



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e
Território

Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Engenharia Civil de Infraestrutura

**MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS AO INÍCIO DE CORRIDA
DE DETRITOS USANDO TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO –
CASO DE MIRAVE, PERU**

MARIANA BOELTER DOS SANTOS

Foz do Iguaçu, PR

2024



Ministério da Educação
Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e
Território

Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura
Engenharia Civil de Infraestrutura

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS AO INÍCIO DE CORRIDA
DE DETRITOS USANDO TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO –
CASO DE MIRAVE, PERU

MARIANA BOELTER DOS SANTOS

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^o. Dr^o. Julio Cesar Bizarreta Ortega

Coorientador: Prof^o. M^o. Mara Rubia Silva

Foz do Iguaçu, PR

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais por sempre acreditarem e confiarem em mim. Agradeço por todo o amor, carinho e respeito com que sempre me ensinaram, e por todas as lições preciosas que levarei comigo para sempre. Sei que as coisas nunca foram fáceis para vocês, mas obrigada por fazerem de tudo para que nada me faltasse e por acreditarem que sempre dá para 'dar um jeito'. Por tudo, muito obrigada. Sem vocês, nada disso faria sentido.

Agradeço aos meus orientadores, Julio e Mara, pela paciência, compreensão e disponibilidade. Agradeço também a todo corpo docente e servidores da UNILA, que fazem universidade acontecer. Durante essa jornada, conheci profissionais incríveis e levarei lições valiosas para minha carreira profissional

Agradeço à minha família, em especial as minhas irmãs Lu e Cris que sempre torceram muito por mim ao longo desses anos. Cris me deu a oportunidade de um lugar para morar no início da minha jornada em Foz do Iguaçu, e por isso serei sempre grata.

Agradeço aos amigos e colegas que a UNILA me proporcionou, que tornaram meus dias na faculdade mais felizes e com os quais compartilho boas lembranças: Andres, Isa, João, Juan, Mateus e Rafa. Agradeço também a bateria Fúria Latina, que por diversas vezes foi um alívio em meio ao caos.

Agradeço aos meus amigos mais antigos, 'OLAR', que me acompanham desde antes de tudo isso. Obrigada, Agda, Cabelo, Escura, Gabe, Isa, Jes, Lena e Lucas, por todo o incentivo, por sempre acreditarem na minha capacidade nas inúmeras vezes em que pensei que não conseguiria e considerei desistir. Obrigada por tudo. De alguma forma, tenho certeza de que, mesmo que tudo na minha vida mude, vocês sempre estarão presentes.

Agradeço a todos que, nos últimos meses e anos, têm sido meu suporte em inúmeras situações, garantindo pausas necessárias da rotina para dar um respiro e lembrar que a vida tem coisas que valem a pena ser vividas, seja com conversas, desabafos ou simplesmente uma companhia. Obrigada, Carlos, Gab, Giovanna, Josi, Jenni, Ju, Laurinha, Thai e Tom. Obrigada por todo amor e carinho de sempre! <3

RESUMO

O uso de ferramentas de geoprocessamento em conjunto com análises geotécnicas permite o desenvolvimento de mapas de suscetibilidade à ocorrência de processos gravitacionais de massa. Este estudo foi realizado na região de Mirave, Peru, local onde ocorreram corridas de detritos em 2015 e 2019. A pesquisa sobre as características geomorfológicas é fundamental para identificar pontos suscetíveis ao início dos movimentos de massa e pode evitar danos estruturais e tragédias humanas. Dentre os processos gravitacionais de massa, destaca-se o fenômeno de corrida de detritos, por apresentar consequências mais catastróficas se comparado aos outros movimentos de massa. Isso se deve a característica do material constituinte ser semelhante a um líquido viscoso e, como consequência, apresenta comportamento hidrodinâmico. Foram confeccionados os mapas da área estudada a partir do processamento do modelo digital de elevação *Copernicus WorldDEM-30* e dados geomorfológicos da região de interesse, no *software* de geoprocessamento QGIS. Com a utilização de técnicas de geoprocessamento foi possível delimitar a bacia de drenagem em que a região de estudo está inserida, e os mapas temáticos que caracterizam a região. Depois disso, considerando o comportamento dos processos de gravitação de massa, foi aplicada a metodologia AHP (*Analytic Hierarchy Process*) para ponderar os pesos de cada mapa temático no mapa de suscetibilidade final, permitindo uma análise mais precisa e integrada. A partir dos resultados do estudo, observou-se a forte influência da geologia, elevação e declividade do terreno na suscetibilidade ao início da corrida de detritos. Por fim, ao comparar o mapa gerado com cicatrizes deixadas pelo último evento de corrida de detritos de 2019, verificou-se que essas cicatrizes estão localizadas em áreas de maior suscetibilidade.

Palavras-chave: corrida de detritos, geoprocessamento, mapeamento.

RESUMEN

El uso de herramientas de geoprocésamiento junto con análisis geotécnicos permite el desarrollo de mapas de susceptibilidad a la ocurrencia de procesos gravitacionales de masa. Este estudio se realizó en la región de Mirave, Perú, donde ocurrieron corridas de detritos en 2015 y 2019. La investigación sobre las características geomorfológicas es fundamental para identificar puntos susceptibles al inicio de los movimientos de masa y puede ayudar a prevenir daños estructurales y tragedias humanas. Entre los procesos gravitacionales de masa, destaca el fenómeno de corrida de detritos, por presentar consecuencias más catastróficas en comparación con otros movimientos de masa. Esto se debe a que el material constitutivo se comporta de manera similar a un líquido viscoso, lo que resulta en un comportamiento hidrodinámico. Se confeccionaron los mapas del área a estudiar a partir del procesamiento del modelo digital de elevación Copernicus WorldDEM-30 y de los datos geomorfológicos de la región de interés, utilizando el software de geoprocésamiento QGIS. Con la utilización de técnicas de geoprocésamiento, fue posible delimitar la cuenca de drenaje que afecta a la región en estudio y, además, producir los mapas temáticos que caracterizan la zona. Después de esto, considerando el comportamiento de los procesos gravitacionales de masa, se aplicó la metodología AHP (Proceso de Análisis Jerárquico) para ponderar los pesos de cada mapa temático en el mapa de susceptibilidad final, permitiendo un análisis más preciso e integrado. A partir de los resultados del estudio, se observó la fuerte influencia de la geología, la elevación y la inclinación del terreno en la susceptibilidad al inicio de la corrida de detritos. Por último, al comparar el mapa generado con las cicatrices dejadas por el último evento de corrida de detritos en 2019, se verificó que estas cicatrices están localizadas en áreas de mayor susceptibilidad.

Palabras clave: flujo de escombros, geoprocésamiento, cartografía.

ABSTRACT

The use of geoprocessing tools in conjunction with geotechnical analyses enables the development of susceptibility maps for mass gravitational processes. This study was conducted in the region of Mirave, Peru, where debris flows occurred in 2015 and 2019. Research on geomorphological characteristics is crucial for identifying areas susceptible to the initiation of mass movements and can help prevent structural damage and human tragedies. Among the gravitational mass processes, debris flow stands out for its more catastrophic consequences compared to other mass movements. This is due to the characteristic of the material, which behaves similarly to a viscous liquid, resulting in hydrodynamic behavior. The maps for the study area were created by processing the Copernicus WorldDEM-30 digital elevation model and geomorphological data of the region using the QGIS geoprocessing software. By using geoprocessing techniques, it was possible to delineate the drainage basin affecting the study area and produce thematic maps that characterize the region. Subsequently, considering the behavior of mass gravitational processes, the AHP (Analytic Hierarchy Process) methodology was applied to weigh each thematic map's influence on the final susceptibility map, allowing for a more precise and integrated analysis. Based on the study results, it was observed that geology, elevation, and slope have a strong influence on the susceptibility to debris flow initiation. Finally, comparing the generated map with the scars left by the last debris flow event in 2019, it was found that these scars were located in areas of higher susceptibility.

Keywords: debris flow, geoprocessing, mapping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil de encosta, com talude natural, de corte e de aterro.....	11
Figura 2 - Elementos geométricos de um talude.	12
Figura 3 – Diferentes tipos de movimento de massa.....	13
Figura 4 - Corrida de detritos na região serrana do Rio de Janeiro, 2011	15
Figura 5 - Tipos de curvatura que formam o relevo	17
Figura 6 - Localização bacia Mirave	18
Figura 7 - Afloramento da Formação Paralaque.....	19
Figura 8 - Formações Moquegua Inferior e Moquegua Superior	21
Figura 9 - Modelo de Análise Hierárquica AHP.	23
Figura 10 – Geologia da bacia de Mirave	26
Figura 11 - Utilização do método AHP	30
Figura 12 - Esquema da geração do mapa de suscetibilidade a partir dos mapas temáticos.....	31
Figura 13 - Mapa de Declividade.....	32
Figura 14 - Mapa Hipsométrico	34
Figura 15 - Mapa de Orientação de Vertente	35
Figura 16 - Mapa de curvatura vertical	36
Figura 17 - Mapa de curvatura horizontal.....	36
Figura 18 - Mapa final de suscetibilidade à ocorrência do início de corrida de detritos	40
Figura 19 - Comparação entre cicatrizes de eventos anteriores e mapa de suscetibilidade.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação e caracterização dos principais tipos de movimentos de massa.....	14
Tabela 2 - Escala numérica de importância Saaty.....	27
Tabela 3 - Distribuição das comparações na matriz de decisão.....	27
Tabela 4 - Matriz de Decisão Normalizada	28
Tabela 5 - Valores de Índice Randômico IR	29
Tabela 6 - Proporção e área das classes de declividade na bacia	33
Tabela 7 - Proporções das formações geológicas na bacia	37
Tabela 8 - Tabela dos pesos distribuídos individualmente em cada classe.....	38
Tabela 9 - Matriz de decisão.....	39
Tabela 10 - Matriz de Decisão Normalizada	39
Tabela 11 - Proporções das classes de suscetibilidade ao início de corrida de detritos ao longo da bacia	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	8
2 OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo Geral	10
2.2 Objetivos Específicos	10
3 síntese da bibliografia fundamental.....	11
3.1 Movimentos de Massa	11
3.2 Classificação de Movimento de Massa	12
3.3 Corrida de Detritos	14
3.4 Início de Corrida de Detritos (Mecanismos)	15
3.5 Suscetibilidade ao Início de Corrida de Detritos.....	16
3.6 Corrida de Detritos em Mirave- Perú.....	18
3.6.1 Geomorfologia Regional.....	18
3.6.1.1 Formação Paralaque.....	19
3.6.1.2 Formação Moquegua Inferior	19
3.6.1.3 Formação Moquegua Superior	20
3.6.1.4 Depósitos Aluviais	21
3.7 Técnicas de Geoprocessamentos Aplicado ao Mapeamento de Movimentos de Massa (teoria)	21
3.8 Análise Multicritério – Uso do Processo Analítico Hierárquico (AHP)	22
4 MeTODologia	24
4.1 Levantamento dos mapas temáticos da área de estudo	24
4.1.1 Mapa da formação geológica	25
4.2 Processo Analítico Hierárquico (AHP).....	26
4.3 Mapa final de suscetibilidade à ocorrência de fluxo de detritos.....	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1 Caracterização da Área de Estudo.....	32
5.1.1 Declividade.....	32
5.1.2 Altimetria do Terreno	33
5.1.3 Orientação de Vertente	34
5.1.4 Curvaturas do Terreno	35
5.1.5 Geologia.....	37

5.2 Mapa de Suscetibilidade à Corrida de Detritos	37
5.3 Discussão dos Resultados	41
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
7 Referências	45

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Desastres naturais que envolvem movimentos de massa podem gerar diversas consequências desfavoráveis sobre regiões habitadas, causando a destruição de estruturas e vítimas fatais de soterramentos. Segundo a classificação feita por Cruden e Varnes (1996), os principais tipos de movimento de massa são: desabamento, tombamento, deslizamento, expansão lateral e corridas. Este trabalho terá enfoque no processo de corrida de detritos, com aplicação na região de Mirave, Peru.

As corridas de detritos geralmente ocasionam consequências mais graves se comparadas aos outros tipos de movimento de massa. Isso se deve à maior proporção de água presente no material, que confere um comportamento hidrodinâmico que amplia a capacidade de transporte de grandes volumes de material, com maior alcance e maior impacto. A ocorrência de corrida de detritos tem relação com chuvas intensas e repentinas, e tem a potencialidade de causar danos irreparáveis para a vida humana e a para o meio ambiente, como exemplificado no verão de 2011 na Região Serrana do Rio de Janeiro (RJ), que gerou mais de 1.000 mortos e cerca de 8.000 desalojados (DIAS, 2016).

