



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA E  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
ENGENHARIA AMBIENTAL**

**CLARISSA GUERRA SALVADOR**

**UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA AVALANCHE RUNOUT  
PARA GERAÇÃO DE MAPA DE SUSCETIBILIDADE A  
FLUXO DE DETRITOS NA BACIA DO ARROIO JAGUAR –  
ALTO FELIZ, RS**

**Porto Alegre**

**2018**

**CLARISSA GUERRA SALVADOR**

**Utilização da ferramenta *Avalanche Runout* para geração de mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos na bacia do Arroio Jaguar - Alto Feliz, RS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
APRESENTADO AO INSTITUTO DE PESQUISAS  
HIDRÁULICAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
ENGENHEIRA AMBIENTAL

Orientador: Prof. Dr. Gean Paulo Michel

Coorientador: Maurício Andrades Paixão

Porto Alegre

2018

## CIP - Catalogação na Publicação

Salvador, Clarissa Guerra

Utilização da ferramenta Avalanche Runout para geração de mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos na bacia do arroio Jaguar - Alto Feliz, RS / Clarissa Guerra Salvador. -- 2018.

87 f.

Orientador: Gean Paulo Michel.

Coorientador: Maurício Andrades Paixão.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Avalanche Runout. 2. Ângulo de alcance. 3. Fluxo de detritos. 4. Mapa de suscetibilidade. 5. Município de Alto Feliz. I. Michel, Gean Paulo, orient. II. Paixão, Maurício Andrades, coorient. III. Título.

CLARISSA GUERRA SALVADOR

Utilização da ferramenta *Avalanche Runout* para geração de mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos na bacia do Arroio Jaguar – Alto Feliz - RS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Ambiental

Aprovado em: Porto Alegre, 12 de dezembro de 2018.

---

Prof. Dr. Gean Paulo Michel - IPH  
Orientador

---

Me. Maurício Andrades Paixão - IPH  
Coorientador

---

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan – IPH  
Examinador

---

Prof. Dr. Masato Kobiyama - IPH  
Examinador

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tantas bênçãos ao longo de toda a minha caminhada. E por fortalecer meus princípios de fé, amor e vida.

Meus sinceros agradecimentos à minha família por terem formado uma base tão forte de amor e união, a qual me manteve firme em todos os momentos de fragilidade. Em especial meus pais Marcos e Dalva, e minha irmã Débora por toda compreensão e paciência e por abrirem mão de tantas escolhas em favor das minhas. Sou grata por tantos exemplos de coragem, esforço e determinação, onde cada conquista foi baseada em princípios de justiça e honestidade, valores trazidos pelos meus avôs Leolido (*in memoriam*) e Ignez Guerra e Zulmiro e Zaíra Salvador.

Agradeço especialmente ao meu orientador Gean Michel, por todo apoio, ensinamentos e disponibilidade. Sempre disposto a participar e contribuir para que eu pudesse atingir meus objetivos. Ao meu coorientador Maurício Paixão, que desde o início demonstrou interesse em ajudar, encorajando-me e trazendo contribuições pertinentes, e que mesmo longe se fez presente o tempo todo.

Agradeço a todos os professores por quem passei na graduação, por terem participado de forma efetiva na minha formação. Em especial ao querido paraninfo Fernando Fan e nosso homenageado Anderson Ruhoff.

Agradeço também a todos os amigos que fiz durante o curso, que propiciariam diversos momentos alegres e descontraídos. Principalmente os que mantive desde o ingresso até a formação, em especial a Marina Tabasnik, Maria Eduarda Schwengber, Paola Kuele e especialmente a Maria Eduarda Alves, pelo companheirismo de todos os dias nesses cinco anos de formação. Aos eternos colegas da barra 14, aos colegas formandos e aos colegas de grupo do GPDEN um agradecimento especial por também participarem dessa caminhada, seja bem no início ou quase no fim, dividindo salas de estudo ou o palco da colação; e que de alguma forma marcaram essa etapa da minha vida.

A realização deste trabalho só foi possível através do apoio aos projetos pela CAPES e ANA. Principalmente pelo projeto realizado pela Engenheira Mildred Monsalve de mapeamento do fluxo ocorrido no evento de 2000, cujo trabalho foi bastante oneroso e perigoso. Por último, agradeço a Gean Michel, Masato Kobiyama e Rossano Michel por disponibilizar as simulações geradas de áreas suscetíveis a escorregamentos na bacia e do fluxo simulado pelo Kanako-2D utilizadas neste trabalho.

Um agradecimento especial também à família Boeni pelo acolhimento e hospitalidade. E em respeito ao evento ocorrido no ano de 2000, que este trabalho possa colaborar e incentivar os estudos relacionados a fluxo de detritos, com expectativas de prevenir e reduzir os riscos associados a estes desastres.

## RESUMO

Fluxos de detritos são movimentos de massa extremamente rápidos e com elevado potencial destrutivo. Os desastres associados a estes fenômenos têm se intensificado, principalmente em função da ocupação acelerada de áreas de risco. A bacia do arroio Jaguar, no município de Alto Feliz, RS, apresenta um histórico de diversos impactos gerados por esse fenômeno. O mapeamento de áreas suscetíveis a fluxos de detritos é uma importante ferramenta para prevenção de novos desastres. Assim, com o objetivo de gerar um mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos para a bacia do arroio Jaguar, foi utilizado um modelo empírico simplificado, com base no ângulo alcance, denominado *Avalanche Runout*. O modelo requer que sejam definidas as áreas de origem do movimento e estabelecidos os valores do ângulo alcance e coeficiente de espalhamento do fluxo, os quais foram calibrados a partir de dados de campo e valem  $12^{\circ}$  e 0,37, respectivamente. O modelo considera uma teoria de movimento multidirecional do fluxo, definido a partir de um modelo digital do terreno, e determina o alcance da mancha gerada pela propagação de um fluxo de detritos até o ponto onde a inclinação do movimento atinge o valor limiar estabelecido pelo ângulo alcance. Os resultados obtidos pelo modelo foram comparados com resultados da metodologia utilizada pela CPRM para delimitação de áreas suscetíveis a fluxos de detritos, e com os resultados do modelo Kanako-2D. A mancha obtida a partir do modelo *Avalanche Runout* foi muito similar àquela obtida pelo modelo Kanako-2D. Apesar das limitações do modelo, o qual apresentou excesso e falta de espalhamento em canais com morfologias de pouco e muito confinamento, respectivamente, resultados satisfatórios foram obtidos. O mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos para a bacia do arroio Jaguar demonstra que a mesma exibe uma vasta parcela de sua área em locais propensos. Conclui-se, que o *Avalanche Runout* apresentou-se como uma ferramenta de grande aplicabilidade para identificação de localidades susceptíveis a fluxos de detritos.

