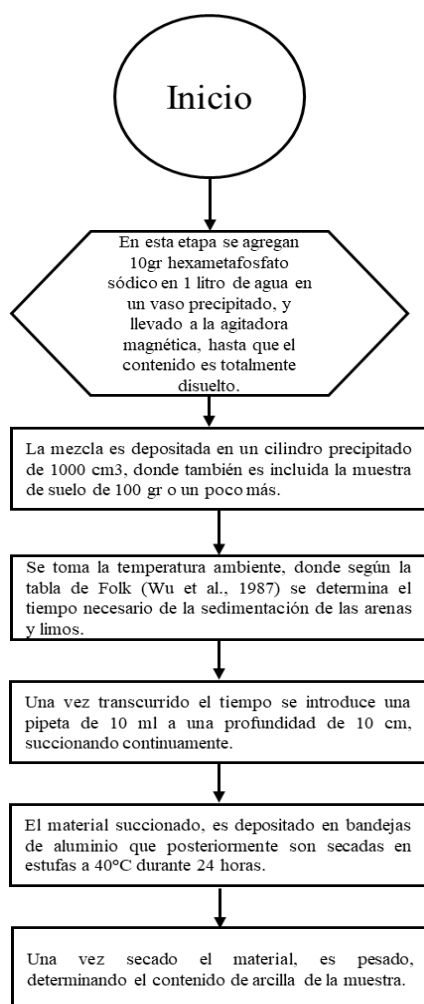


Figura 6 – Diagrama dos procedimentos para aplicação do método de Stokes.
Fonte: Autores (2024).

2.3.3 Método para análises estatísticas

Foram aplicados cálculos estatísticos para obter o balanço de massa, avaliar a precisão do processo e quantificar o erro de medição, com o objetivo de identificar e analisar as possíveis causas de desvios nos resultados obtidos. Esses cálculos foram realizados com base nas seguintes equações:

1. Fração de peso retido

$$f x_i = m_i \sum_{i=1}^n m_i$$

m_i é o peso retido em cada peneira.

2. Fração de finos acumulada

$$F(x_i) = \sum_{i=1}^n f(x_i)$$

3. Fração de material retido acumulada

$$R(x_i) = \sum_{i=1}^n f(x_i) = 1 - F(x_i)$$

4. Porcentagem do erro

$$\% \text{ Erro} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} \times 100$$

A distribuição dos tamanhos das partículas foi analisada por meio de curvas granulométricas, que representam a proporção acumulada de cada fração em função do tamanho das partículas. As análises estatísticas de textura, seleção, assimetria e curtose das amostras (Tabela 1) foram realizadas utilizando os resultados da granulometria no software Sysgran.

Tabela 1 – Valores interpretativos aplicados nas análises estatísticas das amostras.

Seleção $\sigma_\phi = \sqrt{\frac{\sum f(m_\phi - x_\phi)^2}{100}}$		Assimetria $sk_\phi = \frac{\sum f(m_\phi - x_\phi)^3}{100^3_\phi}$		Curtoses $K_\phi = \frac{\sum f(m_\phi - x_\phi)^4}{100^4_\phi}$	
Muito bem selecionado	<0.35	Muito negativa	<-1.3	Muito platicúrtica	<1.70
Bem selecionado	0.35 – 0.5	Negativa	-1.3 - -0.43	Platicúrtica	1.70 – 2.55
Moderadamente selecionado	0.5 – 1.0	Aproximadamente simétrica	-0.43 - 0.43	Mesocúrtica	2.55 – 3.7
Pobremente selecionado	1.0 – 2.0	Positiva	0.43 – 1.3	Leptocúrtica	3.7 – 7.4
Muito pobremente selecionado	2.0 – 4.0	Muito positiva	>1.3	Muito leptocúrtica	7.4 - 15
Extremadamente mal selecionado	>4			Extremadamente leptocúrtica	>15
f = porcentagem do peso retido acumulado de cada peneira m = mediana do intervalo dos diâmetros das partículas em phi (ϕ)					

Fonte: CAMARGO (2006).

3. Resultados e discussão

Foram coletadas 13 amostras de depósitos aluviais e coluviais em diferentes microbacias da bacia do rio Copiapó, abrangendo os setores de Borgoño (microbacia 1), Cartavio (microbacia 2), Los Volcanes (microbacia 3) e Andacollo (microbacia 5). Esses depósitos foram selecionados para análise granulométrica, textural e estatística, conforme a nomenclatura e a ordem descritas na metodologia (Figura 4). Não foram realizadas coletas nas microbacias 4 e 6 do setor Andacollo devido à instabilidade dos depósitos não consolidados e às dificuldades de acesso.

3.1 Microbacia 1 (setor Borgoño)

Foram coletadas duas amostras de sedimentos na ravina principal da microbacia, localizadas a montante (M1) e a jusante (M2), com o objetivo de avaliar a variabilidade textural. Os sedimentos apresentam textura de areia grossa com

grãos angulosos, predominantemente de origem aluvio-coluvial, atribuída a processos de intemperismo, erosão e transporte a partir de áreas circundantes. Estruturalmente, apresentam formação poliédrica grosseira bem desenvolvida, com plasticidade moderada e friabilidade média em condições úmidas, tornando-se compactados e resistentes à fragmentação em condições secas. Foram observados nódulos ferruginosos dispersos, possivelmente associados à segregação de ferro.