A região de Mirave, no Peru, apresenta uma vulnerabilidade geográfica e climática significativa, tornando a realização de estudos específicos sobre corridas de detritos essencial para a mitigação de riscos. Mirave já sofreu eventos críticos de corrida de detritos, sendo os mais recentes ocorridos em 2015 e 2019, evidenciando a necessidade de pesquisa na área. A topografia acidentada, aliada a um clima que favorece chuvas intensas, aumenta a propensão a movimentos de massa, especialmente porque a região está localizada nas áreas de trânsito e deposição dos fluxos de detritos, colocando em risco a vida e a infraestrutura local (SAVIO *et. al.*, 2019).

Com o uso de tecnologias de geoprocessamento é possível realizar o mapeamento de áreas suscetíveis aos movimentos de massas, pois permite fazer uma análise mais precisa dos riscos CHEN *et. al.* (2015). Para tanto, o mapeamento de áreas suscetíveis aos processos gravitacionais de massa contribui para a identificação dos locais mais propícios ao início, além de auxiliar os governantes na tomada decisões de políticas públicas envolvendo as populações em risco. E também, com o uso de ferramentas como o Processo Analítico Hierárquico (AHP), criado por SAATY em 1980, que facilita a avaliação dos múltiplos fatores que influenciam esses movimentos. O AHP possibilita a ponderação sistemática de critérios diversos, como

declividade, hipsometrias geologia entre outros, contribuindo para a elaboração de mapas temáticos que indicam com maior precisão as áreas de maior risco. Neste estudo foi utilizado ferramentas de geoprocessamento e AHP para mapear as áreas suscetíveis ao início de corrida de detritos em Mirave-Peru.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Mapear as áreas suscetíveis ao início de corrida de detritos em Mirave-Peru, a partir dos dados a partir das características geomorfológicas e geológicas da região, utilizando técnicas de geoprocessamento e AHP.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar questão dos movimentos de massa, com enfoque em corrida de detritos.
- Delimitar a bacia de drenagem e gerar mapas temáticos característicos da área de estudo;
- Empregar Processo Analítico Hierárquico (AHP) para ponderar e combinar diferentes mapas característicos da área de estudo para gerar um mapa final de suscetibilidade.

3 SÍNTESE DA BIBLIOGRAFIA FUNDAMENTAL

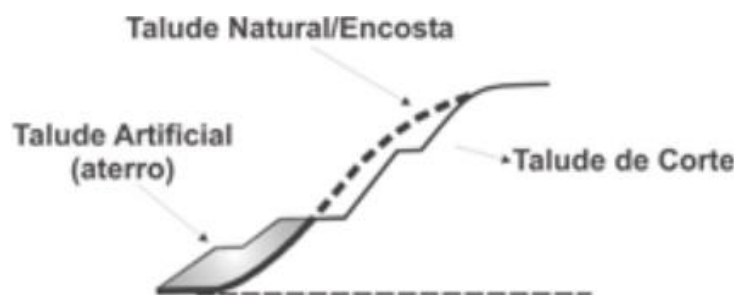
O estudo teórico deste trabalho inicia-se no entendimento do que são movimentos de massa, e suas classificações com enfoque em fluxo de detritos e os mecanismos de início deste processo. Após isso abordou-se as técnicas de geoprocessamento aplicadas a fluxo de detritos, bem como fatores que servem de alerta para a suscetibilidade do fenômeno. A parte final da revisão trata da área de estudo, região de Mirave-Peru, bem como aborda a análise de multicritério aplicada em geoprocessamento.

3.1 Movimentos de Massa

Os movimentos de massa são processos gravitacionais erosivos que geram o deslocamento de materiais em encostas sob uma determinada inclinação. Estes fenômenos são ocasionados principalmente pela ação direta da gravidade, e a contribuição de outro meio, como a água oriunda de precipitações intensas que resulta na redução da resistência dos materiais presentes nas encostas a partir da indução do comportamento plástico e fluido dos solos (TOMINAGA *et al.*, 2009).

As encostas (ou taludes) são superfícies inclinadas de um maciço de solo ou rocha que caracterizam a superfície da Terra, tendo sua origem em forças internas e externas por meio de agentes geológicos, climáticos, biológicos e humanos. Existem três principais tipos de taludes: natural, de corte e de aterro, apresentados na Figura 1. Os taludes naturais são formados por maciços terrosos, rochosos ou mistos, oriundos de agentes naturais. Em contrapartida, os demais são fruto de agentes não naturais, sendo que o talude de corte resulta de um processo de escavação e o de aterro resulta de um acúmulo de materiais, como solo, rocha e rejeitos industriais ou de mineração (IPT, 2007).

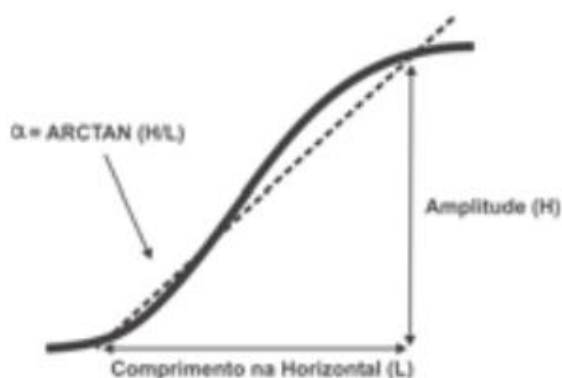
Figura 1 - Perfil de encosta, com talude natural, de corte e de aterro.



Fonte: IPT (2007).

Dentre os elementos geométricos de um talude, os principais são a inclinação, a amplitude e o comprimento horizontal, dispostos conforme a figura 2. A inclinação é o ângulo entre a encosta e o eixo horizontal do talude, e podemos denominá-la declividade.

Figura 2- Elementos geométricos de um talude.



Fonte: IPT (2007).

3.2 Classificação de Movimento de Massa

Com relação a classificação dos movimentos de massa, uma das primeiras tentativas foi a de SHARPE (1938), que correlacionou o tipo de movimento, velocidade e material a ser transportado. Em 1984 GUIDICINI e NIEBLE, considerando a classificação de Sharpe simplificada, adicionaram fatores como o ambiente geomorfológico e climático. Segundo LISTO *et al.*, (2021), inúmeras classificações foram desenvolvidas, sendo consideradas de destaque em âmbito internacional a de Varnes (1978), Crozier (1986), Hutchinson (1986) e Selby (1993), já em âmbito nacional, as classificações de destaque são as de Guicidini e Nieble (1984), IPT (1991) e Augusto Filho (1992).

Uma das principais classificações é a proposta por CRUDEN e VARNES (1996), que divide os movimentos em 5 principais tipos: Quedas (*Fall*), Tombamentos (*Topple*), Escorregamentos (*Slide*), Expansões laterais (*Spread*) e Corridas (*Flow*). Esta classificação considera como tipos de materiais a rocha, uma massa dura que se encontrava intacta antes do movimento, e o solo, constituído de um agregado de partículas sólidas, geralmente de minerais e rochas, que foram deslocadas ou sofreram com intemperismo. O solo pode ser dividido entre terra, composta por cerca

de 80% de partículas menores que 2mm, e detrito, composto por material mais grosso, com cerca de 20 a 80% de partículas maiores que 2 mm. A Figura 3 mostra os esquemas dos diferentes tipos de movimentos descritos por Cruden e Varnes.

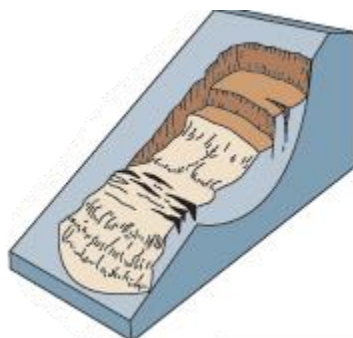
Figura 3 – Diferentes tipos de movimento de massa.



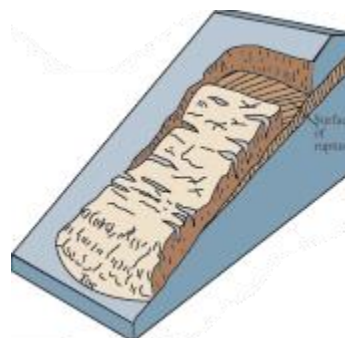
A - Queda



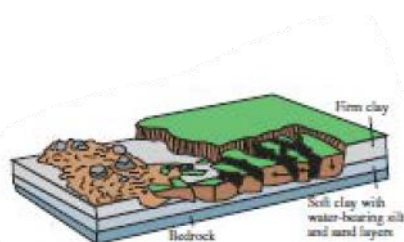
B – Tombamento



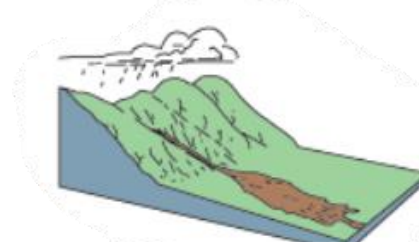
C – Escorregamento rotacional



D – Escorregamento translacional



E – Expansão Lateral



F – Corrida de detritos

Fonte: Adaptado de USGS (2004).

Considerando a realidade de países tropicais como Brasil e Peru, FILHO (1994) descreve os quatro processos gravitacionais mais recorrentes, sendo eles: rastejos, escorregamento, quedas e corridas, conforme descritos na Tabela 1 - Classificação e caracterização dos principais tipos de movimentos de massa.

Tabela 1 - Classificação e caracterização dos principais tipos de movimentos de massa

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO, MATERIAL E GEOMETRIA
Rastejos	<ul style="list-style-type: none"> - Vários planos de deslocamentos (internos); - Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade; - Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; - Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada; - Geometria indefinida.
Escorregamentos	<ul style="list-style-type: none"> - Poucos planos de deslocamento (externos); - Velocidades médias (m/h) e altas (m/s); - Pequenos a grandes volumes de material; - Geometria e materiais variáveis: <ul style="list-style-type: none"> - Planares: solos poucos espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; - Circulares: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; - Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza.
Quedas	<ul style="list-style-type: none"> - Sem planos de deslocamento; - Movimentos de queda livre ou rolamento em plano inclinado; - Velocidades muito altas (vários m/s); - Material rochoso; - Pequenos à médios volumes; - Geometria variável: lascas, placas, blocos, entre outros; - Rolamento de matacão e tombamento.
Corridas	<ul style="list-style-type: none"> - Muitas superfícies de deslocamentos (internas e externas à massa em movimentação); - Movimentos semelhantes ao de um líquido viscoso; - Desenvolvimento ao longo das drenagens; - Velocidades médias a altas; - Mobilização de solo, rocha, detritos e água; - Grandes volumes de material; - Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

Fonte: FILHO (1994).

3.3 Corrida de Detritos

Embora as corridas de detritos não sejam tão comuns quanto os escorregamentos, o fenômeno destaca-se devido seu elevado alcance e potencial destrutivo, podendo assim causar relevantes impactos ambientais e danos humanos. A principal diferença entre a corrida de detritos e os outros tipos de movimentos de massa é a expressiva existência de material aquoso, necessitando de análise dinâmica tanto em relação à mecânica dos solos quanto à mecânica de fluídos.

Segundo GUIDICINI E NIEBLE (1984), o fenômeno de corrida de detritos, ou corridas, é uma forma rápida de escoamento, com características hidrodinâmicas ocasionadas pela perda de atrito interno, resultado da destruição da estrutura, em presença de água em excesso.

GRAMANI (2001), descreve as corridas de detritos como movimentos de sólidos e fluídos, contendo alta concentração de sólidos de diversos tamanhos, adotando um comportamento líquido devida à concentração de água, e atuando sob ação da gravidade.

Segundo BRESSANI *et. al.* (2005), precipitações intensas atípicas, associadas a tempos de recorrência de 20 anos ou mais, geram um número de rupturas em taludes maior do que o observado normalmente, além de uma sobrecarga de vazão nas redes de drenagem. Tais situações estão diretamente associadas a corridas de detritos. Um exemplo é o caso da região serrana do Rio de Janeiro, que sofreu com este problema em 2011, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Corrida de detritos na região serrana do Rio de Janeiro, 2011



Fonte: VIEIRA (2011, apud DIAS *et al.*, 2016)

3.4 Início de Corrida de Detritos (Mecanismos)

A origem da corrida de detritos está normalmente associada a inundações bruscas, que geram deflagrações em redes de drenagem, a partir da movimentação dos materiais depositados nos canais e em suas margens. Este fenômeno também

pode ocorrer a partir da transformação do material de escorregamentos em um material saturado, como consequência de precipitações intensas, dando características viscosas ao material, e aumentando sua velocidade. Além de escorregamentos, as quedas são outro tipo de movimento de massa que pode gerar a transformação de um material em viscoso, pois a caída de blocos sob um material saturado ou parcialmente saturado pode gerar a liquefação do mesmo, transformando-o em um potencial material pertencente a corrida de detritos (LISTO *et. al.* 2021). Processos de erosão nas encostas também têm uma influência significativa no início da formação do fenômeno, especialmente em áreas com litologias mais susceptíveis à erosão (BIZARRETA - ORTEGA, 2022).