**Palavras-chave:** *Avalanche Runout*, fluxo de detritos, ângulo de alcance, ângulo alfa, mapa de suscetibilidade, município de Alto Feliz.

## **ABSTRACT**

Debris flows are extremely fast mass movements with high destructive potential. The disasters associated with these phenomena have been intensified, mainly due to the accelerated occupation of risk areas. The Jaguar stream basin, in the municipality Alto Feliz, RS, presents a history of several impacts generated by this phenomenon. The mapping of areas susceptible to debris flows is an important tool for the prevention of new disasters. Thus, with the objective of generating a debris flow susceptibility map for the Jaguar stream basin, a simplified empirical model based on the alpha angle, called the Avalanche Runout, was used. The model requires the definition of initiation areas and the values of the alpha angle and flow spreading coefficient, which were calibrated from field data and are worth  $12^{\circ}$  and 0,37, respectively. The model considers a theory of multidirectional flow motion, defined from a digital terrain model, and determines the extent of the spot generated by the propagation of a debris flow to the point where the slope of the movement reaches the threshold value established by the alpha angle. The results obtained by the model were compared with results of the methodology used by CPRM to delineate areas susceptible to debris flows and with the results of the Kanako-2D model. The spot obtained from the Avalanche Runout model was very similar to that obtained by the Kanako-2D model. In spite of the limitations of the model, which presented excess and lack of scattering in channels with little and very confining morphologies, respectively, satisfactory results were obtained. The map of susceptibility to debris flow for the Jaguar stream basin shows that it exhibits a large portion of its area at prone locations. It is concluded that the Avalanche Runout was presented as a tool of great applicability for identification of locations susceptible to debris flows.

**Key Words:** Avalanche Runout, debris flow, reach angle, alpha angle, susceptibility map, Alto Feliz municipality.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de movimento de massa. ....	17
Figura 2. Classificação conceitual de desastres hidrológicos. ....	19
Figura 3. Esquema ilustrativo do fluxo de detritos.....	22
Figura 4. Indicação do ângulo Alfa ( $\alpha$ ).....	25
Figura 5. Geometria do fluxo e parâmetros considerados.....	27
Figura 6. Mancha de alcance do fluxo de detritos gerada a partir de áreas de suscetibilidade muito alta a escorregamentos.....	32
Figura 7. Análise dos pixels pela direção de fluxo considerando o método do D infinito.....	34
Figura 8. Comparação entre métodos utilizados para direção de fluxo.....	34
Figura 9. Mapa de suscetibilidade a desastres no município de Alto Feliz, RS.....	39
Figura 10. Local onde foi encontrado uma das vítimas carregada pelo fluxo. Ao fundo da imagem pode-se enxergar a cicatriz do escorregamento que deu origem ao movimento. Fonte: Cedida por Laurindo Boeni. ....	40
Figura 11. Fusca pertencente à família atingida. Estava no pátio da casa e foi encontrado próximo ao local depois da ocorrência do evento.....	40
Figura 12. Localização e Altimetria da Bacia do Arroio Jaguar. ....	42
Figura 13. Litologia da Bacia do Arroio Jaguar.....	43
Figura 14. Perfil geológico típico da região da bacia do Arroio Jaguar. ....	44
Figura 15. Mapa de Declividades. ....	44
Figura 16. Declividades do terreno segundo classificação da EMBRAPA (2006). ....	45
Figura 17. Mapa de solos da bacia do Arroio Jaguar. ....	47
Figura 18. Fluxograma das etapas de processamento. ....	48
Figura 19. Fluxograma de aplicação da <i>Avalanche Runout</i> . ....	49
Figura 20. Direção de fluxo definida pelo $D_{\infty}$ . ....	51
Figura 21. Mancha do fluxo mapeado em campo do evento ocorrido em 2000.....	56
Figura 22. Mancha do Fluxo de detritos para $\alpha=4^{\circ}$ e $c=0,37$ .....	58
Figura 23. Mancha do Fluxo de detritos para $\alpha=20^{\circ}$ e $c=0,37$ .....	59
Figura 24. Mancha do Fluxo de detritos para $\alpha=12^{\circ}$ e $c=0,37$ .....	59
Figura 25. Curva ROC dos coeficientes de espalhamento utilizados no modelo com $\alpha=12^{\circ}$ .....	61