A análise granulométrica revelou uma concentração de partículas grossas (cascalho e areia) superior a 90% em ambas as amostras. Em M1, a composição foi de 13,51% de cascalho, 83,43% de areia, 2,73% de silte e 0,33% de argila; em M2, 13,25% de cascalho, 84,19% de areia, 2,28% de silte e 0,28% de argila. As frações finas (<200 micrômetros) representaram 1,53% em M1 e 1,28% em M2, o que é compatível com ambientes aluviais (MORENO, 2014).

Em M1, o fluxo é mais turbulento devido à maior declividade e menor acúmulo de partículas finas, com alta proporção de areia grossa (83,43%), indicando energia suficiente para transportar partículas grandes, mas não volumes significativos de cascalho. Em M2, o fluxo é mais estável e menos turbulento, com leve redução no cascalho e aumento na concentração de areia (84,19%). A diminuição da assimetria e da curtose a jusante reflete condições de deposição mais lentas e uniformes. As propriedades granulométricas e a análise global sugerem um regime de fluxo transicional a turbulento no setor de Borgoño. A alta proporção de areia grossa e a baixa compactação dos sedimentos indicam um ambiente de transporte ativo, porém não extremo (Figura 7).

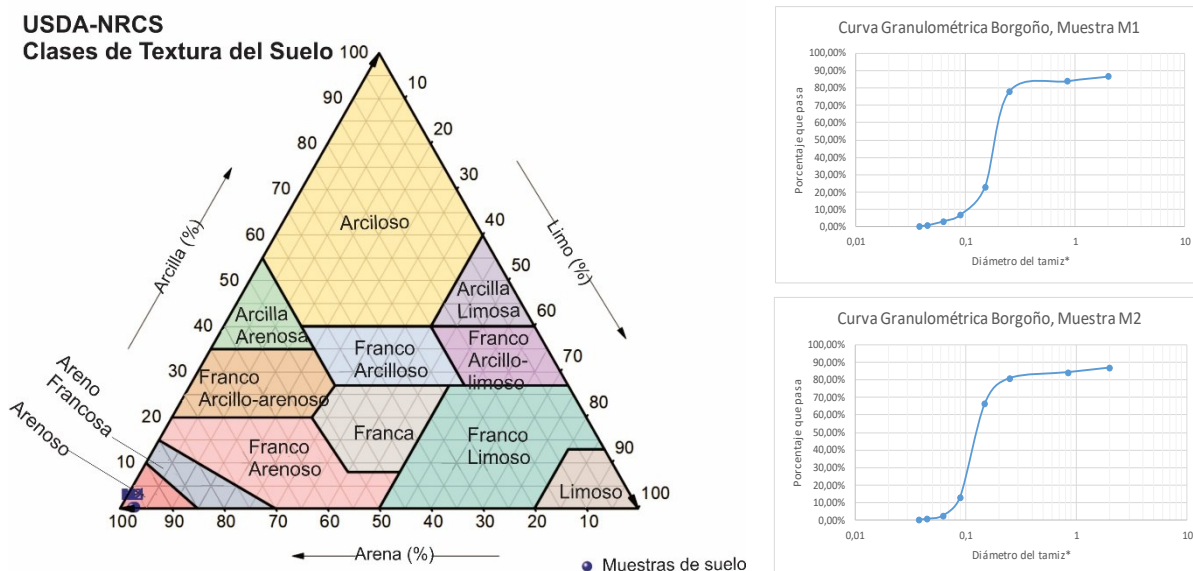


Figura 7 – Resultados da análise textural e das curvas granulométricas das amostras M1 e M2 da microbacia 1, setor de Borgoño.

Fonte: Autores (2024).

Observou-se uma perda de massa mínima nas amostras: 2% em M1 e 1% em M2, indicando baixa compactação e desgaste mecânico reduzido, possivelmente devido a condições de fluxo menos intensas. A uniformidade na profundidade de amostragem (50 cm) e a litologia consistente sugerem uma origem comum dos sedimentos, transportados e depositados por fluxos provenientes das áreas montanhosas.

A análise de cor Munsell (10 YR 6/3) evidenciou uma oxidação moderada e a presença de minerais de ferro, com condições semelhantes de oxidação nos dois pontos de coleta. As propriedades granulométricas indicaram uma distribuição moderadamente bem selecionada dos tamanhos de grão (σ_ϕ : 1,26 em M1, 1,34 em M2), com predominância de partículas grossas (α_ϕ : -0,33 em M1, -0,64 em M2) e alta curtose (K_ϕ : 1,92 em M1, 1,41 em M2), o que sugere um processo de deposição rápido e uniforme (HETZ et al., 2013; ANTINAO & MCDONALD, 2013).

Tabela 2 – Resultados das análises Sysgran amostras M1 y M2 - microbacia 1, setor de Borgoño.

Sítio	Amostra	UTM Este	UTM Sur	Profundidade (M/Cm)	Peso Inicial (Gr)	Peso Final (Gr)	Erro %	Color Munsell	Seleção ($\Sigma\Phi$)	Assimetria ($A\Phi$)	Curto ses ($K\Phi$)
A montante	M1	367415	6974046	50cm	1021,01	1001,01	2%	10 YR 6/3 (cor amarelo claro)	1.26	-0.33	1.92
A jusante	M2	367285	6974094	50cm	1019,25	1005,25	1%	10 YR 6/3 (cor amarelo claro)	1.34	-0.64	1.41

Fonte: Autores (2024).