3.5 Suscetibilidade ao Início de Corrida de Detritos

Segundo GUZZETI *et. al.* (2006), a suscetibilidade é a probabilidade de um determinado fenômeno ocorrer em uma área, considerando os fatores intrínsecos ao terreno. A suscetibilidade ao início de corridas de detritos em Mirave foi determinada por meio de diversos fatores que influenciam diretamente os movimentos de massa da região, em uma situação de precipitação intensa, esses fatores são a hipsometria, declividade, curva horizontal e vertical, orientação de vertentes e geologia.

A consideração dos índices morfométricos é fundamental para estudos que envolvem análise de bacias hidrográficas, risco de erosão, suscetibilidade a deslizamentos e fluxos de detritos, entre outros fenômenos naturais. Esses índices permitem avaliar as características físicas do relevo e do sistema de drenagem, influenciando diretamente o comportamento hidrológico da região. Autores como Wilford *et al.* (2004) utilizaram análise de índices morfométricos para realização de seus estudos.

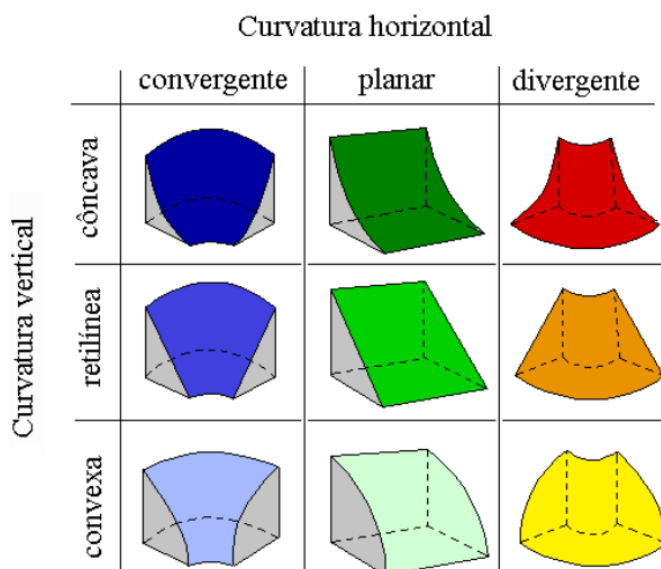
Segundo GARCIA (2015, Apud. Evans, 1972), a hipsometria se trata de um valor pontual da superfície terrestre acima do nível do mar. A hipsometria reflete as diferenças de altitude, desempenha um papel importante, pois regiões com maiores elevações apresentam maior propensão a processos gravitacionais.

A declividade do terreno representa a inclinação da superfície do terreno. É fundamental para a análise, pois a medida que o ângulo da declividade aumenta, a energia potencial da água da chuva é rapidamente convertida em energia cinética. Isso resulta em maior velocidade do fluxo de água, intensificando sua capacidade de

transportar sedimentos e materiais, o que contribui para processos erosivos e de escoamento. (PEREIRA; THOMAZ, 2013, apud Silveira, 2016).

A curvatura do terreno é dividida entre curvatura horizontal, que expressa o formato da vertente quando observada em projeção horizontal, e a curvatura vertical, que expressa o formato da vertente quando observada em perfil (VALERIANO, 2008). As curvaturas são divididas conforme a Figura 75, e afetam diretamente o acúmulo de água e materiais: áreas com curvatura côncava e convergente são mais propensas a acumular fluxos, o que eleva o risco de ocorrência de corridas de detritos.

Figura 5 - Tipos de curvatura que formam o relevo



. Fonte: Adaptado de Dikau (1990)

A orientação das vertentes refere-se ao ângulo azimutal que corresponde à maior inclinação de uma superfície de terreno em direção ao seu declive, e é medida em graus, que variam de 0° a 360° (VALERIANO, 2008). Além disso, as orientações de vertente influenciam o comportamento dos fluxos, uma vez que encostas voltadas para direções com menos contato ao sol estão mais expostas à retenção de umidade e erosão.

Por fim, a geologia da área, que compreende diferentes formações sedimentares e vulcânicas, tem um impacto direto na resistência dos materiais, sendo as formações mais frágeis ou suscetíveis a erosão um fator determinante na ocorrência de movimentos de massa.

3.6 Corrida de Detritos em Mirave- Perú

A bacia de Mirave fica localizada na região de Tacna do deserto de Sechura-Atacama, no lado oeste da Cordilheira dos Andes e do Oceano Pacífico, conforme a Figura 6. Essa área se trata de uma zona com bacias áridas, compostas por diversos rios secos durante extensos períodos. Chuvas intensas em curtos espaços de tempo podem fazer com que as bacias se tornem ativas, ocasionando a corrida de detritos. A geomorfologia local facilita a movimentação de massa em forma de corrida, devido as montanhas altas, encostas íngremes e zonas áridas com solo e rochas suscetíveis ao desmembramento pela água da chuva. No entanto, foram observados somente dois casos recentes de corrida de detritos em Mirave, um em 2015 e outro em 2019 (BIZARRETA-ORTEGA, 2022).

Figura 6 - Localização bacia Mirave



Fonte: Autora.

3.6.1 Geomorfologia Regional

Segundo MARTÍNEZ e ZULOAGA (2000), ao sul do Peru encontra-se a extensa bacia sedimentar de Moquegua. Geologicamente, suas formações são antigas, datando do Jurássico Superior até o Neógeno. A área apresenta uma

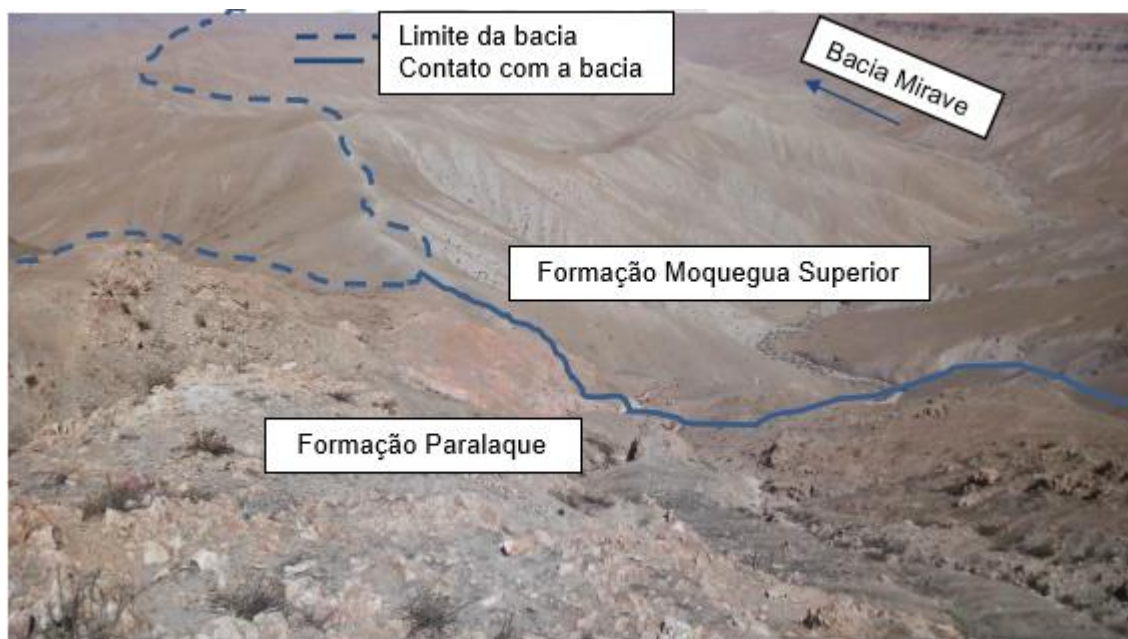
complexidade estrutural e vulcânica significativa, o que influencia os processos de erosão e deposição de materiais na região. Na microbacia de Mirave, as principais formações incluem a Formação Paralaque, localizada na parte superior esquerda da bacia, e a Formação Moquegua, que se divide em Moquegua Inferior e Moquegua Superior, que cobre o restante da microbacia.

3.6.1.1 Formação Paralaque

A Formação Paralaque está dentro do grande Grupo Toquepala, onde estão inclusas também a Formação Inogoya, Formação Quellaveco e a Formação Toquepala. Essa formação é datada do Cretáceo superior, e consiste em uma grossa sucessão de rochas vulcânicas, principalmente andesitos e ignimbritos. (PINO *et al.* 2004).

Na microbacia de Mirave, a formação Paralaque está presente na região superior direita e devido sua composição mais resistente, apresenta uma baixa suscetibilidade ao movimento de massas, conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Afloramento da Formação Paralaque



Fonte: BIZARRETA-ORTEGA (2018).

3.6.1.2 Formação Moquegua Inferior

A Formação Moquegua Inferior caracteriza-se por sua estratificação bem definida e sua coloração avermelhada. Essa formação reflete processos sedimentares

que ocorreram durante longos períodos de deposição, com camadas finas indicando um ambiente deposicional mais calmo e com aporte constante de sedimentos, e por essa razão é composta principalmente por sedimentos finos. (ACOSTA, 2004).

Segundo BIZARRETA-ORTEGA (2018, apud DECOUT ET AL., 2011), esta formação entraria no mesmo grupo do que o chamado Moquegua C, datado entre aproximadamente 30 a 15-10 milhões de anos e caracterizado como acúmulo de depósitos aluviais e contribuições de material vulcânico.

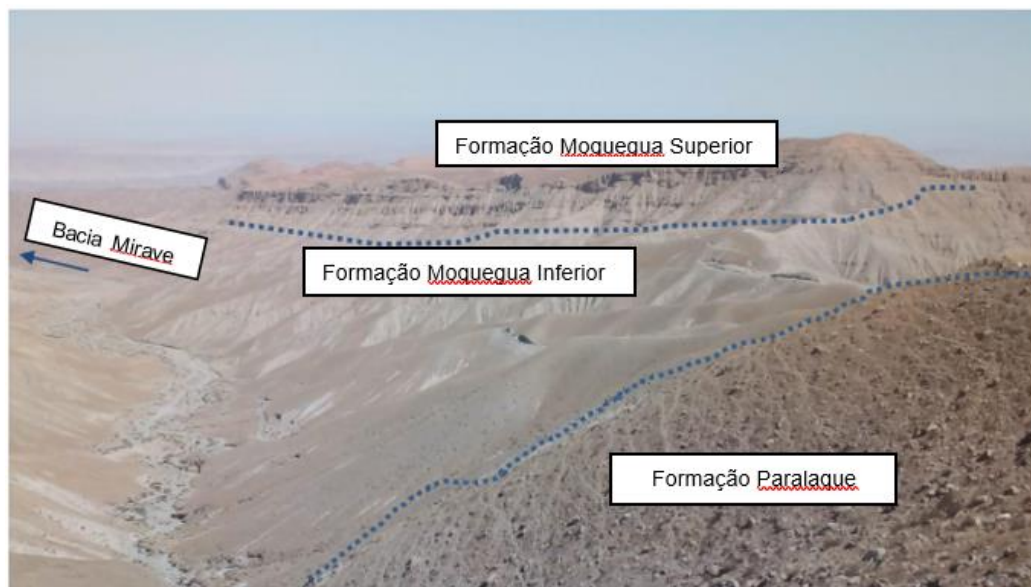
Depósitos aluviais com contribuições de material vulcânico geralmente apresentam uma propensão maior à suscetibilidade a fluxos de detritos. Essa combinação de materiais, especialmente se os depósitos aluviais forem finos e não consolidantes, pode facilitar a movimentação do solo durante eventos de chuva intensa

3.6.1.3 Formação Moquegua Superior

Composta por uma série de camadas sedimentares de origem continental, a Formação Moquegua Superior é originada das deposições na encosta do Pacífico da Cordilheira dos Andes. (ACOSTA, 2004, apud, PINO, 2003). Essa formação data de aproximadamente 18 milhões de anos, e é caracterizada como sendo conglomerados polimíticos, com clastos de seixos e arenitos espessos moderadamente estratificados, intercalados com níveis de tufos líticos nos níveis superiores (ADAMS 1906 apud MARTÍNEZ; ZULOAGA, 2000).

A diferença entre a Moquegua Superior e Inferior é facilmente perceptível devido as camadas sedimentares, conforme mostra a Figura 8. A presença de tufos líticos, que são rochas vulcânicas mais frágeis, pode criar áreas de fraqueza que, sob condições específicas de saturação e declividade, podem levar a movimentos de massa.

Figura 8 - Formações Moquegua Inferior e Moquegua Superior



Fonte: BIZARRETA-ORTEGA (2018).

3.6.1.4 Depósitos Aluviais

Os Depósitos Aluviais são fruto principalmente de movimentos de massa anteriores desencadeados por água, com material desagregado dos maciços rochosos da Formação Moquegua. Constituído por areias pedregosas ou cascalhos arenosos, encontrando-se também material argiloso limoso de coloração creme. Incluídos nesta unidade estão acumulações aluviais no sopé da encosta, terraços aluviais e cones de detritos (BIZARRETA-ORTEGA, 2018).