Figura 26. Mancha do Fluxo de Detritos gerada para coeficiente de dispersão igual a 0,37 e $\alpha=12^\circ$ .....	62
Figura 27. Mancha do Fluxo de Detritos gerada para coeficiente de dispersão igual a 0,2 e $\alpha=12^\circ$ .....	62
Figura 28. Mancha do Fluxo de Detritos gerada para coeficiente de dispersão igual a 0,5 e $\alpha=12^\circ$ .....	63
Figura 29. Mancha do Fluxo de Detritos gerada para coeficiente de dispersão igual a 0,0 e $\alpha=12^\circ$ .....	63
Figura 30. Mancha do fluxo considerando a origem como cicatriz e como ponto, gerada pelo modelo com $c= a 0,37$ e $\alpha=12^\circ$ .....	66
Figura 31. Mancha do fluxo considerando a origem como cicatriz e como ponto, gerada pelo modelo com $c= a 0,20$ e $\alpha=12^\circ$ .....	66
Figura 32. Curva ROC dos coeficientes de espalhamento considerando a origem como ponto e como cicatriz.....	67
Figura 33. Mancha gerada pelo modelo considerando diferentes resoluções do MDT, $\alpha=12^\circ$ e $c=0,37$ .....	68
Figura 34. Mancha do fluxo de detritos gerada para $\alpha=10^\circ$ com MDT de 30 metros.	70
Figura 35. Mancha do fluxo de detritos gerada a partir do MDS de resolução 30 m do SRTM.....	71
Figura 36. Curva ROC em função das diferentes análises de sensibilidade do <i>Avalanche Runout</i> .....	72
Figura 37. Mapa de Suscetibilidade a Escorregamentos Translacionais. ....	73
Figura 38. Mapa de Suscetibilidade a Fluxo de Detritos na Bacia do Arroio Jaguar.	74
Figura 39. Mancha do fluxo de detritos a partir das cicatrizes de escorregamentos da bacia do arroio Jaguar.....	76
Figura 40. Comparação dos resultados gerados pela metodologia do ângulo alfa e do KANAKO-2D considerando o fluxo ocorrido no ano de 2000.....	78
Figura 41. Comparação dos resultados gerados pela metodologia do ângulo alfa e da CPRM para a bacia do arroio Jaguar.....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Conceitos de distinção entre fluxo de detritos e outros tipos de fluxo. ....	18
Tabela 2. Equações de modelos em função do Ângulo alfa. ....	29
Tabela 3. Valores sugeridos para o ângulo de alcance considerando diferentes tipos de movimento de massa. ....	30
Tabela 4. Dados de entrada utilizados no modelo. ....	56
Tabela 5. Taxa de verdadeiro e falso positivos para os modelos utilizando diferentes resoluções do MDT. ....	68
Tabela 6. Cenários considerados para geração do mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos na bacia do arroio Jaguar. ....	73
Tabela 7. Porcentagem de área atingida pelo fluxo de detritos na bacia do arroio Jaguar. ....	75
Tabela 8. Taxas de verdadeiro e falso positivos para os dois modelos. ....	78

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo Geral .....	15
2.2. Objetivos Específicos .....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
3.1. Movimentos de Massa .....	16
3.1.1. Tipos de Fluxo .....	17
3.2. Fluxo de detritos .....	20
3.2.1. Morfologia e Etapas do Movimento .....	21
3.3. Modelagem de Fluxos de Detritos.....	22
3.3.1. Modelos Matemáticos .....	23
3.4. <i>Avalanche Runout</i> .....	30
3.4.1. TauDEM .....	32
3.4.2. Direção de Fluxo D-infinito .....	32
3.5. Mapa de Suscetibilidade .....	34
3.5.1. Mapeamento de Fluxos de Detritos no Brasil .....	36
3.5.2. Cartas de Suscetibilidade da CPRM.....	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	41
4.1. Área de Estudo .....	41
4.1.1. Localização.....	41
4.1.2. Geologia e Geomorfologia.....	42
4.1.3. Solos.....	45
4.1.4. Uso do Solo e Vegetação .....	47
4.2. Modelagem de Fluxos de Detritos com a <i>Avalanche Runout</i> .....	48
4.2.1. Direção de Fluxo D-infinito .....	50
4.2.2. <i>Avalanche Runout</i> .....	51

4.2.3. Ângulo de Alcance.....	52
4.2.4. Coeficiente de Espalhamento.....	52
4.3. Análises de Sensibilidade .....	53
4.4. Dados de Entrada e Procedimentos.....	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
5.1. Ângulo de Alcance da Bacia do Arroio Jaguar .....	57
5.2. Coeficiente de Espalhamento na Bacia do Arroio Jaguar .....	60
5.3. Alteração dos Dados de Entrada .....	65
5.3.1. Origem Pontual do Movimento .....	65
5.3.2. Resolução do Modelo Digital do Terreno.....	67
5.4. Mapa de Suscetibilidade Bacia do Arroio Jaguar .....	72
5.5. Verificação com outras Metodologias.....	76
5.5.1. Modelo KANAKO-2D .....	77
5.5.2. Modelo CPRM .....	79
5.6. Limitações do Modelo e Incertezas Consideradas.....	80
6. CONCLUSÕES.....	82
REFERÊNCIAS.....	84

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda de ocupação do solo contribui para a presença da população em áreas de risco. A exposição aos desastres aumentou consideravelmente em vista disso. A ocorrência de enchentes, inundações e movimentos de massa atinge um número de pessoas cada vez maior e os impactos atrelados a isso são ainda mais acentuados. Entre os diferentes tipos de desastres ocorridos no Brasil, o fluxo de detritos configura a categoria de impacto com maior potencial destrutivo. Hungr (1995) apontou o fluxo de detritos como o mais perigoso e com maior capacidade de causar danos entre os diferentes movimentos de massa gravitacionais. Conforme Hungr et al. (2013) o fluxo de detritos representa um risco particularmente importante e que recentemente atraiu atenção especial.

Os estudos direcionados à compreensão e entendimento dos mecanismos relacionados à ocorrência de fluxo de detritos têm avançado consideravelmente durante os últimos anos, particularmente em decorrência do aumento de eventos extremos e fatalidades. Kobiyama e Michel (2014) apresentaram o histórico de publicações abordando o tema fluxo de detritos no Brasil, o qual apresentou um crescimento considerável, passando de no máximo uma publicação por ano antes de 1997 para doze em 2009. É extremamente necessário conhecer bem as características e aspectos do movimento, o que requer observação e monitoramento. Dessa forma, partindo de fundamentos bem estruturados, os estudos de previsão do comportamento do fluxo são facilitados e melhor embasados, gerando, possivelmente, resultados mais condizentes com a concepção do movimento.

O conhecimento limitado a respeito do comportamento do fluxo e a falta de planejamento e mitigação dos desastres, atrelado ao aumento considerável das fatalidades ocasionadas pelo movimento, transmite a necessidade do desenvolvimento de ações e iniciativas que auxiliem na redução dessas problemáticas. Entre elas devem ser efetuadas medidas de prevenção, as quais possuem caráter estrutural ou não estrutural. Em relação a fluxo de detritos as medidas estruturais como obras de engenharia são bastante onerosas e nem sempre eficientes. Portanto, umas das principais formas de prevenção é a modelagem de alcance do fluxo para previsão do movimento, utilizada para gerar mapas de suscetibilidade como uma medida não estrutural.