3.2 Microbacia 2 (setor Cartavio)

Foram coletadas três amostras na microbacia, duas a montante (M7 e M9) e uma a jusante (M4), em depósitos aluvio-coluviais. As análises granulométricas revelaram variações significativas na composição dos sedimentos, bem como nas condições de transporte e deposição.

A amostra M4, coletada a jusante, apresentou maior concentração de cascalho (64,19%), areia (28,08%), silte (6%) e argila (1,73%), com grãos predominantemente angulosos e baixa coesão. Esses resultados indicam processos ativos de transporte associados a eventos recentes de movimento em massa. A estrutura poliédrica grosseira, fortemente desenvolvida, com plasticidade moderada e dureza em estado seco, reforça essa interpretação. Além disso, a concentração de sedimentos finos é de 3,86%, valor compatível com ambientes aluviais em zonas áridas (MORENO, 2014).

Por outro lado, as amostras M7 (cascalho 33,74%, areia 58,39%, silte 5,48% e argila 2,40%) e M9 (cascalho 8,42%, areia 88,26%, silte 3,01% e argila 0,30%), coletadas a montante, refletem fluxos de menor energia em comparação com M4. Em M7, o fluxo transicional transporta materiais de tamanho intermediário, o que é evidenciado por uma estrutura poliédrica fina, moderadamente desenvolvida, e uma concentração de sedimentos finos de 3,94%. Já M9, com 88,26% de areia e apenas 8,42% de cascalho, sugere um fluxo mais estável e uniforme, possivelmente devido à menor declividade ou maior distância da fonte de material grosseiro, com 1,67% de sedimentos finos. A maior proporção de partículas grossas em M4 indica fluxos turbulentos e deposição rápida, enquanto M7 e M9 refletem fluxos mais estáveis e homogêneos (Figura 8).

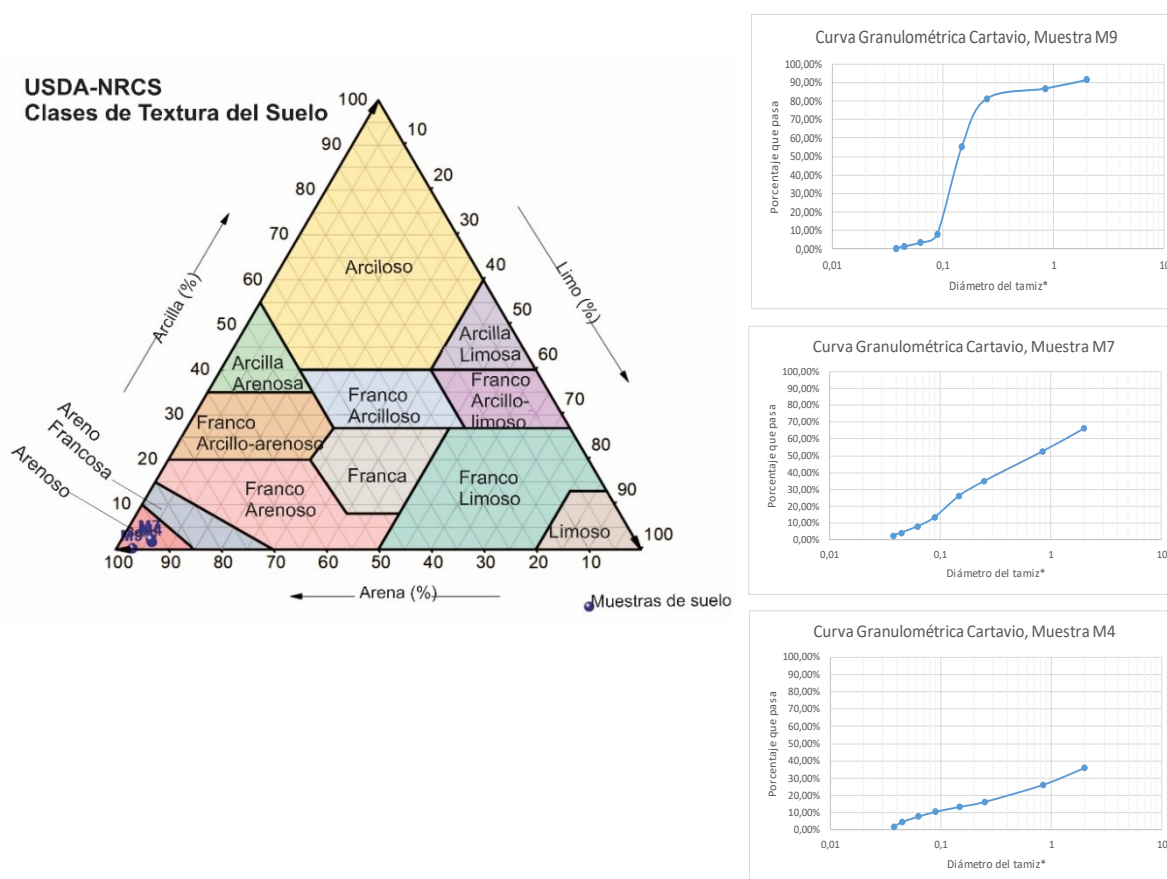


Figura 8 – Resultados da análise textural e das curvas granulométricas das amostras M4, M7 e M9 da microbacia 2, setor de Cartavio.