Material arenoso e cascalhento com uma matriz argilosa ou limosa pode se comportar de maneira instável em encostas íngremes, especialmente sob condições de saturação de água, como após fortes chuvas, que influencia no início da corrida de detritos.

3.7 Técnicas de Geoprocessamentos Aplicado ao Mapeamento de Movimentos de Massa (teoria)

O geoprocessamento é um conjunto de atividades que envolvem a métodos teóricos e computacionais, diretamente envolvidos na coleta, armazenamento, tratamento, análise e visualização de dados espaciais, fundamentais para o estudo de processos naturais como os movimentos de massa. (ZAIDAN, 2017). Essas técnicas permitem a integração de diferentes camadas de informações geográficas, para a

análise da suscetibilidade a deslizamentos e movimentos de massa em áreas vulneráveis.

O termo SIG - Sistema de Informações Geográficas, refere-se a uma tecnologia que integra o campo do geoprocessamento. Uma definição tradicional descreve o SIG como um sistema automatizado para a coleta, armazenamento, manipulação e apresentação de dados cartográficos (BURROUGH e MCDONNELL, 1998 apud ZAIDAN, 2017).

O Sensoriamento Remoto (SR) é fundamental para monitorar áreas em grandes escalas. Imagens de satélite, como as usadas para gerar o Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução, são processadas para fornecer informações detalhadas da superfície terrestre, permitindo a detecção de mudanças no terreno que podem indicar o risco de movimentos de massa. O uso de MDE's, como o modelo *Copernicus* empregue neste estudo, é amplamente utilizado para gerar mapas que caracterizam a geomorfologia da região de interesse (VALERIANO, 2008).

A metodologia da Embrapa para combinação de mapas pode ser aplicada na geração de mapas de suscetibilidade a fluxo de detritos, permitindo a integração de camadas temáticas, como características do solo, declividade, uso da terra, geologia e padrões de drenagem, para identificar áreas mais propensas a esses eventos (Avila, 2008). No processo, as informações de cada mapa temático são sobrepostas e ponderadas por meio de técnicas de SIG, com critérios específicos para cada variável que influencia a suscetibilidade, como a resistência do solo, a cobertura vegetal e a inclinação do terreno.

3.8 Análise Multicritério – Uso do Processo Analítico Hierárquico (AHP)

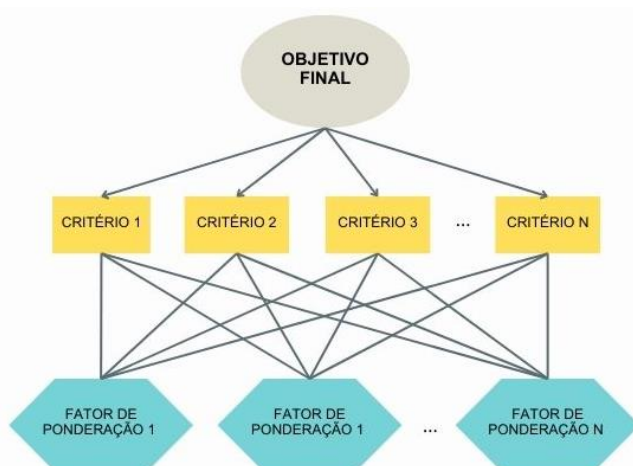
A Análise Multicritério é uma metodologia amplamente utilizada no campo do geoprocessamento, oferecendo uma abordagem eficiente para lidar com a complexidade e diversidade de dados espaciais em processos de tomada de decisão. Esse tipo de análise possibilita a padronização e integração de dados, que normalmente são provenientes de diversas fontes. Isso permite uma avaliação conjunta desses dados, promovendo maior eficiência e confiabilidade no processo de tomada de decisões (CORSEUIL, 2006).

Em um ambiente de SIG, a Análise Multicritérios envolve a combinação de diferentes camadas de informações, que precisam ser previamente hierarquizadas para que seja possível analisar um determinado fenômeno. Para essa hierarquização,

diversos métodos podem ser empregados, como a lógica Fuzzy, Delphi e Análise Hierárquica (AHP), entre outros (CARMO, 2016).

O método e *Hierarchical Analysis Process* (AHP), desenvolvido por Thomas Saaty, é uma das principais técnicas de Análise Multicritério aplicada ao geoprocessamento, principalmente em estudos de suscetibilidade a movimentos de massa. O processo de utilização do AHP, começa com a identificação de um problema de decisão, que é o objetivo final, que é posteriormente dividido em uma hierarquia composta por subproblemas menores e mais simples, que são os critérios (Figura 9). Cada subproblema pode ser analisado de forma isolada, facilitando a abordagem do problema principal (PINESE, 2012).

Figura 9 - Modelo de Análise Hierárquica AHP.



Fonte: Adaptado de Saaty

O AHP se baseia em uma matriz de comparações par a par, onde cada critério é comparado com os demais para determinar sua influência relativa. Nessa etapa, utilizam-se dados concretos ou julgamentos baseados no conhecimento empírico de especialistas sobre a importância relativa de cada elemento. Cada elemento recebe um peso numérico ou prioridade, permitindo que critérios diversos, muitas vezes de naturezas diferentes, sejam comparados. A partir dessas comparações, obtém-se uma matriz de decisão que é, então, normalizada para produzir os pesos que cada critério terá na análise final. No tópico de metodologia haverá uma explicação mais detalhada do uso do AHP.

4 METODOLOGIA

Inicialmente, será descrito o levantamento dos mapas da área de estudo, abordando as fontes de dados e os procedimentos utilizados para a obtenção das informações geomorfológicas e topográficas necessárias. Em seguida, será detalhado o Processo Analítico Hierárquico (AHP), que foi empregado para ponderar os critérios e subcritérios que influenciam a suscetibilidade. Por fim, será discutida a elaboração do mapa final de suscetibilidade, que integra os dados obtidos nas etapas anteriores e permite uma análise espacial das áreas de risco.

4.1 Levantamento dos mapas temáticos da área de estudo

O principal dado utilizado para gerar os mapas foi o Modelo Digital de Elevação (MDE) *Copernicus WorldDEM-30*, com resolução espacial de 30 metros, datado do dia 13/12/2010. Este modelo digital foi derivado dos dados da missão TanDEM-X, como parte do programa *Copernicus*, uma iniciativa da União Europeia para monitoramento da Terra. O *Copernicus* DEM está disponível no portal oficial *Copernicus* e foi obtido no formato *Tagged Image File Format* (.tif), amplamente utilizado para armazenar dados raster geoespaciais. O MDE importado corresponde à área geográfica S18W71, que abrange a região da área de estudo em Mirave, no sul do Peru. O arquivo foi posteriormente importado e processado no *software* QGIS, onde foram realizadas as etapas de visualização, análise e geração de produtos cartográficos.

Após a importação para o programa QGIS, o primeiro passo foi a delimitação da microbacia de contribuição à área de interesse. Esse processo foi realizado utilizando as ferramentas de manipulação de *raster* inclusas no GRASS GIS. As etapas desse processo incluem:

- a) Preenchimento de depressões: Para garantir um fluxo de água contínuo e correto na análise, foi aplicado o comando *r.fill.dir*, que preenche as depressões presentes no dado *raster*, evitando erros durante a análise hidrológica.
- b) Definição do exutório: Em seguida, foi utilizado o comando *r.water.outlet* para definir o exutório da microbacia, que representa o ponto de saída da água na região de Mirave. Esse passo é crucial para determinar o limite da área de contribuição.
- c) Delimitação da microbacia: Com o dado *raster* já processado e as depressões preenchidas, foi possível utilizar o comando *r.watershed* para delimitar a microbacia

de contribuição, permitindo identificar a área que drena para o exutório previamente definido.

Com a bacia delimitada, os mapas subsequentes foram gerados a partir do recorte do MDE na extensão dessa microbacia. O primeiro mapa criado foi o de hipsometria, que envolveu a reclassificação do MDE, permitindo uma visualização mais clara das variações altimétricas na área de estudo.

Em seguida, foi gerado o mapa de declividade, obtido por meio da aplicação da ferramenta *Declividade* no QGIS. A classificação foi realizada segundo as categorias da EMBRAPA (1979): Plano (0-3%), Suave Ondulado (3-8%), Ondulado (8-20%), Forte Ondulado (20-45%) e Montanhoso (45-75%) e Escarpado (acima de 75%).

Para a definição dos mapas de curvatura, foi utilizada a ferramenta *r.slope.aspect* no GRASS GIS, que permite calcular a curvatura vertical e horizontal do terreno. O mapa de curvatura vertical foi gerado pela opção *Profile Curvature* e reclassificado em três categorias: côncavo, retilíneo e convexo. O mapa de curvatura horizontal, por sua vez, foi obtido por meio da opção *Tangential Curvature* e reclassificado em divergente, planar e convergente.

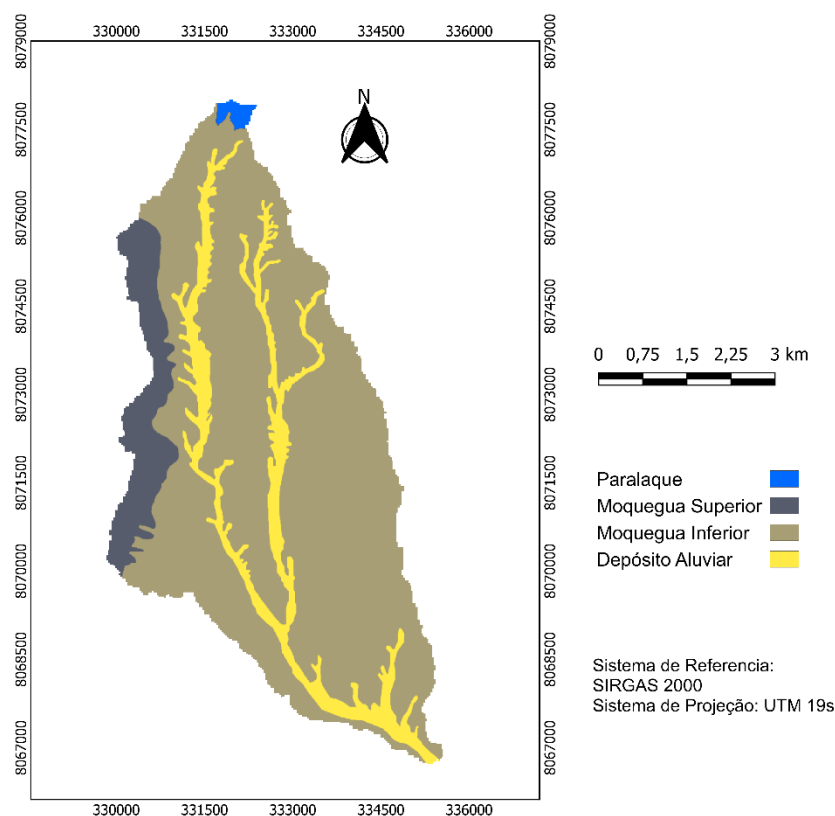
Além dos mapas de curvatura, com a ferramenta *r.slope.aspect* do GRASS GIS, foi possível gerar o mapa de orientação de vertente por meio da opção *Aspect*. A classificação da orientação de vertente foi realizada nas direções: Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste.

4.1.1 Mapa da formação geológica

O mapa geológico da área de estudo foi elaborado pelo professor Julio Cesar Bizarreta em conjunto com uma equipe de pesquisadores e colaboradores, como parte de um projeto da Universidad de Lima, denominado *Nueva metodología para la evaluación del riesgo de desastres por flujos detríticos (huaycos) de aplicabilidad nacional: estudio de caso - distrito de Ilabaya - Tacna*, realizado em 2018. Esse estudo incluiu visitas de campo, durante as quais foram obtidos registros fotográficos e resultados que subsidiaram a avaliação detalhada das condições geológicas locais.

A partir das visitas de campo realizadas, o estudo culminou na elaboração do mapa geológico apresentado na Figura 10 – Geologia da bacia de Mirave. Este mapa foi fundamental para a compreensão das condições geológicas da área de estudo e serviu como um dos principais mapas base para a execução do presente trabalho.

Figura 10 – Geologia da bacia de Mirave



Fonte: Adaptado de BIZARRETA-ORTEGA (2018).

4.2 Processo Analítico Hierárquico (AHP)

Os pesos parciais atribuídos a cada classe dos diferentes mapas foram definidos previamente, considerando a relevância de cada fator na dinâmica de fluxos de detritos. Esses pesos refletem a influência relativa de variáveis como declividade, curvatura, orientação de vertentes, entre outros, na suscetibilidade ao fluxo de detritos. Para integrar e combinar esses mapas de forma coerente, foi utilizado o método de Análise Hierárquica de Processos (AHP), permitindo a avaliação comparativa entre os fatores e gerando um resultado que considera a contribuição ponderada de cada critério.

No método AHP, os níveis de importância de cada critério são dispostos em uma matriz quadrada $n \times n$, onde as linhas e colunas representam os critérios selecionados para o estudo. A comparação entre os critérios é realizada de forma par a par, utilizando a escala de importância desenvolvida por Saaty (1980), que varia de 1 a 9, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Escala numérica de importância Saaty.