Existem diversos modelos de fluxo de detritos, desde os mais complexos aos mais simplificados, entre os quais o ângulo de alcance é considerado como um dos parâmetros. Esse ângulo, chamado de ângulo alfa, é determinado a partir do ponto mais a montante, na cabeceira do escorregamento, até o último ponto atingido pelo fluxo, na zona de deposição. Geralmente ele é aplicado em modelos considerando também outros parâmetros. Contudo, ao aumentarmos a quantidade de dados de entrada em um modelo, inerentemente aumentamos a quantidade de incertezas relacionadas. Além disso, ao considerarmos um único parâmetro, facilitamos e ampliamos a utilização do modelo.

O modelo em função do ângulo alfa possibilita gerar uma estimativa da área atingida pelo fluxo. Por conseguinte, é possível utilizar essa informação para gerar um mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos. Feito o mapeamento das áreas suscetíveis é possível prevenir a ocupação de risco desses locais, evitando a ocorrência de desastres. Posteriormente, considerando também a variável de vulnerabilidade é possível gerar um mapa de risco. De acordo com a Lei 12.608/12 que institui a Política Nacional de Proteção de defesa civil (PNPDEC) é dever da União, dos Estados e dos Municípios brasileiros identificar e mapear áreas de risco de desastres (BRASIL, 2012), abrangendo principalmente riscos de inundações e de movimentos de massa. Considerando a necessidade de mapear os municípios do país inteiro, a utilização de uma metodologia simplificada que obtenha resultados satisfatórios é bastante promissora.

Diversos municípios brasileiros sofreram com desastres envolvendo fluxo de detritos, entre eles o município de Alto Feliz, no Rio Grande do Sul, especificamente a principal bacia do município, a bacia do Arroio Jaguar. A bacia apresenta um histórico de ocorrência do movimento, em especial o evento ocorrido no ano de 2000, onde o trajeto percorrido pelo fluxo coincidiu com o local onde residia uma família que infelizmente não sobreviveu ao evento. Por conseguinte, a disponibilidade de um mapa com indicação das áreas de maior suscetibilidade a ocorrência de fluxo de detritos na bacia auxilia e facilita o planejamento de ocupações, evitando a ocorrência de desastres como esse.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo Geral

Avaliar aplicação do modelo *Avalanche Runout* utilizado para gerar mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos na bacia do arroio Jaguar, município de Alto Feliz, RS.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Estabelecer o coeficiente de espalhamento e ângulo de alcance dos fluxos de detritos na bacia do arroio Jaguar;
- Calibrar o modelo *Avalanche Runout* para simular fluxos de detritos na bacia do arroio Jaguar;
- Avaliar a sensibilidade do modelo à resolução do MDT e formato de origem do movimento;
- Confrontar os resultados obtidos pela metodologia proposta com o resultado obtido através de outras metodologias.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente trabalho apresenta a seguir uma breve explicação sobre os movimentos de massa, em especial fluxo de detritos, indicando suas principais características e distinção de termos fundamentais. Ademais, são descritos alguns modelos utilizados para simular a propagação do fluxo de detritos, em particular a *Avalanche Runout*, uma ferramenta aplicada em softwares de geoprocessamento, a qual foi utilizada neste trabalho. Os resultados obtidos pelo modelo com *Avalanche Runout* foram confrontados com outras duas metodologias, Kanako-2D e a utilizada pela CPRM, também descritas a seguir. Por último, é apresentado um pouco sobre mapas de suscetibilidade, os quais são considerados ótimas ferramentas de representação dos resultados obtidos a partir dos modelos de fluxo de detritos.

#### 3.1. Movimentos de Massa

Movimentos de massa são processos caracterizados pela movimentação ou queda de material das encostas na presença de uma força gravitacional. A ocorrência desses eventos é favorecida por uma série de condições. Bigarella et al. (2003) citaram como principais condicionantes a estrutura geológica, a declividade da vertente (forma topográfica), o regime de chuvas (em especial episódios pluviais intensos), a perda de vegetação e a influência de atividades antrópicas. Além disso, a existência de espessos mantos de intemperismo, bem como a presença de níveis ou faixas impermeáveis que atuam como planos de deslizamentos também são considerados fatores determinantes (BIGARELLA & PASSOS, 2003).

Os movimentos de massa podem ser classificados em diversas nomenclaturas a fim de enfatizar particularidades específicas mais relevantes para uma determinada aplicação. Entre as nomenclaturas mais utilizadas está a classificação feita por Varnes (1978), a qual utiliza uma série de atributos como a geometria do terreno na área de falha e depósito, o tipo de movimento e material envolvido, a taxa de movimentação ou velocidade de deslocamento, causas da falha e grau de desenvolvimento. A partir dessas características fundamentais observadas, Varnes (1978) estipulou cinco principais tipos de movimento de massa: *falls*, *topples*, *slides*, *spreads* e *flows*, também chamados respectivamente de queda, tombamento, escorregamento, espalhamento e fluxo (Figura 1).

Visando obter uma análise detalhada de cada etapa ou estágio de ocorrência do evento, foi sugerido por Hungr et al. (2013) uma atualização na classificação feita por Varnes (1978). Entre as modificações introduzidas, Hungr et al. (2013) fragmentaram os fluxos de acordo com o tipo de material, granulometria e velocidade, destacando-se entre as definições: *earthflow* (fluxo de terra), *mudflow* (fluxo de lama), *debris avalanche* (avalanche de detritos), *debris flood* (inundação de detritos) e *debris flow* (fluxo de detritos).