Fonte: Autores (2024).

As amostras apresentaram variações na perda de massa, desde 0% em M9 (1 m) até 3% em M4 (6 m), indicando diferenças nos níveis de compactação e no teor de umidade. As profundidades de amostragem, que variam entre 90 cm e 6 m, sugerem diferentes níveis de deposição aluvial e processos coluviais associados a uma origem comum dos sedimentos (YU et al., 2016; SOHN et al., 2007; KIERSCH, 1996). A análise de cor evidenciou variações significativas entre as amostras (10 YR 5/4 em M4, 7.5 YR 5/4 em M7 e 10 YR 6/3 em M9), refletindo diferenças nos níveis de oxidação e nas condições redox durante o processo de deposição (BOURQUIN et al., 2009).

As propriedades granulométricas também revelam variabilidade nos processos de transporte e deposição. A seleção granulométrica varia de moderadamente bem selecionada (σ_ϕ : 1,24 em M9) a mal selecionada (σ_ϕ : 1,71 em M7). A assimetria varia entre valores negativos (-0,51 em M4, indicando predominância de partículas grossas) e positivos (1,38 em M9, com predominância de partículas finas), enquanto a curtose varia de 0,5 em M7 (distribuição plana) a 1,39 em M9 (distribuição concentrada) (LIU et al., 2014; SUMMA-NELSON & RITTENOUR, 2012; NICHOLS & FISHER, 2007; GRIFFITHS et al., 2006; ROMMENS et al., 2006).

Tabela 3 – Resultados da análise Sysgran das amostras M4, M7 e M9 – microbacia 2, setor de Cartavio.

Sítio	Amostra	UTM Este	UT M Sur	Profundidade (M/Cm)	Peso Inicial (Gr)	Peso Fina (Gr)	Erro %	Color Munsell	Seleção (Σ_ϕ)	Assimetria (A_ϕ)	Curtoses (K_ϕ)
Curso médio	M4	370885	6974649	6m	941,56	911,44	3%	10 YR 5/4 (cor pardo amarelo)	1.27	-0.51	1.23

A jusante	M7	36841 0	6974 183	90cm	1056,3	1040,3	2%	7.5 YR 5/4 (cor entre vermelho e amarelo)	1.71	0.31	0.5
A montante	M9	36835 6	6974 298	1m	1048,09	1044,09	0%	10 YR 6/3 (cor amarelo claro)	1.24	1.38	1.39

Fonte: Autores (2024).

3.3 Microbacia 3 (setor Los Volcanes)

Foram coletadas duas amostras na microbacia 3, setor Los Volcanes: M8, localizada a jusante (cascalho 33,27%, areia 61,70%, silte 4,34%, argila 0,69%), e M10, a montante (cascalho 22,40%, areia 69,75%, silte 6,91%, argila 0,94%). Ambas as amostras são provenientes de depósitos aluvio-coluviais, cujas características granulométricas e texturais refletem a dinâmica de fluxo e deposição dos sedimentos.

Em ambas as amostras predomina a areia grossa, com grãos angulosos, uniformes e soltos, indicando um ambiente de deposição com energia moderada a alta. A amostra M8 apresenta uma estrutura poliédrica fina, de desenvolvimento moderado, com manchas avermelhadas e amareladas associadas a processos de oxidação e meteorização, além de propriedades físicas de leve plasticidade e dureza em estado seco. Em contraste, M10 apresenta uma estrutura poliédrica grosseira e mais compacta, sugerindo maior consolidação devido a condições mais estáveis de deposição. As concentrações de sedimentos finos (<200 micrômetros) são de 2,51% em M8 e 3,92% em M10, valores característicos de ambientes aluviais áridos (MORENO, 2014).

A amostra M8, localizada a jusante, possui maior proporção de cascalho (33,27%) e menor proporção de areia (61,70%), evidenciando um fluxo mais ativo e turbulento. Em comparação, M10, a montante, contém mais areia (69,75%) e menos cascalho (22,40%), refletindo um fluxo menos intenso, porém ainda com capacidade de transporte de partículas grosseiras. Ambas as amostras apresentaram assimetria negativa (−0,25 em M8 e −0,55 em M10), típica de sedimentos grossos em ambientes de alta energia, e curtose baixa (0,40 em M8 e 0,48 em M10), indicando uma distribuição granulométrica plana e relativamente uniforme.

A estabilidade no teor de umidade e a perda mínima de massa (0% em ambas as amostras) sugerem um fluxo pouco erosivo, com deposição recente ou moderadamente estável. A uniformidade na profundidade de amostragem (92–98 cm) e as características litológicas indicam uma origem comum dos sedimentos, transportados por fluxos intermitentes em clima árido. As diferenças de cor entre as amostras refletem variações locais nos processos de oxidação e meteorização, influenciadas pelas condições redox (Figura 9).