Definição	Intensidade de Importância
Extremamente preferido	9
Muito forte a extremo	8
Muito fortemente preferido	7
Forte a muito forte	6
Fortemente preferido	5
Moderado a forte	4
Moderadamente preferido	3
Igual a moderado	2
Igualmente preferido	1

Fonte: Adaptado de Saaty (2005).

A relação de reciprocidade é fundamental para garantir a consistência das comparações entre os critérios. Se um critério “a” for avaliado como tendo uma importância X vezes maior do que o critério “b”, então, reciprocamente, o critério “b” receberá um valor de importância inverso, ou seja, 1/X em relação ao critério “a”. Essa relação inversa assegura que as comparações sejam coerentes e proporcionais, permitindo a criação de uma matriz consistente e equilibrada no processo de decisão.

Após a comparação par a par, o próximo passo no processo AHP é a distribuição dos valores estabelecidos na matriz de decisão, conforme mostra a Tabela 3. Essa matriz é quadrada, com as linhas e colunas representando os critérios analisados. As células da matriz contêm os valores das comparações entre os critérios, baseadas na escala de importância estabelecida. É importante destacar que a diagonal principal da matriz sempre terá o valor 1,0, pois um critério comparado a si mesmo possui a mesma importância. Essa organização permite que os pesos finais sejam calculados de maneira consistente e objetiva.

Tabela 3 - Distribuição das comparações na matriz de decisão.

Matriz de Decisão					
Classe	a	b	c	d	n
a	1	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{1n}
b	$1/a_{12}$	1	a_{23}	a_{24}	a_{2n}
c	$1/a_{13}$	$1/a_{23}$	1	a_{34}	a_{3n}
d	$1/a_{14}$	$1/a_{24}$	$1/a_{34}$	1	a_{4n}
n	$1/a_{1n}$	$1/a_{2n}$	$1/a_{3n}$	$1/a_{4n}$	1

Fonte: Adaptado de Pinese (2012).

Após a distribuição dos pesos na matriz de decisão, é necessário fazer a normalização dessa matriz. Para normalizar uma matriz de decisão, primeiramente, somam-se os valores de todos os elementos de cada coluna a_{nn} individualmente, sendo a soma representada por S_n , conforme a Equação 1.

$$\begin{aligned}\sum a_{n1} &= S_1 \\ \sum a_{n2} &= S_2 \\ \sum a_{n3} &= S_3 \\ &: \\ \sum a_{nn} &= S_n\end{aligned}\quad \text{(Equação 1)}$$

Em seguida, cada elemento dentro de uma coluna é dividido pela soma dos elementos dessa mesma coluna, Tabela 4. Esse processo é repetido para todas as colunas, garantindo que os valores de cada coluna sejam convertidos em proporções relativas. A soma de cada linha dessa nova matriz $[B_{nn}]$ dividida pela ordem da matriz n , representa o Peso Processado P daquele critério, conforme a Equação 2. A somatória de todos os pesos encontrados deve ser igual a 1,0.

Tabela 4 - Matriz de Decisão Normalizada

Matriz de Decisão Normalizada $[B_{nn}]$						w_i
Classe	a	b	c	d	n	Peso Ponderado
a	$1/S_1$	$(a_{12})/S_2$	$(a_{13})/S_3$	$(a_{14})/S_4$	$(a_{1n})/S_n$	P_1
b	$(1/a_{12})/S_1$	$1/S_2$	$(a_{23})/S_3$	$(a_{24})/S_4$	$(a_{2n})/S_n$	P_2
c	$(1/a_{13})/S_1$	$(1/a_{23})/S_2$	$1/S_3$	$(a_{34})/S_4$	$(a_{3n})/S_n$	P_3
d	$(1/a_{14})/S_1$	$(1/a_{24})/S_2$	$(1/a_{34})/S_3$	$1/S_3$	$(a_{4n})/S_n$	P_4
n	$(1/a_{1n})/S_1$	$(1/a_{2n})/S_2$	$(1/a_{3n})/S_3$	$(1/a_{4n})/S_4$	$1/S_n$	P_n

Fonte: Adaptado de Pinese (2012).

$$\begin{aligned}\sum b_{1n}/n &= P_1 \\ \sum b_{2n}/n &= P_2 \\ \sum b_{3n}/n &= P_3 \\ &: \\ \sum b_{4n}/n &= P_n\end{aligned}\quad \text{(Equação 2)}$$

Em seguida, é realizado o cálculo de λ_{max} , valor que representa o maior valor do autovalor λ da matriz normalizada $[B_{nn}]$. Este cálculo é feito a partir da Equação 3, onde $[B_{nn}]$ é a matriz normalizada encontrada anteriormente e w_i a matriz dos pesos ponderados também resultado do passo anterior.

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[B_{nn}]_{ii}}{w_i} \quad (\text{Equação 3})$$

O valor de λ_{max} deve ser próximo ao número total de critérios, n . Quanto menor a diferença entre λ_{max} e n , mais consistente são os julgamentos realizados. Para quantificar o grau de consistência, utiliza-se o Índice de Consistência IC , que avalia o quanto a matriz se desvia da consistência perfeita, sendo calculado pela Equação 4.

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (\text{Equação 4})$$

Depois de calcular os pesos atribuídos a cada critério, é necessário verificar a consistência dos julgamentos por meio da Razão de Consistência RC . Segundo Saaty (1980), a RC deve ser inferior a 0,10, o que significa que o valor dessa razão precisa ser menor que 10% para ser aceitável. A fórmula para o cálculo da RC é apresentada na Equação 5. (PINESE, 2012).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (\text{Equação 5})$$

O valor do Índice Randômico IR , varia dependendo da dimensão da matriz quadrada de ordem n . Esse valor é tabelado e fornecido por Saaty (1980), Tabela 5, e possui valor 0 para matrizes de ordem 1 e 2, pois seria impossível executar a análise AHP com tais matrizes.

Tabela 5 - Valores de Índice Randômico IR

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
IR	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Fonte: Adaptado de Pinese (2012).

Caso o IC seja maior que 0,1, isso indica que há inconsistências significativas na matriz de comparação. Para tanto, será necessário refazer a análise e ajustar a distribuição dos pesos dos critérios. Esse processo consiste em revisar as comparações entre os pares de critérios, reavaliando as prioridades atribuídas, de modo a garantir que os pesos estejam de acordo com a escala de importância e que o nível de consistência desejado seja alcançado. A Figura 11 representa o fluxograma de utilização da metodologia AHP.

Figura 11 - Utilização do método AHP



Fonte: Adaptado de Pinese (2012).

4.3 Mapa final de suscetibilidade à ocorrência de fluxo de detritos

O mapa final de suscetibilidade à ocorrência de fluxo de detritos foi gerado a partir da integração de diversos critérios analisados no presente estudo. Os mapas temáticos utilizados na ponderação incluíram a hipsometria, declividade, curvatura horizontal, curvatura vertical, orientação de vertentes e geologia. Cada um desses critérios foi considerado relevante para identificar áreas mais propensas à ocorrência de fluxos de detritos, refletindo as condições do terreno e as características geológicas da região.

Cada mapa temático foi subdividido em classes que representavam suas características específicas. Essas classes foram avaliadas de acordo com sua contribuição potencial para o desencadeamento de fluxos de detritos, sendo atribuídos valores crescentes até 10. As classes com maior probabilidade de influenciar a ocorrência de fluxos receberam as pontuações mais altas.

O próximo passo consiste em combinar os mapas temáticos ponderados com os pesos obtidos por meio da análise AHP. A combinação é realizada utilizando a

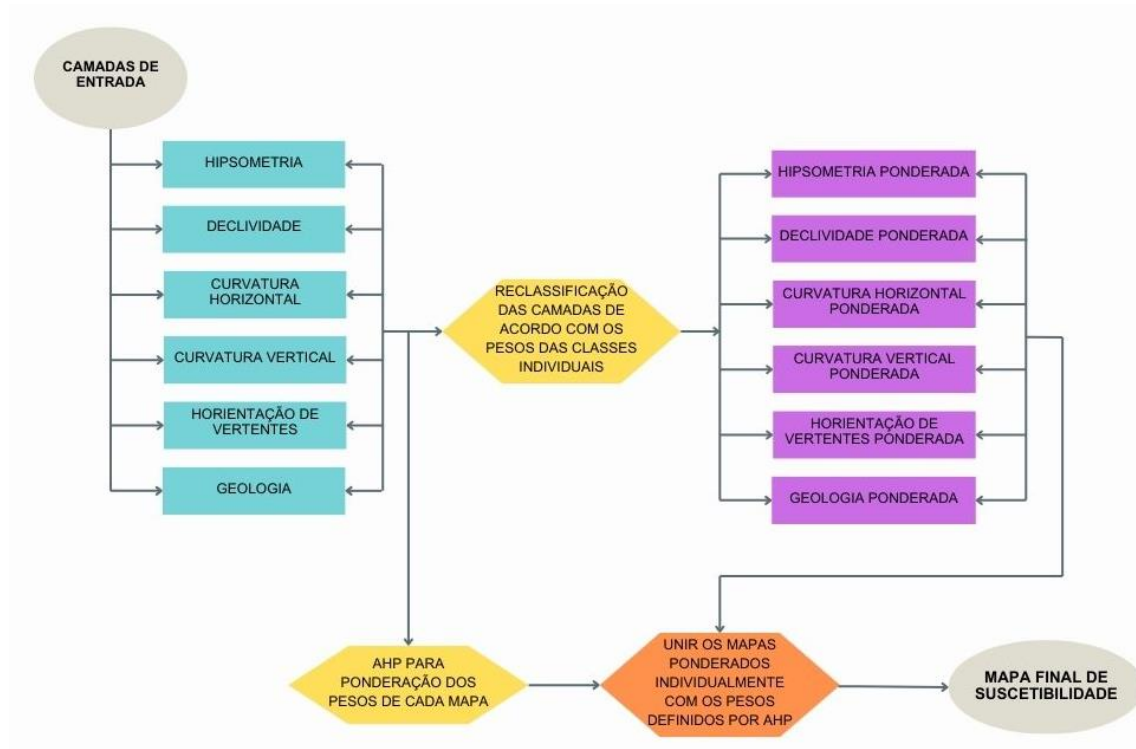
Equação 6, onde a suscetibilidade (S) é calculada pela soma ponderada de cada critério. Nessa fórmula, W_i representa o peso atribuído a cada fator através do AHP, e C corresponde a cada critério individual analisado.

$$S = \sum_{i=1}^n w_i * C_i \quad (\text{Equação 6})$$

Essa equação foi aplicada na ferramenta de *Cálculo de Raster* do QGIS para realizar a combinação dos mapas temáticos e gerar o mapa final de suscetibilidade. Cada mapa ponderado foi inserido no cálculo, com seus respectivos pesos atribuídos pela análise AHP, permitindo que o *software* integre os critérios de maneira precisa e eficiente. Isso resultou no mapa final, que representa as áreas com maior ou menor suscetibilidade à ocorrência de fluxos de detritos na área de estudo, conforme é apresentado na

Figura 122. O mapa final foi dividido em cinco classes, representadas por: Muito Baixo, Baixo, Moderado, Alto e Muito Alto.

Figura 12 - Esquema da geração do mapa de suscetibilidade a partir dos mapas temáticos



Fonte: Autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

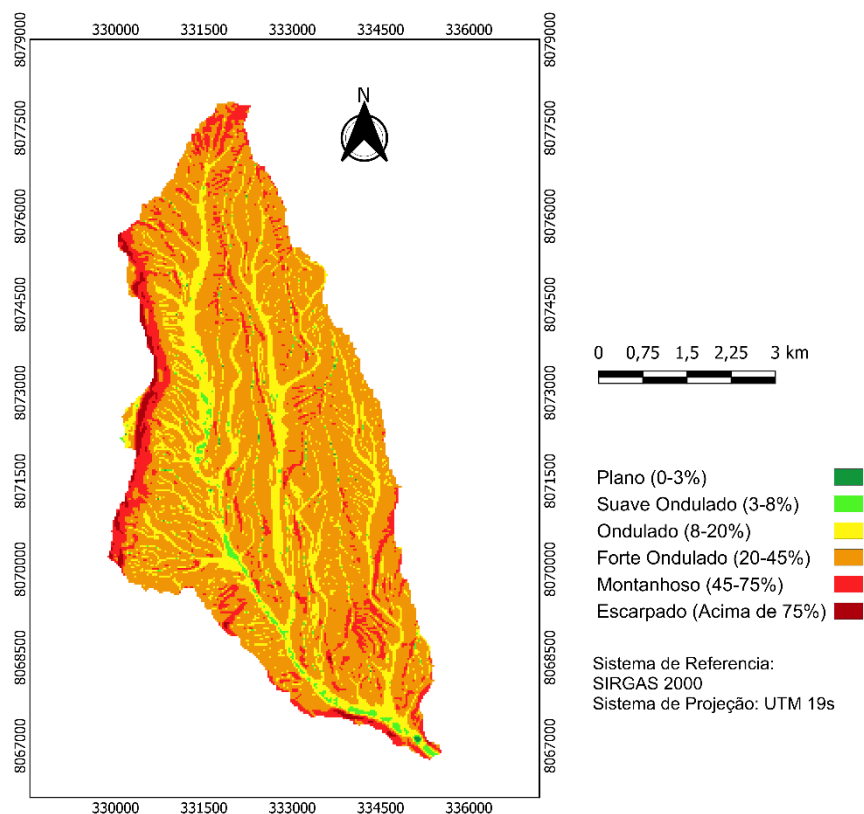
5.1 Caracterização da Área de Estudo

A caracterização da área de estudo em Mirave, localizada no distrito de Ilabaya, foi realizada a partir de mapas temáticos que detalham as principais variáveis morfométricas e geológicas da região. Esses mapas são fundamentais para entender como cada fator influencia a suscetibilidade da área aos fluxos de detritos. A seguir, cada critério utilizado é discutido individualmente, com base nos resultados obtidos para hipsometria, declividade, curvatura horizontal e vertical, orientação de vertentes e geologia.