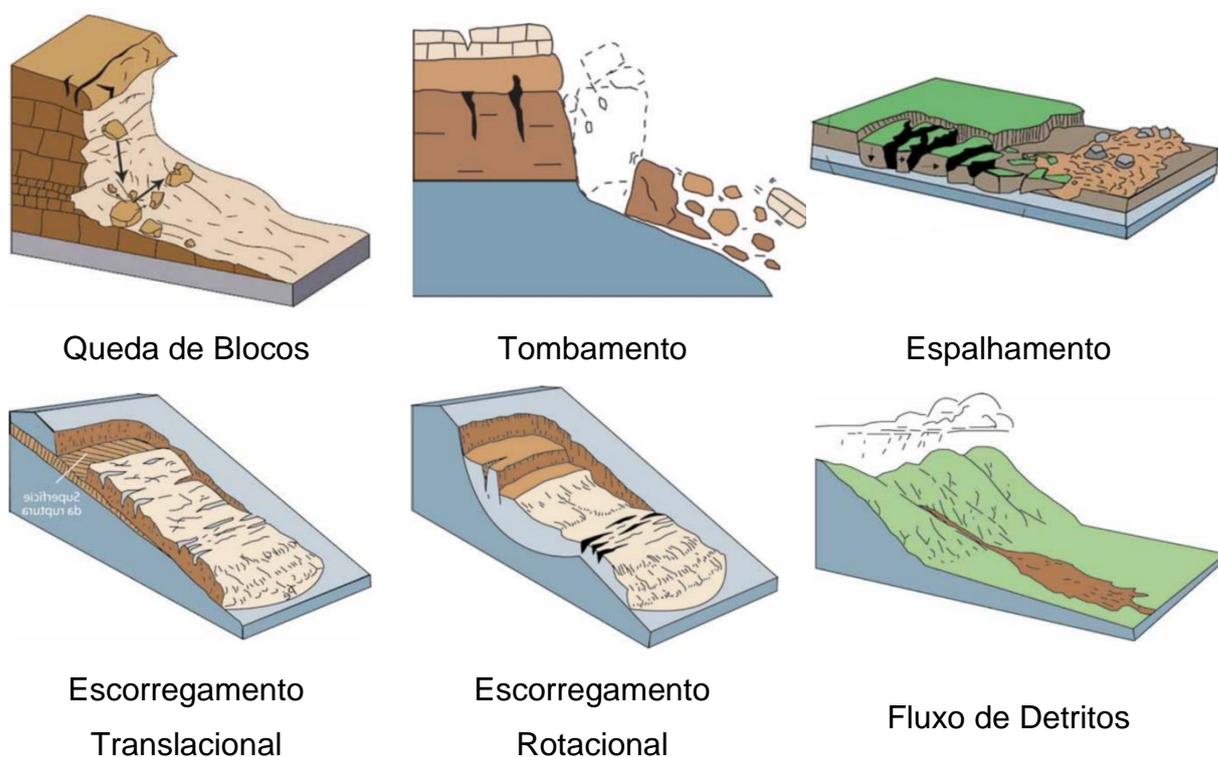


Figura 1. Tipos de movimento de massa.

Fonte: Adaptados de USGS, 2004.

### 3.1.1. Tipos de Fluxo

A separação entre as diferentes nomenclaturas e terminologias utilizadas para caracterizar fluxos não é bem estabelecida, apresentando algumas divergências entre diferentes autores. A diferenciação entre fluxo de detritos e fluxo de terra e de lama é definida por Varnes (1978) com base no tamanho das partículas. Segundo o autor, fluxo de detritos indica a presença de fragmentos relativamente grosseiros no material, enquanto fluxo de terra e lama é destinado para um material contendo ao menos 50% de areia, silte e argila.

Hungr et al. (2013) caracterizou o fluxo de terra como um corpo de solo argiloso e plástico, sem ter absorvido umidade em excesso (mantendo um índice de liquidez inferior a 0,5), o qual flui lentamente e intermitentemente ao longo de múltiplas superfícies de cisalhamento. Já o fluxo de lama foi definido pelo mesmo autor como um fluxo rápido ou muito rápido de solo saturado fluindo por uma encosta, incorporando água durante o caminho e apresentando índice de liquidez maior que 5%.

Um termo frequentemente relacionado a fluxo de detritos é avalanche de detritos, que é descrita por Hungr et al. (2013) como um movimento superficial de detritos extremamente rápido, parcialmente ou totalmente saturados fluindo por uma encosta íngreme, diferindo do fluxo de detritos por ocorrer como um único evento e sem estar confinado em um canal específico.

Por último, a inundação de detritos é caracterizada como um fluxo de água muito rápido e fortemente carregado com detritos, o qual flui por um canal íngreme e difere do fluxo de detritos por resultar em potenciais danos e impactos significativamente menores. Ademais, pode ocorrer em bacias hidrográficas de área relativamente maiores e apresentar regiões de depósito mais extensas, com menores ângulos de inclinação (HUNGR et al., 2013). Os conceitos que essencialmente diferem o fluxo de detritos dos outros tipos de fluxo estão apresentados de maneira concisa na Tabela 1.

Tabela 1. Conceitos de distinção entre fluxo de detritos e outros tipos de fluxo.

<b>Tipo de Fluxo</b>	<b>Conceito de Distinção</b>	<b>Referência</b>
Fluxo de terra e lama	Tamanho das partículas, com ao menos 50% de finos	VARNES, 1978
Avalanche de detritos	Único evento, sem confinamento	HUNGR et al., 2013
Inundação de detritos	Geração de impactos reduzidos	HUNGR et al., 2013

Kobiyama et al. (2010) sugeriram uma relação entre os movimentos com base na velocidade do movimento e na concentração de sedimentos. A classificação apresentada pelos autores segue uma relação conforme a Figura 2, onde o restante das classificações trazidas neste trabalho seriam encaixadas majoritariamente entre

inundação brusca e fluxo de detritos. Sendo o fluxo hiperconcentrado referente ao movimento classificado como inundação de detritos.

Tendo em vista as definições acima, a classificação dos movimentos é facilitada pela diferenciação através da matriz do material envolvido, podendo ser associada à concentração de sedimentos ou volume de água contido. Logo, as inundações apresentam menor concentração de sedimentos, prevalecendo um movimento cujo principal material presente é a água. Os materiais finos prevalecem nos fluxos de terra e lama, sendo os mesmos diferenciados pela quantidade de água contida. E, por último, os movimentos cuja matriz principal são os detritos, uma mistura de rochas, solo e matéria orgânica, característicos do fluxo e avalanche de detritos.