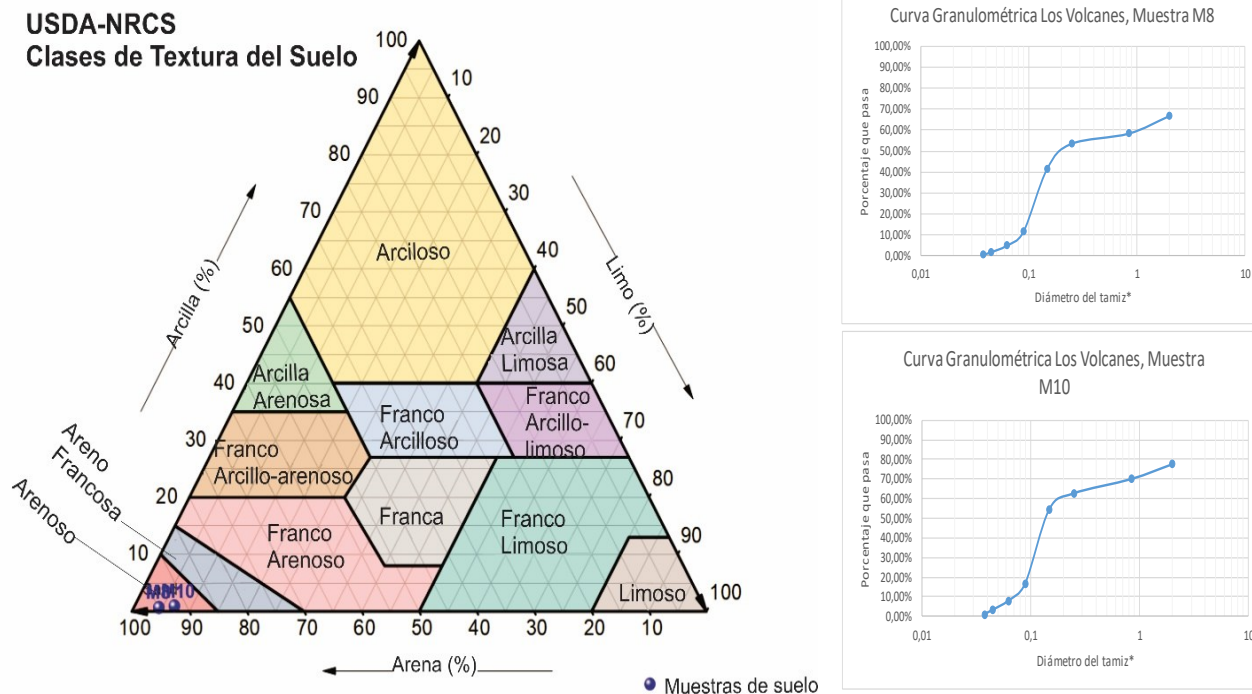


Figura 9 – Resultados da análise textural e das curvas granulométricas das amostras M8 e M10 da microbacia 3, setor de Los Volcanes.

Fonte: Autores (2024).

As amostras M8 e M10 apresentaram perda de massa nula (0%), o que indica baixa compactação e desgaste mecânico reduzido, possivelmente devido à atuação de fluxos menos intensos. A uniformidade no teor de umidade sugere condições estáveis de umidade no momento da amostragem (REGMI & RASMUSSEN, 2018; LÖHRER et al., 2013). As profundidades de amostragem, uniformes em aproximadamente 1 metro, refletem sedimentos aluviais superficiais e consistentes, característicos da região (WRIGHT & ZARZA, 1990). A análise de cor Munsell evidencia diferenças entre as amostras (7.5 YR 4/3 em M8 e 10 YR 5/4 em M10), refletindo variações nos níveis de oxidação, no conteúdo mineralógico e nas condições ambientais durante a deposição (RUSSELL, 1889).

Em termos granulométricos, a seleção varia entre moderadamente bem selecionada (σ_ϕ : 1,67 em M8) e mal selecionada (σ_ϕ : 1,83 em M10), refletindo fluxos com intensidades variáveis (DUCLOUX et al., 1998). Ambas as amostras apresentam assimetria negativa (-0,25 em M8 e -0,55 em M10), o que indica maior proporção de partículas grossas, típicas de ambientes de alta energia (AL-FARRAJ & HARVEY, 2000). A baixa curtose (0,40 em M8 e 0,48 em M10) indica uma distribuição de tamanhos de grão plana e uniforme, característica de fluxos constantes e turbulentos (GREENBAUM et al., 2020; WANAS et al., 2015; GLASBY et al., 2010).

Tabela 4 – Resultados da análise Sysgran das amostras M8 e M10 – microbacia 3, setor de Los Volcanes.

Sítio	Amostra	UTM Este	UTM Sur	Profundidade (M/Cm)	Peso Inicial (Gr)	Peso Fina (Gr)	Erro %	Color Munsell	Seleção ($\Sigma\phi$)	Assimetria (A_ϕ)	Curtoses (K_ϕ)
A jusante	M8	371354	6971524	92cm	1034,05	1031,05	0%	7.5 YR 4/3 (cor Marrom)	1.67	-0.25	0.40
A montante	M10	371660	6971497	98cm	1035,76	1031,74	0%	10 YR 5/4 (cor Pardo amarelo)	1.83	-0.55	0.48

Fonte: Autores (2024).