5.1.1 Declividade

Na área de estudo em Mirave, o mapa de declividade forneceu informações detalhadas sobre a inclinação do terreno. A declividade foi classificada em diferentes intervalos, representando zonas de maior ou menor propensão à movimentação de detritos, conforme mostra a Figura 133.

Figura 13 - Mapa de Declividade



Fonte: Autora.

As áreas de declividade alta e muito alta se concentraram predominantemente na região leste da bacia de Mirave, indicando zonas de maior risco de deslizamento e movimentação de detritos nesse critério CRUZ et al. (2010). Em contraste, as áreas com menor declividade, são encontradas nos leitos secos ou vales, e servem como potenciais caminhos por onde os fluxos de detritos podem escoar durante eventos de precipitação intensa. As proporções de cada classe de declividade são detalhadas na Tabela 6, que mostra a predominância de áreas de declividade forte ondulada, que ocupam 67,38% da bacia.

Tabela 6 - Proporção e área das classes de declividade na bacia

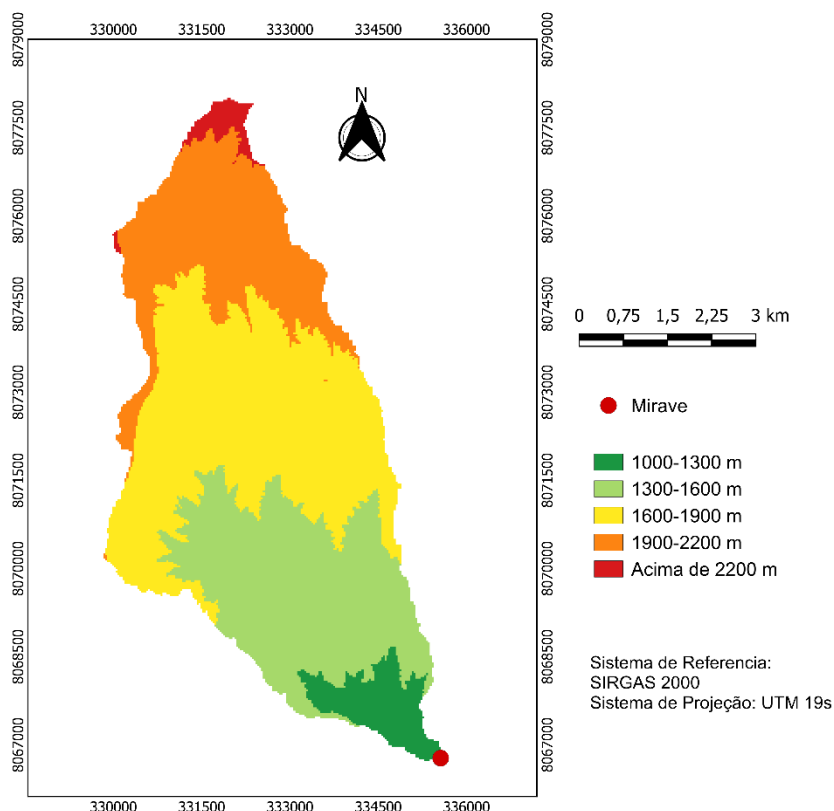
Classe	Porcentagem (%)	Área (Km ²)
Plano (0-3%)	0,12	0,04
Suave Ondulado (3-8%)	1,52	0,53
Ondulado (8-20%)	18,97	6,57
Forte Ondulado (20-45%)	67,38	23,34
Montanhoso (45-75%)	10,76	3,73
Escarpado (Acima de 75%)	1,25	0,43
Soma	100,00	34,64

Fonte: Autora.

5.1.2 Altimetria do Terreno

O mapa hipsométrico, Figura 1414, reflete a variação de altitude do terreno, mostrando a diferença de elevações presentes na bacia de Mirave. Essa diferença de elevação é fundamental para compreender a distribuição do relevo, evidenciando tanto as áreas de baixa altitude quanto as regiões mais elevadas. A partir dessa análise, foi possível observar como os diferentes níveis de elevação influenciam os processos de movimentação de material detrítico e o escoamento superficial na bacia.

Figura 14 - Mapa Hipsométrico



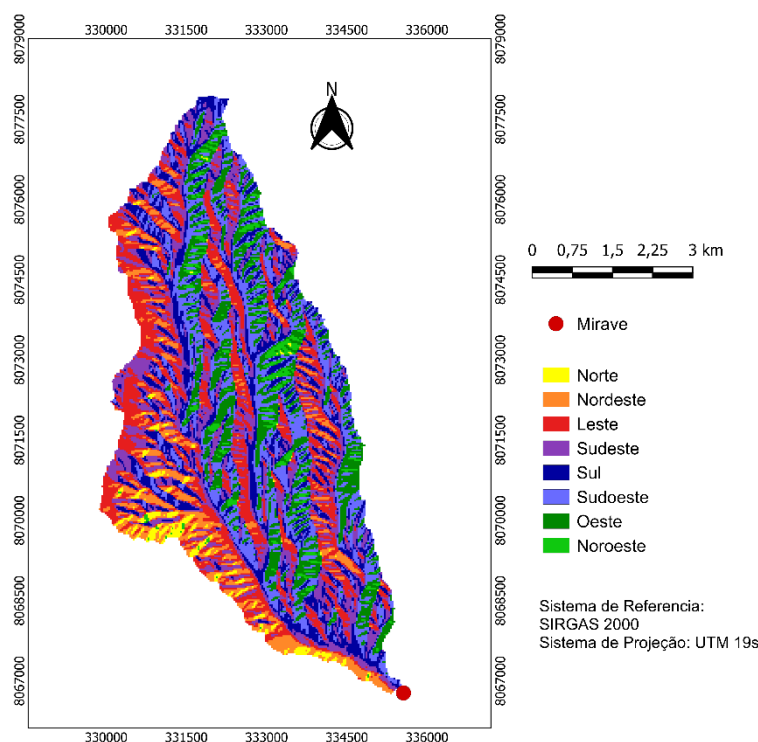
Fonte: Autora.

Conforme a variação da elevação do terreno aumenta, o peso atribuído para análise de suscetibilidade também se eleva por CHEN *et. al.* (2015), pois maiores altitudes apresentam maior potencial para instabilidade. No mapa gerado observa-se que as maiores elevações estão concentradas na porção norte da bacia, indicando áreas mais suscetíveis ao início fluxo de detritos segundo o critério de elevação. Já na porção sul, onde se localiza Mirave, predominam as altitudes mais baixas, o que sugere uma menor propensão ao início de fluxos de detritos nessas áreas.

5.1.3 Orientação de Vertente

No mapa de orientação de vertentes gerado para a área de estudo, Figura 155, as encostas foram classificadas conforme sua orientação, permitindo a identificação de padrões de susceptibilidade associados à direção das vertentes. Esse tipo de análise ajudou a identificar quais lados da bacia poderiam estar mais sujeitos à ocorrência de fluxos, especialmente quando expostos a condições climáticas específicas, como precipitação intensa.

Figura 15 - Mapa de Orientação de Vertente



Fonte: Autora.

No sul do Peru, as orientações de vertente que têm mais exposição ao sol são geralmente as voltadas para o oeste e o norte. Isso ocorre devido à trajetória do sol no hemisfério sul, que se move de leste a oeste e está mais alto no céu durante a maior parte do dia nas direções norte e oeste.

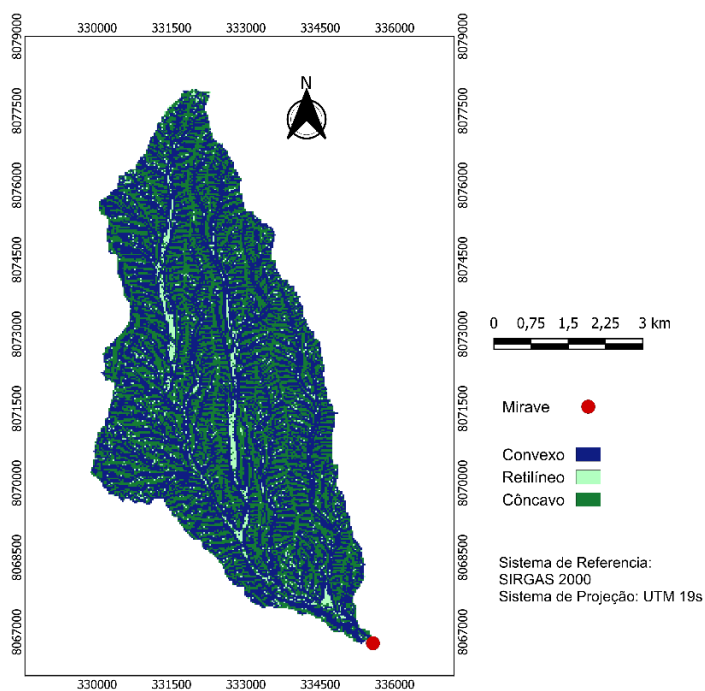
Nesse contexto, considerou-se para o estudo que as áreas mais propensas ao início de fluxo de detritos são as áreas localizadas nas orientações que recebem menos radiação solar direta. Segundo MELO (2017), alguns autores concordam que regiões mais propensas a instabilidade são regiões mais úmidas e frias. Em geral, no contexto do sul do Peru, as encostas voltadas para o leste, sul e sudoeste podem ser mais suscetíveis ao início do fluxo, especialmente após chuvas intensas, já que essas áreas tendem a acumular mais umidade e, conseqüentemente, aumentar a saturação do solo.

5.1.4 Curvaturas do Terreno

A análise da superfície do terreno foi realizada com base nos mapas de curvatura. A curvatura vertical, Figura 166, foi classificada em côncava, retilínea e convexa, enquanto a curvatura horizontal, Figura 177, foi dividida em divergente,

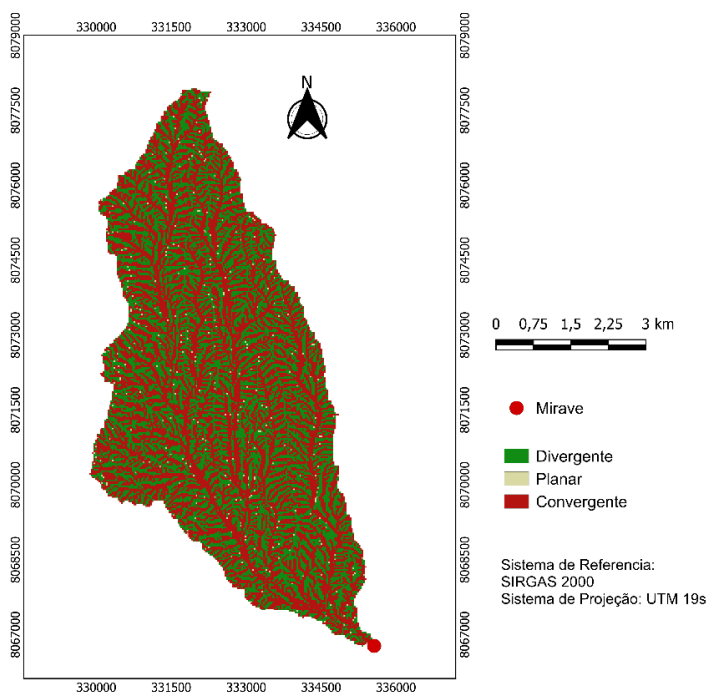
planar e convergente. Essas diferentes classificações permitiram identificar como o relevo influenciou na concentração ou dispersão de fluxos de detritos.

Figura 16 - Mapa de curvatura vertical



Fonte: Autora.

Figura 17 - Mapa de curvatura horizontal



Fonte: Autora.