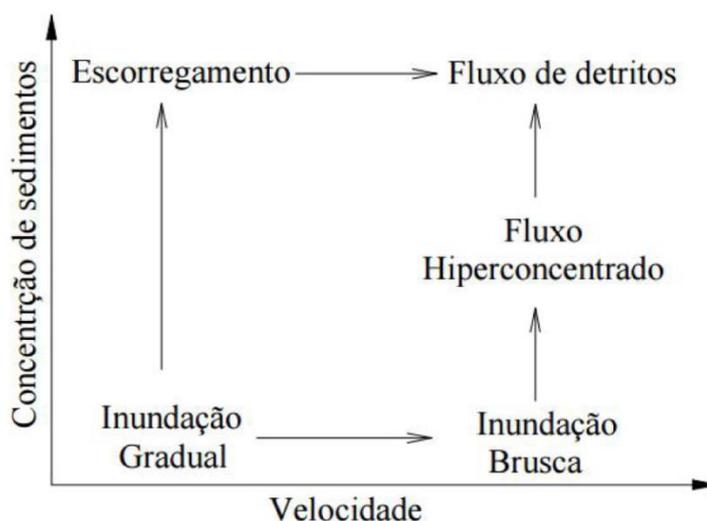


Figura 2. Classificação conceitual de desastres hidrológicos.

Fonte: Adaptado de KOBAYAMA et al. (2010).

Apesar da extrema importância em particularizar e especificar cada movimento de massa e seus diferentes estágios é também necessário atribuir uma nomenclatura compatível com o processo num todo. Não obstante Hungr et al. (2013) tenham estabelecido definições entre os diferentes tipos de fluxo, exemplificaram um caso em específico com a junção de mais de um deles em um mesmo evento. Considerando a hipótese de ocorrência de um deslizamento superficial em uma encosta íngreme, em seguida a massa deslocada passa a ganhar velocidade, desintegrando-se e ampliando de tamanho até atingir uma caracterização de avalanche de detritos. O material em movimento, ao ser introduzido em um canal de drenagem, arrasta ainda mais água e solo e transforma-

se efetivamente em um fluxo de detritos. Seguindo para zona de deposição em uma região com menor declividade, as frações mais grossas passam a depositar reduzindo o fluxo, que avança como uma inundação carregada de sedimentos. Por ser um processo complexo, segundo Hungr et al. (2013), é comum aplicar o termo fluxo de detritos para o cenário num todo a fim de facilitar as análises de interesse, em particular quando o foco, como neste trabalho, consiste em todo o processo, desde a falha até a deposição.

### **3.2. Fluxo de detritos**

O fluxo de detritos, originado do termo em inglês *debris flow*, também chamado de corrida de massa ou fluxo de escombros, é identificado como um movimento extremamente rápido de detritos saturados com água em um canal íngreme (HUNGR et al., 2013). Segundo Jakob e Hungr (2005) uma das primeiras definições e referências direcionadas a um tipo de movimentação de massa em específico é o livro *Die Nuren* de Stiny (1910). Por conseguinte, inicialmente, o fluxo de detritos foi definido como uma inundação torrencial em uma montanha, carregando sedimentos suspensos e transportando sedimentos de fundo; sendo que com o aumento da quantidade de sedimentos, o fluxo passa a ser uma massa viscosa fluindo como lama pelo vale (STINY, 1910). Sharpe (1938) traz uma definição mais simplificada, caracterizando o movimento como uma mistura de detritos saturados em fluxo rápido por um canal íngreme. Em relação à composição do fluxo, Varnes (1978) foi específico em dizer que o material representa uma combinação de solo, rochas, matéria orgânica, ar e água, além de manter uma porcentagem de finos inferior a 50%.

Referências mais recentes trazem novas definições para fluxo de detritos, apresentando poucas alterações ou discrepâncias significativas. Entre elas Bigarella et al. (2003) caracterizaram o fluxo de detritos como formas rápidas de escoamento de fluidos viscosos, com ou sem uma superfície definida de movimentação, apresentando caráter hidrodinâmico e sendo ocasionadas pela perda de atrito interno, em virtude da destruição da estrutura e presença em excesso de água. Um consentimento entre as diferentes definições é essencialmente a alta velocidade alcançada pelo fluxo, com registros de até 14 m/s segundo Rickenmann e Zimmermann (1993), e seu elevado potencial destrutivo.

Highland e Bobrowsky (2008) apontam que os fluxos de detritos podem ser letais, uma vez que ocorrem de maneira rápida e imediata, podendo incorporar matacões e outros fragmentos e acabar movimentando residências e grandes estruturas. Ademais, a chegada do material em corpos hídricos pode interferir na qualidade de água em função da elevada carga de sedimentos. O depósito de partículas e fragmentos em grande quantidade pode prejudicar e até mesmo impedir o abastecimento de água na região além de favorecer o assoreamento de reservatórios. Fluxos de detritos são considerados eventos mais raros que outros movimentos de massa, porém apresentam consequências destrutivas consideravelmente maiores.

### **3.2.1. Morfologia e Etapas do Movimento**

Considerando o termo fluxo de detritos como representação de todo o movimento, pode-se fragmentar o fenômeno em três aspectos: origem (iniciação), fluxo (transporte) e deposição, conforme configuração apresentada na Figura 3 (KOBAYAMA et al., 2004). A geração do fluxo de detritos no Brasil está relacionada, na maioria das vezes, à ocorrência de escorregamentos translacionais desencadeados por eventos de precipitação. A junção de escorregamentos que ocorrem em proximidade e a convergência para um canal de drenagem resultam na origem do fluxo. Segundo Takahashi (1991) ainda existem outras duas formas de iniciar o fluxo, i) pela remobilização de material do leito devido ao aumento do escoamento superficial e ii) devido ao rompimento de barragens.

O transporte do material caracterizado como fluxo geralmente é representado pela teoria do fluido dilatante. Segundo Bagnold (1954) o aumento da quantidade de partículas provoca um maior número de colisões entre elas, conseqüentemente, essas colisões acarretam em maior energia cinética liberada. Essa energia associada à elevada quantidade de água no sistema resulta em grande mobilidade e fluidez ao movimento.

Para garantir a continuidade do processo, a zona de transporte deve apresentar comprimento e declividade suficientes para favorecer a ocorrência do fluxo. Devido à elevada energia adquirida, o transporte é feito em altas velocidades atingindo distâncias consideravelmente longas, Rickenmann (2005) citou registro de fluxo de detritos alcançando até 12,6 quilômetros.