3.4 Microbacia 5 (setor Andacolito)

Foram coletadas seis amostras de sedimentos na ravina central da microbacia 5: a jusante (M6: cascalho 49,61%, areia 48,30%, silte 1,81%, argila 0,28%; M11: cascalho 55,40%, areia 40,34%, silte 4,04%, argila 0,22%), no curso médio (M3: cascalho 61,18%, areia 30,49%, silte 4,51%, argila 3,82%; M5: cascalho 51,09%, areia 46,56%, silte 1,92%, argila 0,43%) e a montante (M1a: cascalho 53,82%, areia 38,17%, silte 5,02%, argila 2,99%; M2b: cascalho 42,40%, areia 41,89%, silte 7,57%, argila 8,14%). As amostras foram extraídas de depósitos aluvio-coluviais, apresentando textura de cascalho arenoso, estrutura esquistosa e leve plasticidade.

A análise granulométrica revelou que os sedimentos são compostos majoritariamente por cascalho e areia, com partículas angulosas e soltas. De acordo com os critérios de MORENO (2014), as concentrações de sedimentos finos (<200 micrômetros) foram: M6 (1,04%), M11 (2,13%), M3 (4,16%), M5 (1,17%), M1a (4%) e M2b (7,8%).

A jusante (M6 e M11), o fluxo apresenta caráter turbulento, com alta capacidade de transporte de partículas grossas (cascalho: 49,61%–55,40%; areia: 40,34%–48,30%), indicando processos deposicionais ativos. No trecho intermediário (M3 e M5), as proporções de cascalho são ainda mais elevadas (61,18% em M3, 51,09% em M5), enquanto as maiores concentrações de sedimentos finos em M3 (8,33%) e M5 (2,35%) sugerem eventos de menor intensidade que favorecem a deposição de partículas finas. A montante (M1a e M2b), o fluxo possui menor energia relativa, com proporções mais equilibradas entre cascalho e areia (cascalho: 42,40%–53,82%; areia: 38,17%–41,89%) e maior presença de sedimentos finos (5,02%–7,57%).

A variabilidade granulométrica e física observada reflete um sistema fluvial dinâmico, influenciado por eventos episódicos de alta energia. Os depósitos mais superficiais (1 m) estão associados a eventos recentes, enquanto os mais profundos (até 7 metros) correspondem a processos mais antigos e compactados. A perda de massa variável entre as amostras (0%–6%) sugere diferenças na compactação e no teor de umidade dos sedimentos (Figura 10).

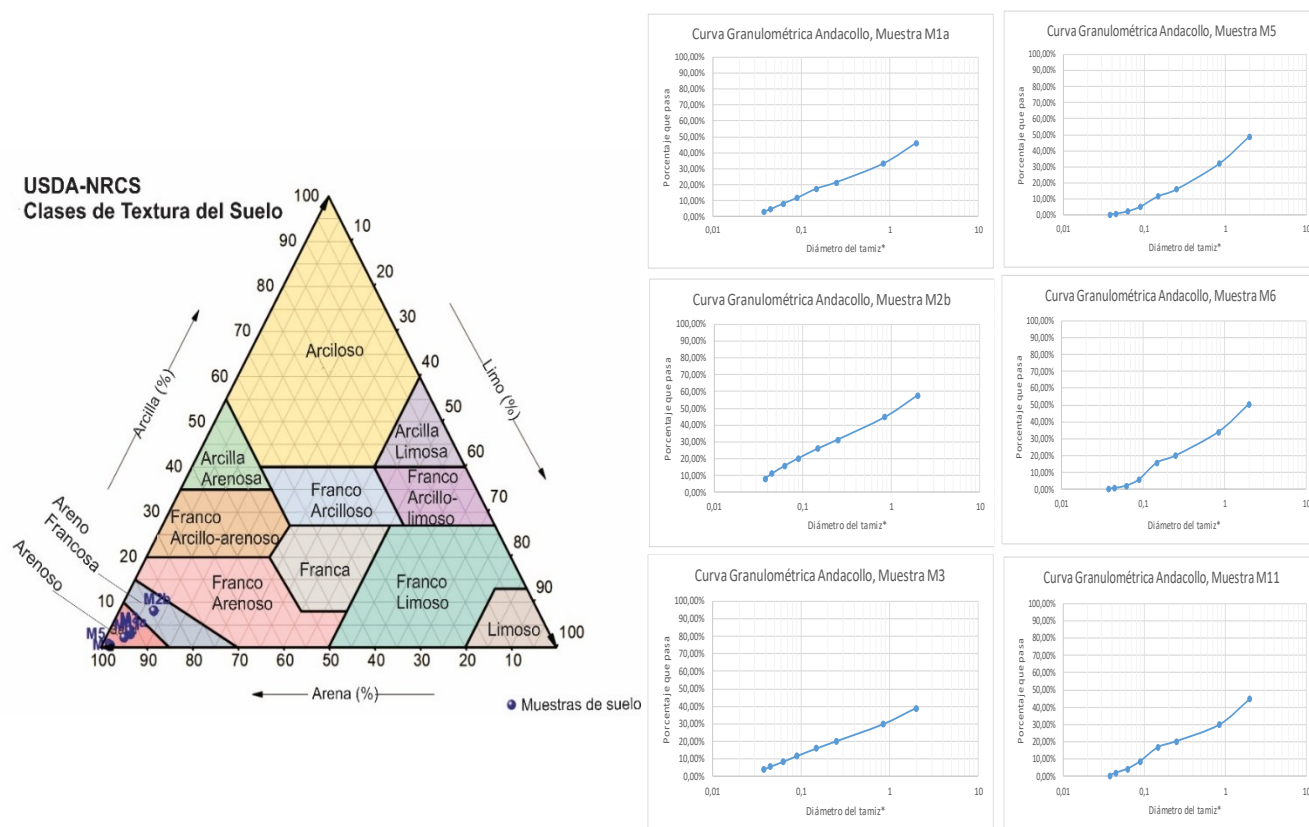


Figura 10 – Resultados da análise textural e das curvas granulométricas das amostras M1a, M2b, M3, M5, M6 e M11 da microbacia 5, setor de Andacollo.