Em ambos os mapas de curvatura, os tipos que tendem a concentrar o fluxo de água e materiais são o tipo côncavo, no caso vertical, e convergente no caso horizontal MELO (2017, apud COROMINAS *et al.*, 2008). Tais curvaturas apresentam maior probabilidade de desencadear o início de fluxos de detritos e, por essa razão, essas classes receberam um peso maior na análise de suscetibilidade.

5.1.5 Geologia

O mapa geológico utilizado na análise corresponde ao previamente apresentado na Figura 11, que divide a bacia hidrográfica de Mirave em quatro tipos principais de formações geológicas. As formações Moquegua Superior, Moquegua Inferior e os Depósito Aluvial foram identificados como áreas com maior probabilidade de desencadear fluxos de detritos, devido à sua composição geológica com materiais soltos ou com elevado potencial erosivo, favorável à instabilidade BIZARRETA-ORTEGA *et al.* (2022). Por outro lado, segundo o mesmo autor, a formação Paralaque, presente em uma menor proporção no norte da bacia, foi considerada como a de menor suscetibilidade para o início de corridas de detritos.

As proporções de cada classe de formação geológica são detalhadas na Tabela 7, que mostra a predominância da área de formação geológica Moquegua Superior, que ocupa 78,62% da bacia.

Tabela 7 - Proporções das formações geológicas na bacia

Classe	Porcentagem (%)	Área (Km ²)
Paralaque	0,58	0,20
Moquegua Superior	9,00	3,12
Moquegua Inferior	78,62	27,24
Depósito Aluvial	11,80	4,09
Soma	100,00	34,64

Fonte: Autora.

5.2 Mapa de Suscetibilidade à Corrida de Detritos

Para a confecção das cartas temáticas, descritas anteriormente, cada mapa foi dividido em classes, e cada classe recebeu um peso que reflete a sua contribuição potencial para o desencadeamento de movimentos de massa em uma situação de precipitação intensa. Esses valores foram atribuídos de acordo com a suscetibilidade

de cada fator em contribuir para a ocorrência de fluxos de detritos, considerando as características específicas de cada plano de informação. A distribuição desses pesos foi feita conforme descreve a Tabela 8.

Tabela 8 - Tabela dos pesos distribuídos individualmente em cada classe

Variável	Classes	Peso parcial
Declividade do terreno (D)	Plano (0-3%)	0
	Suave Ondulado (3-8%)	2
	Ondulado (8-20%)	4
	Forte Ondulado (20-45%)	7
	Montanhoso (45-75%)	9
	Escarpado (Acima de 75%)	10
Altitude do terreno (H)	1000-1300 m	1
	1300-1600 m	4
	1600-1900 m	8
	1900-2200 m	9
	Acima de 2200 m	10
Orientação de vertentes (OV)	Norte	2
	Nordeste	5
	Leste	10
	Sudeste	7
	Sul	8
	Sudoeste	4
	Oeste	2
	Noroeste	1
Curvatura Vertical (CV)	Convexo	3
	Retilíneo	6
	Côncavo	10
Curvatura Horizontal (CH)	Divergente	3
	Planar	6
	Convergente	10
Geologia (G)	Paralanque	2
	Moquegua Superior	7
	Moquegua Inferior	9
	Depósito Aluvial	10

Fonte: Autora.

Após a definição dos pesos de cada critério, foi realizada a comparação par a par de todos os fatores por meio da metodologia AHP. Nesse passo foram dadas maior importância para geologia, altimetria e declividade nessa ordem, conforme

recomendado por BIZARRETA-ORTEGA (2018). Essa análise permitiu a construção da matriz de decisão, Tabela 9 que compara a relevância relativa de cada critério para a suscetibilidade de fluxos de detritos.

Tabela 9 - Matriz de decisão

Classe	D	H	OV	CV	CH	G
D	1	1/3	7	5	5	1/3
H	3	1	7	7	5	1/3
OV	1/7	1/7	1	1/5	1/3	1/9
CV	1/5	1/7	5	1	1	1/7
CH	1/5	1/5	3	1	1	1/7
G	3	3	9	7	7	1
Soma	7,54	4,82	32,00	21,20	19,33	2,06

Fonte: Autora.

O próximo passo foi o desenvolvimento da matriz normalizada, Tabela 10, que resultou nos pesos finais atribuídos a cada mapa temático. Esses pesos, calculados a partir da matriz normalizada, representam a contribuição relativa de cada fator na suscetibilidade a fluxos de detritos.

Tabela 10 - Matriz de Decisão Normalizada

Classe	D	H	OV	CV	CH	G	Soma	Peso
D	0,13	0,07	0,22	0,24	0,26	0,16	1,08	17,94%
H	0,40	0,21	0,22	0,33	0,26	0,16	1,57	26,24%
OV	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02	0,05	0,16	2,67%
CV	0,03	0,03	0,16	0,05	0,05	0,07	0,38	6,34%
CH	0,03	0,04	0,09	0,05	0,05	0,07	0,33	5,50%
G	0,40	0,62	0,28	0,33	0,36	0,48	2,48	41,31%

Fonte: Autora.

O próximo passo foi o cálculo da Razão de Consistência, para ver se é possível seguir com esses pesos ou se é necessário refazer as comparações par a par. Como nossa matriz de decisão é uma matriz 6x6, o IR= 1,24, conforme a Tabela 5.

$$\lambda_{max} = 6,50$$

$$IC = 0,1005$$

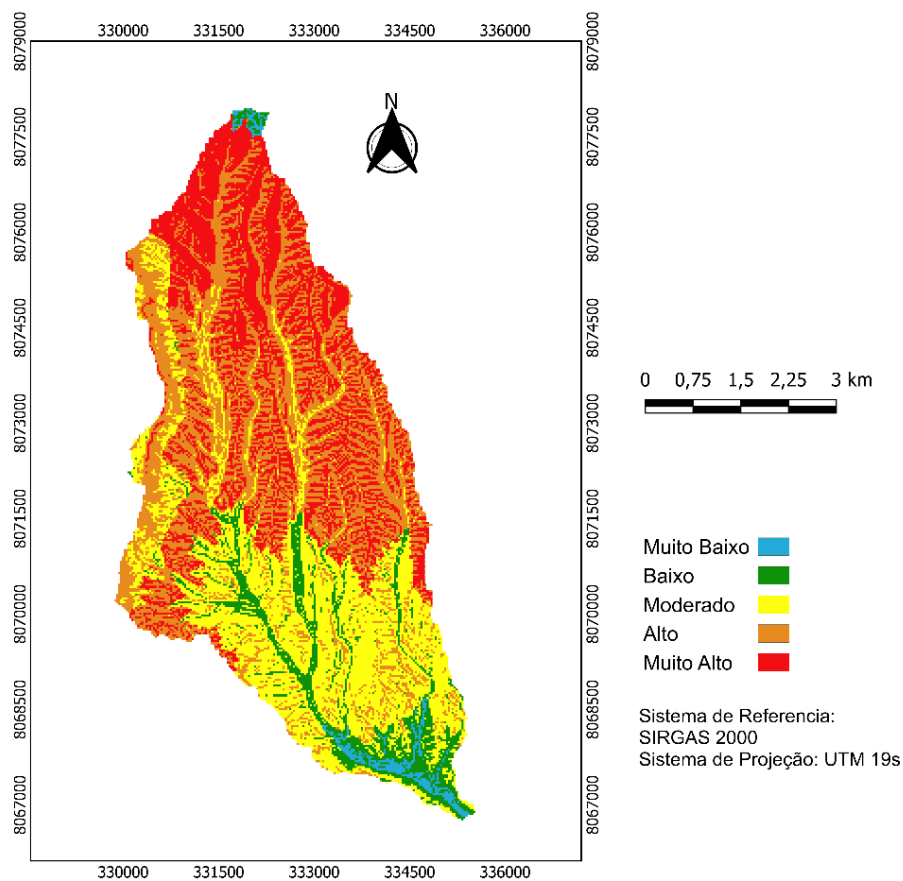
$$RC = IC/RI = 0,0811$$

RI = 0,0811 é menor que o limite definido de 0,1, então nossa matriz de decisão está consistente e pode ser usada para a confecção do mapa de suscetibilidade. A fórmula utilizada no QGIS para a confecção do mapa final é soma de todos os mapas ponderados pelos pesos calculados por AHP, conforme Equação 7.

$$S = 0,1794 * D + 0,2624 * H + 0,0267 * OV + 0,0634 * CV + 0,0550 * CH + 0,4131 * G \quad (\text{Equação 7})$$

O mapa final de suscetibilidade à ocorrência do início de corrida de detritos, Figura 138, sintetiza os resultados obtidos a partir da integração dos diferentes critérios analisados ao longo do estudo. Esses critérios foram ponderados com base em sua influência na instabilidade do terreno, resultando em um modelo que reflete as áreas de maior e menor suscetibilidade dentro da bacia de estudo. O mapa final foi dividido em 5 classes de suscetibilidade, que vão do muito baixo ao muito alto.

Figura 18 - Mapa final de suscetibilidade à ocorrência do início de corrida de detritos



Fonte: Autora.

As proporções de classes para o mapa de suscetibilidade estão descritas na Tabela 11. É possível observar que os maiores valores proporcionais são de riscos Moderados a Muito Altos.

Tabela 11 - Proporções das classes de suscetibilidade ao início de corrida de detritos ao longo da bacia

Classe	Porcentagem (%)	Área (Km ²)
Muito Baixa	1,45	0,50
Baixa	8,11	2,81
Moderada	28,36	9,82
Alta	35,38	12,26
Muita Alta	26,71	9,25
Soma	100,00	34,64

Fonte: Autora.

5.3 Discussão dos Resultados

O elevado valor de suscetibilidade a processos erosivos contribui significativamente para a formação de corrida de detritos, como destacado por BIZARRETA-ORTEGA *et al.* (2022). Esse fenômeno está diretamente relacionado ao tipo de litologia presente na bacia, que pode favorecer a erosão e, conseqüentemente, o transporte de material. Além disso, é possível observar em um vídeo do evento de 2019, disponibilizado por TELLERÍA (2019), que o fenômeno de corrida de detritos se originou da parte superior da bacia, o que reforça a importância da altimetria como um fator essencial na geração desses fluxos. A hipsometria, portanto, desempenha um papel crítico, especialmente do centro ao norte da bacia, onde as maiores altitudes aumentam a suscetibilidade ao início dos fluxos de detritos, exceto na região extremo norte, onde a presença da formação geológica Paralaque, com baixo peso na análise de suscetibilidade, contribui para a classificação dessa área como de baixa suscetibilidade.

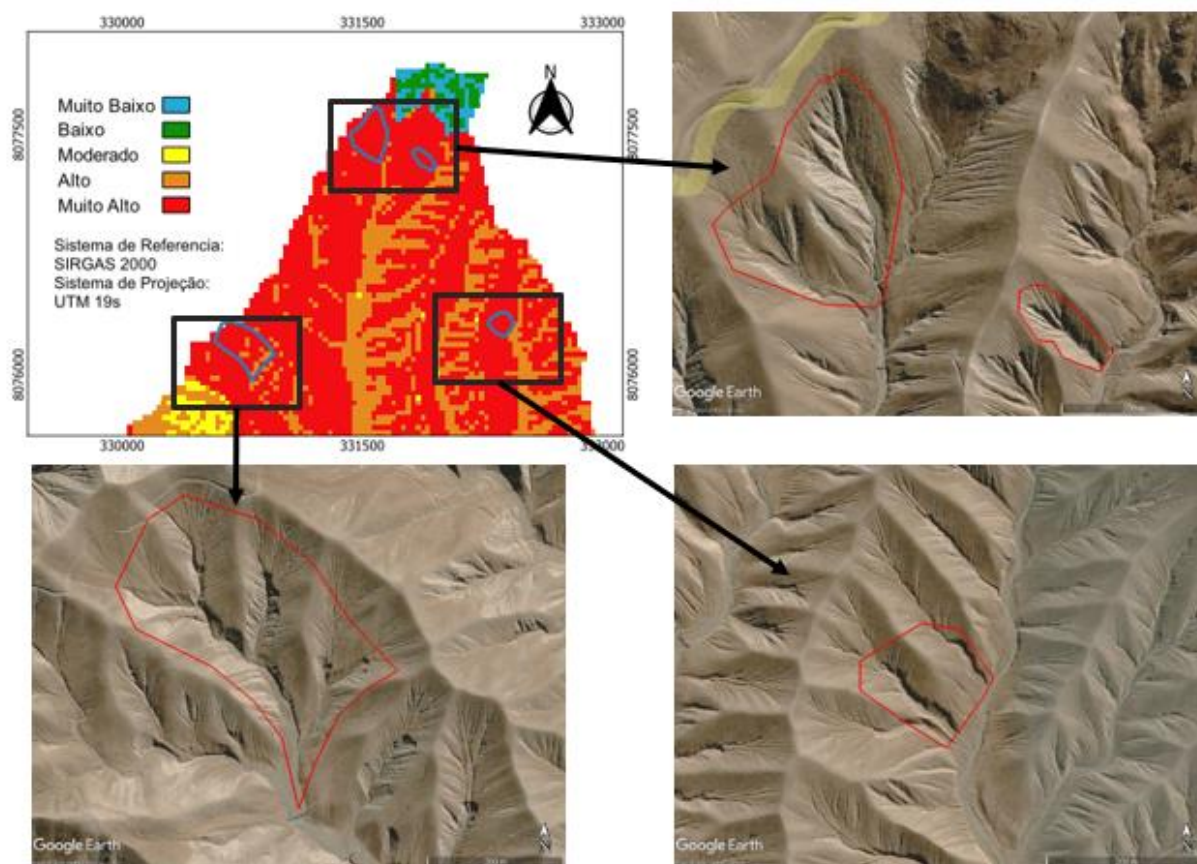
A declividade também foi um fator importante na análise de suscetibilidade, considerando que quanto maior o relevo maior a suscetibilidade CRUZ *et al.* (2010). É possível notar que, nas áreas onde há leitos secos com baixa declividade, a suscetibilidade ao início de corrida de detritos é consideravelmente menor em comparação com seu entorno.