Ao sofrer uma perda de confinamento, principalmente devido ao alcance de áreas de menor declividade, o fluxo tem sua velocidade reduzida e conseqüentemente ocorre a deposição do material na forma de leques aluviais. De acordo com Takahashi (2007) um fluxo de detritos pode ser transportado em locais com inclinação maior ou igual a  $4^\circ$ , ou seja, em inclinações menores do que essa se inicia o processo de deposição. Outras referências como Slaymaker (1988) trazem o intervalo de declividade entre  $5^\circ$  e  $12^\circ$  para o início da zona de deposição.

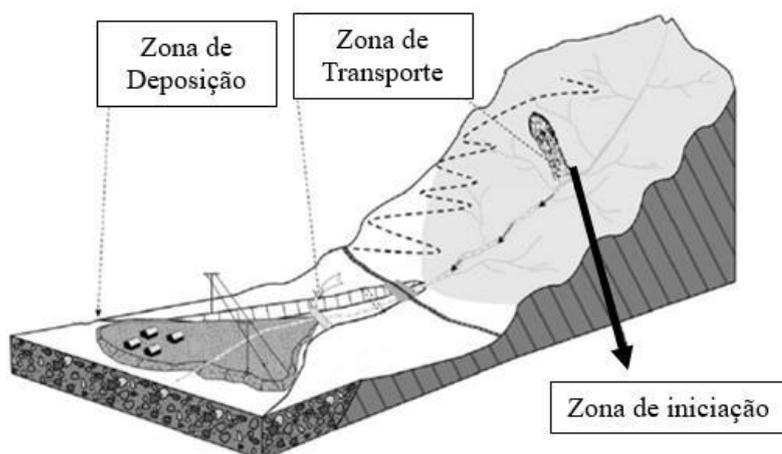


Figura 3. Esquema ilustrativo do fluxo de detritos.

Fonte: Adaptado de HUSSIN (2011).

### 3.3. Modelagem de Fluxos de Detritos

Movimentos de massa muito rápidos como fluxos de detritos contestam a facilidade da aplicação de medidas típicas de mitigação, uma vez que o potencial de destruição frequentemente não pode ser prevenido pela estabilização da área de origem (MCKINNON, 2010). Diante disso, a técnica considerada mais efetiva para redução de risco a fluxo de detritos é a estimativa do comportamento e alcance do escoamento através da modelagem. A utilização de um modelo resulta em um possível cenário de comportamento, uma representação do fenômeno. A proximidade do evento real com o cenário gerado pelo modelo depende de diversos fatores, entre eles a escolha dos parâmetros e dados de entrada e principalmente em função do modelo utilizado.

Os modelos são essencialmente classificados em dois grandes grupos, os modelos físicos e os matemáticos. Os modelos físicos envolvem experimentos

diretos. Logo, em se tratando de fluxo de detritos, podem ser difíceis, perigosos, caros e de utilidade restrita (MCKINNON, 2010). Em vista disso, os modelos matemáticos são bastante difundidos, geralmente de fácil utilização e vantajosos economicamente.

### **3.3.1. Modelos Matemáticos**

Os modelos matemáticos são representações conceituais do fenômeno. Segundo Rickenmann (2005) os modelos utilizados para análise do alcance de fluxo de detritos são divididos em empíricos e dinâmicos. Modelos dinâmicos são baseados em parâmetros físicos e consideram a conservação de energia do fluxo, inserindo a variação do tempo na análise (RICKENMANN, 2005). Modelos dinâmicos são geralmente mais complexos de serem utilizados que os empíricos, que, por sua vez, são de mais fácil aplicação. Contudo, os modelos empíricos podem ser de limitada utilização, uma vez que se recomenda sua aplicação direta apenas em condições semelhantes as quais foram desenvolvidos. Ainda assim, de acordo com a finalidade ou interesse de análise, são considerados ótimas opções em função da facilidade de uso.

#### **3.3.1.1. Modelos Dinâmicos**

Os modelos dinâmicos envolvem tanto soluções analíticas quanto métodos numéricos, geralmente de maior complexidade. São diversos modelos numéricos já criados como FLO-2D, RAMMS e DAN3D. Além desses, o modelo desenvolvido por Nakatani (2008), o Kanako-2D, o qual considera equações fisicamente embasadas de continuidade e conservação de momento, apresentou bons resultados em aplicações em áreas de estudo no sul do Brasil (MICHEL et al. 2015a e 2015b).

O Kanako-2D é um modelo numérico computacional que simula o fluxo de detritos a partir do volume de entrada por uma zona de propagação. O modelo considera o fluxo unidimensional a partir da zona de iniciação, indicando a ocorrência de deposição ou erosão de sedimento. Enquanto que na planície aluvial, a propagação é considerada em duas dimensões. A componente bidimensional considera equações de continuidade, equações do momento e de deformação do leito (MICHEL e KOBIYAMA, 2018).

O modelo é bastante complexo e requer a indicação de diversos parâmetros, entre eles dados topográficos, geometria do canal, peso específico do material do leito, coeficientes de erosão e sedimentação, diâmetro dos sedimentos, ângulo de atrito interno das partículas e coeficiente de Manning. A partir desses parâmetros resulta em dados de profundidade do fluxo, concentração, velocidade, altitude da superfície e profundidade de sedimentação (PAIXÃO, 2017). Muitos desses parâmetros são de difícil estimativa, além de dificilmente mensuráveis, até mesmo em pesquisas de campo, o que dificulta a utilização do modelo. Em vista disso, os valores muitas vezes são assumidos, incluindo inúmeras incertezas aos resultados.

Embora diversos modelos já tenham sido desenvolvidos, desde métodos relativamente simples até os de maior complexidade, dificilmente um único modelo pode ser considerado um modelo universal para análise de fluxo de detritos. Os modelos são a representação de um cenário envolvendo inúmeras incertezas. Deve-se considerar tanto a heterogeneidade do meio, quanto a dificuldade em realizar medições, principalmente dos parâmetros de fluxo. Em vista disso, a escolha do método deve ser feita considerando a finalidade de uso dos resultados e a disponibilidade de informações da área de interesse.