Fonte: Autores (2024).

Todas as amostras apresentaram variabilidade na perda de massa entre 0% e 6%, atribuída à compactação natural dos sedimentos, ao desgaste mecânico durante o transporte e às flutuações no teor de umidade no momento da amostragem (PORAT et al., 1997; GERSON et al., 1993). As profundidades de amostragem, que variam entre 1 m e 7 m, refletem diferentes níveis de deposição aluvial, com depósitos superficiais mais recentes e camadas mais profundas representando episódios antigos e compactados. A litologia uniforme sugere uma origem comum dos sedimentos, transportados e depositados por fluxos provenientes das montanhas circundantes (EITEL et al., 2001; MELTON, 1965). A análise de cor varia entre 10 YR 6/3 e 10 YR 5/4, indicando oxidação moderada e presença de minerais ferrosos, características de condições de oxidação semelhantes (BOURQUIN et al., 2009).

As propriedades granulométricas indicam uma seleção que varia de moderadamente bem selecionada (σ_ϕ : 1,15) a mal selecionada (σ_ϕ : 2,00), refletindo fluxos episódicos com capacidade de transporte de partículas de diversos tamanhos (RIDGWAY & DECELLES, 1993). A assimetria positiva ($\alpha_\phi > 1$), observada na maioria das amostras, aponta para uma maior proporção de partículas finas, típicas de ambientes de baixa energia (HOOKE, 1967). A baixa curtose ($K_\phi < 1$) indica uma distribuição granulométrica uniforme (HETZ et al., 2013; ANTINAO & MCDONALD, 2013).

Tabela 5 – Resultados da análise Sysgran das amostras M1a, M2b, M3, M5, M6 e M11 – microbacia 5, setor de Andacollo.

Sítio	Amostra	UTM Este	UTM Sur	Profundidade (M/Cm)	Peso Inicial (Gr)	Peso Fina (Gr)	Erro %	Color Munsell	Seleção ($\Sigma\phi$)	Assimetria (A_ϕ)	Curtoses (K_ϕ)
A montante	M1a	371345	6975894	4m	883,49	833,49	6%	10 YR 6/3 (Cor Amarelo claro)	1,57	1,36	0,89
A montante	M2b	370897	6974667	6m	835,11	804,91	4%	10 YR 6/3 (Cor Amarelo claro)	2	0,83	0,74
Curso médio	M3	370917	6974364	1m	836,5	796,27	5%	10 YR 5/3 (Cor Pardo Amarelo)	1,53	1,32	1,04
Curso médio	M5	370509	6973597	1m	908,15	857,82	6%	10 YR 5/4 (Cor Pardo amarelo)	1,15	1,51	0,81
A jusante	M6	370955	6974360	1m	937,7	887,52	5%	10 YR 5/3 (Cor Pardo Amarelo)	1,4	1,41	0,74
A jusante	M11	370509	6973597	7m	1040	1039,6	0%	10 YR 5/4 (Cor Pardo amarelo)	1,45	1,38	0,84

Fonte: Autores (2024).

4. Considerações finais

A análise das microbacias 1 (setor Borgoño), 2 (setor Cartavio), 3 (setor Los Volcanes) e 5 (setor Andacollo), na bacia do rio Copiapó, revela uma dinâmica sedimentar influenciada pelo clima árido, pela topografia e por eventos hidrológicos extremos. O sistema aluviofluvial, caracterizado por fluxos transicionais a turbulentos, reflete variações locais na energia do fluxo que moldam a paisagem.

Na microbacia 1 (setor Borgoño), os sedimentos de areia grossa, ricos em nódulos ferruginosos e com assimetria negativa, evidenciam fluxos de alta energia, capazes de transportar partículas de grande porte. As menores declividades a jusante favorecem a deposição de materiais soltos, em resposta a eventos episódicos e às características geomorfológicas locais.

A microbacia 2 (setor Cartavio) apresenta depósitos de cascalho e areia com baixa coesão, resultantes de movimentos em massa e deslizamentos. As variações na assimetria e na curtose refletem uma diminuição da energia do fluxo ao longo da ravina, com deposição de partículas grossas em áreas de menor declive, típico de sistemas aluvio-coluviais.

Na microbacia 3 (setor Los Volcanes), a predominância de areias grossas, manchas de óxidos de ferro e má seleção granulométrica apontam para fluxos instáveis e flutuantes. Esses fluxos são gerados por variações sazonais e chuvas repentinas, que transportam partículas não coesas e esculpem a paisagem árida.

A microbacia 5 (setor Andacollo) se destaca pela abundância de cascalhos e areias grossas transportados por fluxos de alta energia. A má seleção granulométrica e a assimetria positiva observada em alguns casos sugerem a presença de

partículas finas em suspensão. A profundidade dos depósitos (1 a 7 metros) reflete uma história sedimentar complexa, com eventos de fluxo que mobilizaram materiais em diferentes níveis.