Os resultados obtidos neste estudo sobre a suscetibilidade à corrida de detritos em Mirave estão em concordância com os achados de BLAHUT *et al.* (2010), especialmente na utilização de uma abordagem que combina diversas camadas de informação, incluindo mapas morfométricos derivados de MDE e mapa geológico para identificar fontes potenciais de fluxo de detritos. A diferença entre os estudos se encontra na metodologia utilizada, onde BLAHUT não utilizou AHP.

Um estudo de corrida de detritos que utilizou a metodologia AHP foi o estudo realizado por CHEN *et al.* (2015) no vale do Subao, China. Devido às diferenças nas características geográficas e geológicas das áreas em questão, cada estudo adotou critérios distintos. Enquanto o presente trabalho considerou fatores que influenciam diretamente a corrida de detritos na região do sul do Peru, CHEN focou em critérios com relevância regional na China, como distância de falhas sísmicas e a rugosidade do solo, visto que é uma região propensa a terremotos. Essa variação nos critérios é compreensível e demonstra como cada pesquisa se adapta às especificidades das regiões estudadas.

Para validar os resultados obtidos no presente estudo, na Figura 19 foram comparadas cicatrizes de corridas de detritos ocorridas em 2019 com o mapa de suscetibilidade gerado (Figura 19). As imagens das cicatrizes foram obtidas via programa *Google Earth*, com capturas datadas de julho de 2020, e mostram áreas onde os fluxos de detritos se iniciaram em eventos anteriores. Essas cicatrizes estão majoritariamente localizadas nas regiões classificadas como de alta e muito alta suscetibilidade no mapa final gerado no presente estudo.

Figura 19 - Comparação entre cicatrizes de eventos anteriores e mapa de suscetibilidade.



Fonte: Autora.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo principal mapear as áreas suscetíveis ao início de corrida de detritos em Mirave, Peru, utilizando dados sobre as características geomorfológicas e geológicas da região por meio de técnicas de geoprocessamento e análise multicritérios. A partir da análise das movimentações de massa, foi possível compreender melhor os fatores que contribuem para esse fenômeno e, assim, oferecer um panorama mais claro da suscetibilidade na área.

Ao decorrer do trabalho, relatou-se sobre os movimentos de massa e sua classificação, destacando as diferentes formas que esses eventos podem assumir, com foco no fenômeno de corridas de detritos, que são eventos rápidos e destrutivos caracterizados pelo comportamento semelhante ao de um material aquoso. Em seguida, foram discutidos os mecanismos que iniciam as corridas de detritos, incluindo fatores como precipitação intensa e instabilidade do solo.

Utilizando técnicas de geoprocessamento, foi possível delimitar a bacia de contribuição de Mirave e executar os mapas temáticos característicos da área de estudo que facilitaram a compreensão da dinâmica local. Os mapas temáticos foram combinados de acordo com a metodologia AHP, que possibilitou a ponderação e combinação dos diferentes mapas, culminando na elaboração de um mapa final de suscetibilidade.

A metodologia AHP aplicada se mostrou eficaz para ponderar e testar diferentes pesos às classes de cada critério de forma individual. Porém, vale destacar que a abordagem envolve a atribuição de pesos através de julgamentos humanos, e dependendo o uso pode gerar inconsistências nos dados da matriz final.

O presente estudo teve um caráter exploratório, visando descrever, analisar e entender melhor as variáveis envolvidas. Ao longo do trabalho, obteve-se uma compreensão mais aprofundada das áreas suscetíveis ao início de corridas de detritos em Mirave. É recomendável que pesquisas mais intensas e abrangentes sejam realizadas na área, a fim de validar e ampliar os achados deste estudo, especialmente considerando as particularidades geológicas e geomorfológicas da região, além de estudos de precipitações, climatologia, temperatura, entre outros. Tais investigações podem contribuir significativamente para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e gestão de riscos associados a movimentos de massa, beneficiando a comunidade local e promovendo um maior segurança.

7 REFERÊNCIAS

ACOSTA ALE, J. G. **Facies y Ambientes Sedimentarios de la Formación Moquegua Inferior al Sur de Moquegua**. Sociedad Geológica del Perú. Publicación Especial, n. 5. Lima, 2004.

ACOSTA ALE, J. G. **Facies y Ambientes Sedimentarios de la Formación Moquegua Superior en los Alrededores de la Ciudad de Tacna**. Sociedad Geológica del Perú. Publicación Especial, n. 5. Lima, 2004.

AVILA, A. F. D.; RODRIGUES, G. S.; VEDOVOTO, G. L.. **Avaliação dos impactos de tecnologias geradas pela Embrapa: metodologia de referência**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.

BIZARRETA-ORTEGA, J. C. *et al.* **Effect of Lithological and Geotechnical Characteristics on the Generation of Debris Flows in the Arid Basin of Mirave, Peru. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science**. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrograficas (IPABHi). Foz do Iguaçu. 2022. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/MvZHy547GkDdjh3QRQPK8pQ/?lang=en>.

Acesso em: 10 de novembro de 2022.

BIZARRETA-ORTEGA, J. C. **Nueva Metodología Para la Evaluación del Riesgo de Desastres por Flujos Detríticos (Huaycos) de Aplicabilidad Nacional: Estudio de Caso – Distrito de Ilabaya - Tacna**. Informe de Investigación, Universidad de Lima. Lima, 2018

BRESSANI, *et, al.* **Resultados de Ensaio Triaxiais em um Solo Coluvionar de Arenito da Escarpa da Serra Geral de Timbé do Sul (SC)**. 4º Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas- COBRAE, Salvador (BA), Anais, ABMS/ABGE, 2005.

CARMO, A. M. *et al.* **Avaliação de Suscetibilidade à Movimentos de Massa, Utilizando as Variáveis Morfométricas, Para as Serras da Porção Sul do Maciço Central do Ceará**. Revista Brasileira de Cartografia. Rio de Janeiro, 2016.

CHEN, X. *et al.* **Susceptibility Assessment of Debris Flows Using the Analytic Hierarchy Process Method – A Case Study in Subao River Valley, China**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Mianyang, 2015.

CORSEUIL, C. W. **Técnicas de Geoprocessamento e de Análise de Multicritério na Adequação de Uso das Terras**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2006.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. **Landslides: Investigation and Mitigation:** Chapter 3: Landslide Types and Processes. U.S. National Academy of Sciences, Special Report. 1996.

CRUZ, L. M. *et. al.* **Abordagem Cartográfica da Fragilidade Ambiental na Bacia Hidrográfica do Glória – MG.** Revista Brasileira de Cartografia. n. 62/04. Uberlândia, 2010.

DIAS., V. C.; VIEIRA, B. C.; GRAMANI, M. F. **Parâmetros Morfológicos e Morfométricos como Indicadores da Magnitude das Corridas de Detritos na Serra do Mar Paulista.** Revista Franco-Brasileira de Geografica (Confins), 2016. Disponível em: < <https://journals.openedition.org/confins/11444> >. Acesso em: 11 de novembro de 2024.

DIKAU, R. **Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods.** Zeitschrift für Geo-morphologie, v.80, p. 45-55, 1990.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos.** Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1979. (EMBRAPA-SNLCS. Miscelânea, 1).

FILHO, O. A. **Cartas de Risco a Escorregamentos: Uma Proposta Metodológica e sua Aplicação no Município de Ilhabela, SP.** Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

GARCIA, G. P. B. **Elaboração de Mapas Geomorfológicos a partir de Modelos Digitais de Elevação.** Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

GOOGLE EARTH. **Imagem de satélite da região da bacia de Mirave, Peru.** Captura de julho de 2020. Disponível em: <<https://earth.google.com/>>

GRAMANI, M. F. **Caracterização Geológico-Geotécnica das Corridas de Detritos ("Debris Flows") no Brasil e Comparação Com Alguns Casos Internacionais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Solos), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, S. M; **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação.** 2º Edição. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

GUZZETTI, F. **Landslide Hazard and Risk Assessment.** Tese (Doutorado em Ciências da Terra) - Rheinische Friedrich Wilhelms Universität Bonn. Bonn, 2006.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO- IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margens de Rios.** [s.l.] Ministério das Cidades, 2007.

LISTO, F. L. R. *et. al.* **Movimentos De Massa: Estado Da Arte, Escalas De Abordagem, Ensaio De Campo E Laboratório E Diferentes Modelos De Revisão.** Em: Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira. [s.l.] União da Geomorfologia Brasileira, 2021. p. 564–596.

MARTÍNEZ, W. V.; ZULOAGA, A. D. G. **Memoria Explicativa de La Geología del Cuadrángulo de Moquegua (35-u).** Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET. Dirección de Geología Regional, 2000.

MELO, R.; ZÊZERE, J. L. **Avaliação da Suscetibilidade à Rutura e Propagação de Fluxos de Detritos na Bacia Hidrográfica do Rio Zêzere (Serra da Estrela, Portugal).** Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 18, n. 1, p. 191-210. Lisboa, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.20502/rbg.v18i1.985> >. Acesso em 10 jun. 2024.

PEREIRA, A. A.; THOMAZ, E. L. **Hipometria e Declividade da Bacia Hidrográfica do Arroio Palmeirinha, município de Reserva – PR, Utilizando o Software Spring.** Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Foz do Iguaçu, 2013.

PINESE JÚNIOR, J. F.; RODRIGUES, S. C. **O Método de Análise Hierárquica – AHP – Como Auxílio na Determinação da Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Piedade (MG).** Revista do Departamento de Geografia – USP. Uberlândia, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0023.0001>>. Acesso em: 05 jun. 2024.

PINO, A.; SEMPERE, T.; JACAY, J.; FORNARI, M. **Estratigrafía, Paleogeografía y Paleotectónica del Intervalo Paleozoico Superior - Cretácico Inferior en el Área de Mal Paso - Palca (Tacna).** Escuela de Ingeniería Geológica - Geotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, 2004.

SAATY, T. L. **The Analytical Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation.** McGraw-Hill. New York, 1980.

SAATY, T. L. **Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks.** RWS Publications. Pittsburgh, 2005.

SAVIO, A. D. *et. al.* **Numerical Simulation of Debris Flows of the Catastrophic Event of February 2019 in Mirave – Peru.** Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science. Lima, 2019.

SHARPE, C.F.S. **Landslides and Related Phenomena: a Study of Mass Movements of Soil and Rock.** New York: Pageant Books, 1938.

SIMÕES, P. M. L.; OLIVEIRA, C. V.; **Avaliação da Susceptibilidade à Erosão e aos Movimentos de Massa no Município de Ibitité.** Geonomos, Belo Horizonte, v. 28, n. 1. 2014.

TELLERÍA, E. J. C. **Desborde de quebrada en Mirave. 2019.** YouTube, 14/02/2019. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=HcID-9ZEWDs>>. Acesso em: 12 out. 2024.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: Conhecer Para Prevenir.** 1º Edição ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

U. S GEOLOGICAL SURVEY- USGS. **Landslide Types and Processes.** U. s. Departamente of the Interior, 2004. Disponível em: < <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html> >. Acesso em: 10 de nov de 2024.

VALERIANO, M. M. **Topodata: Guia para Utilização de Dados Geomorfológicos Locais.** Projeto de Produtividade de Pesquisa “Modelagem de dados topográficos SRTM” - INPE, São José dos Campos , 2008.,

WILFORD, D. J. *et. al.* **Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics.** *Landslides*, v.1, p. 61-66. <https://doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0>

Z Aidan, Ricardo Tavares. **Geoprocessamento: conceitos e definições.** Revista de Geografia - PPGeo - UFJF. Disponível em: <<https://geografia.ufjf.emnuvens.com.br/geografia/index>> Acesso em: 10 de jun de 2024.

ZIEGLER, G. L. F.; **Avaliação do Risco a Escorregamentos Devido a Ocupação Urbana na Vila Bela Vista em Santa Maria-RS.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7819>> Acesso em: 25 de jul de 2024.