De modo geral, as microbacias analisadas apresentam sedimentos de baixa coesão e alta suscetibilidade à erosão durante eventos de chuva intensa. As partículas angulosas e não coesas, principalmente cascalhos e areias, favorecem a geração de fluxos de detritos em encostas íngremes, configurando uma paisagem de elevada erosividade, característica de regiões áridas.

A dinâmica dos fluxos de detritos nesta região árida desempenha um papel fundamental na configuração da paisagem e representa riscos geológicos significativos. Compreender esses processos é essencial para o planejamento e a gestão de riscos na região de Atacama, contribuindo para a mitigação de desastres naturais em áreas vulneráveis à erosão e ao transporte sedimentar.

Referências

- ANTONI, S. et al. Granulometric analysis of Lampuuk-Lhoknga Beach, Aceh Province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 348, n. 1, p. 012117, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/348/1/012117>.
- BIN, W. H.; MING, H. S. An improved mathematical model for geological analysis of debris flow. *Journal of Geography and Geology*, v. 6, n. 1, p. 129, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5539/jgg.v6n1p129>.
- BLASIO, F. V. D. *Non-Newtonian fluids, mudflows, and debris flows: a rheological approach*. Dordrecht: Springer, 2011. p. 89. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1122-8_4.
- CAMARGO, M. G. SysGran: um sistema de código aberto para análises granulométricas do sedimento. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36, n. 2, p. 371-378, 2006.
- GONÇALVES, G. M. S. et al. Granulometria do sedimento de fundo do canal São Gonçalo na região do Porto de Pelotas. *Revista Ambientale*, v. 13, n. 2, p. 60, 2021. DOI: <https://doi.org/10.48180/ambientale.v13i2.296>.
- GONZÁLEZ, A.; MATTAR, C.; SEPÚLVEDA, H. H. Análisis de los forzantes climáticos y antropogénicos en la reducción de agua en la cuenca del río Copiapó, Chile (28° S) utilizando productos satelitales. *Revista de Teledetección*, n. 63, p. 53-63, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4995/raet.2024.20047>.
- GUTIÉRREZ, J. P. et al. Natural recovery of infiltration capacity in simulated bank filtration of highly turbid waters. *Water Research*, v. 147, p. 299, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.009>.
- HAAS, T. de; WOERKOM, T. van. Bed scour by debris flows: experimental investigation of effects of debris-flow composition. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 41, n. 13, p. 1951, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3963>.
- HU, W. et al. Sensitivity of the initiation and runoff of flowslides in loose granular deposits to the content of small particles: an insight from flume tests. *Engineering Geology*, v. 231, p. 34, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.10.001>.
- HÜRLIMANN, M. et al. Debris-flow monitoring and warning: review and examples. *Earth-Science Reviews*, v. 199, p. 102981, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102981>.
- IVERSON, R. M.; GEORGE, D. L. A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy. *Proceedings of the Royal Society A*, 2023. DOI: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2013.0819>.
- IZQUIERDO, T. et al. Historical catastrophic floods at the southern edge of the Atacama Desert: a multi-archive reconstruction of the Copiapó river extreme events. *Global and Planetary Change*, v. 236, p. 104411, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2024.104411>.
- JAAPAR, A. R. et al. The emerging widespread debris flow disasters in tropical terrain of Peninsular Malaysia: understanding the risk and policy intervention. *E3S Web of Conferences*, v. 415, p. 5008, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341505008>.

-
- LLORENTE, V. J.; PADILLA, E. M.; DíEZ-MINGUITO, M. Non-newtonian wind-driven flows in homogeneous semiencloded basins. *arXiv* (Cornell University), 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2306.07624>.
- LÓPEZ, J. C.; TOLEDO, M. Á.; MOYA, R. M. A unified view of nonlinear resistance formulas for seepage flow in coarse granular media. *Water*, v. 13, n. 14, p. 1967, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13141967>.
- OUYANG, C. et al. An example of a hazard and risk assessment for debris flows: a case study of Niwan Gully, Wudu, China. *Engineering Geology*, v. 263, p. 105351, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105351>.
- PELLEGRINO, A.; SCHIPPA, L. Rheological modeling of macro viscous flows of granular suspension of regular and irregular particles. *Water*, v. 10, n. 1, p. 21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10010021>.
- PRANOTO, W. A.; SUBARI, M. Study of sediment transport discharges of Citarum River, West Java in laboratory. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 650, n. 1, p. 012059, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/650/1/012059>.
- SIVAK, E.; VOLKOVA, S. N. Transformation of land resources as a result of anthropogenic impact. *E3S Web of Conferences*, v. 175, p. 6002, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017506002>.
- WU, H.; HE, N.; ZHANG, X. Numerical model of viscous debris flows with depth-dependent yield strength. *Journal of GeoEngineering*, v. 10, n. 1, p. 1, 2015. DOI: [https://doi.org/10.6310/jog.2015.10\(1\).1](https://doi.org/10.6310/jog.2015.10(1).1).
- WU, X. et al. Discontinuity in equilibrium wave-current ripple size and shape caused by a winnowing threshold in cohesive sand-clay beds. *Earth and Space Science Open Archive*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/essoar.10508217.1>.
- ZAINOL, M. R. R. M. A.; AWAHAB, M. K. Hydraulic physical model of debris flow for Malaysia case study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 374, p. 012067, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012067>.