Não obstante os modelos dinâmicos utilizem relações matemáticas, ainda precisam ser consistentes com observações empíricas, a fim de garantir a sua validação (MCKINNON, 2010). McDougall et al. (2012) afirmam que frequentemente são utilizadas combinações de modelos empíricos e numéricos, de forma que possam convergir para um mesmo resultado possível. Apesar disso, os autores destacam os modelos empíricos utilizados isoladamente como efetivamente aplicáveis em diversas circunstâncias.

A existência de incertezas e limitações é inerente à escolha de utilização do modelo. Em especial, resultados obtidos de modelos numéricos complexos acabam procedendo de um somatório de diversas incertezas reconhecidas, as quais estão vinculadas com cada um dos diversos parâmetros utilizados. Além disso, Scheevel (2017) ressalta que modelos de elevada complexidade acabam sendo proibitivos em questão de tempo e orçamentos, indagando sua real aplicabilidade. Por conseguinte, pode-se embasar a relevância na utilização de modelos empíricos simplificados considerando a utilização de uma menor quantidade de parâmetros, consequentemente associados a um menor número de incertezas.

### 3.3.1.2. Modelos Empíricos

Os modelos empíricos correlacionam propriedades físicas da região de falha e comportamento do fluxo, utilizam dados de eventos registrados e análises estatísticas. Os modelos amplamente difundidos consideram de alguma forma o ângulo de alcance e relacionam com outros parâmetros como o volume de massa envolvido e a área ocupada pelo movimento, como apresentado por Scheidegger (1973), Corominas (1996); Legros (2002) e Iverson et al. (1998). Apesar de necessitarem de uma calibração com dados empíricos ou comparação com regiões de características similares, conforme McKinnon (2010), os modelos empíricos representam um papel muito relevante entre os sistemas de análise de fluxos, devido principalmente a sua facilidade de utilização.

O ângulo de alcance, também chamado de ângulo alfa (Figura 4), é caracterizado pelo ângulo formado entre o ponto de origem do fluxo, na cabeceira do movimento, até o ponto de maior alcance no final da zona de deposição. Esse ângulo foi introduzido por Heim (1932), que o chamou de ângulo *fahrböschung*, posteriormente por Hungr (1990), que o chamou de *travel angle* (ângulo de deslocamento), e por fim, Corominas (1996), que o chamou de *angle of reach* (ângulo de alcance). A partir da delimitação do valor do ângulo alfa, tendo conhecimento da topografia do terreno e das áreas mais suscetíveis à ocorrência de um movimento de massa, pode-se gerar um modelo topográfico baseado nessa relação, o qual permite estimar a distância atingida por um fluxo de detritos.

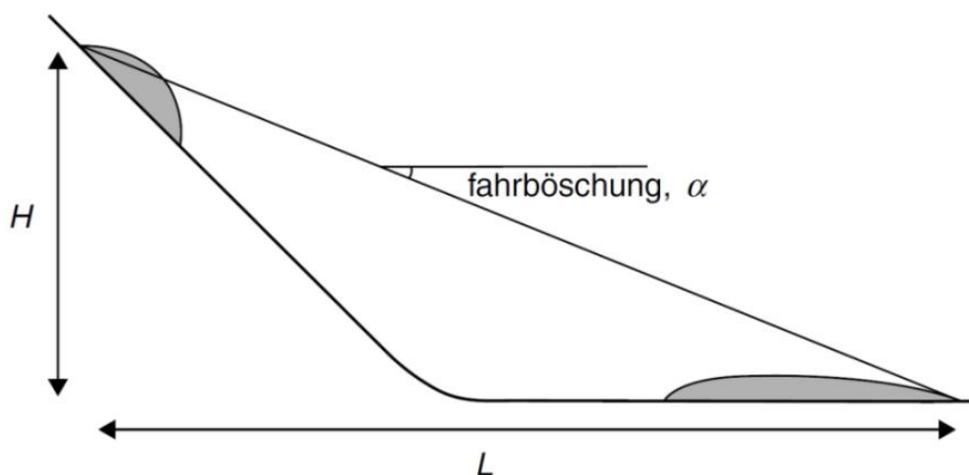


Figura 4. Indicação do ângulo Alfa ( $\alpha$ ).

Fonte: MCDUGALL, et al. (2014).

O modelo topográfico de estimativa da distância percorrida pelo fluxo é fundamentalmente referenciado em uma relação de conservação de energia. A partir das variáveis indicadas na Figura 5, considerando a perda de energia devido à fricção das partículas, são definidas as equações seguintes (KOBAYAMA et al. 2004).

$$mg\Delta s \cdot \sin\beta = \Delta \left( \frac{1}{2} mv^2 \right) + fmg\Delta s \cdot \cos\beta \quad (1)$$

Onde,  $m$  é a massa da porção que será deslocada;  $s$  é a distância percorrida,  $g$  é a aceleração gravitacional;  $v$  é a velocidade do fluxo e  $f$  é o coeficiente de atrito dinâmico, considerado constante. Além disso, a partir da configuração da Figura 5 pode-se definir as duas relações apresentadas na Equações (2 e (3, as quais inseridas na Equação (1) retornam à Equação (4.

$$\Delta s \cdot \sin\beta = \Delta h \quad (2)$$

$$\Delta s \cdot \cos\beta = \Delta x \quad (3)$$

$$\frac{1}{g} \Delta \left( \frac{1}{2} v^2 \right) = \Delta h - f \Delta x \quad (4)$$

Considerando o movimento desde a origem até a deposição, Scheidegger (1973) assumiu as velocidades inicial e final nulas. Dessa forma, a partir da Equação (4) obtém-se a Equação (5, a qual retorna uma relação do ângulo alfa com o coeficiente de atrito dinâmico.

$$f = \frac{h}{x} = \tan \alpha \quad (5)$$

Onde,  $h$  é o desnível da cabeceira do deslizamento até o último ponto de alcance do material,  $x$  é todo o deslocamento projetado horizontalmente e  $\alpha$  representa o ângulo de alcance. Essa equação é amplamente utilizada. As variáveis chamadas de  $h$  e  $x$ , usualmente apresentadas conforme a Figura 4,  $H$  e  $L$  respectivamente, são comumente aplicadas para caracterizar escoamentos gerados por movimentos de massa. De acordo com Legros (2002) estes parâmetros são os mais fáceis de medir e apresentam menos de 20% de erro relativo na maioria dos casos.

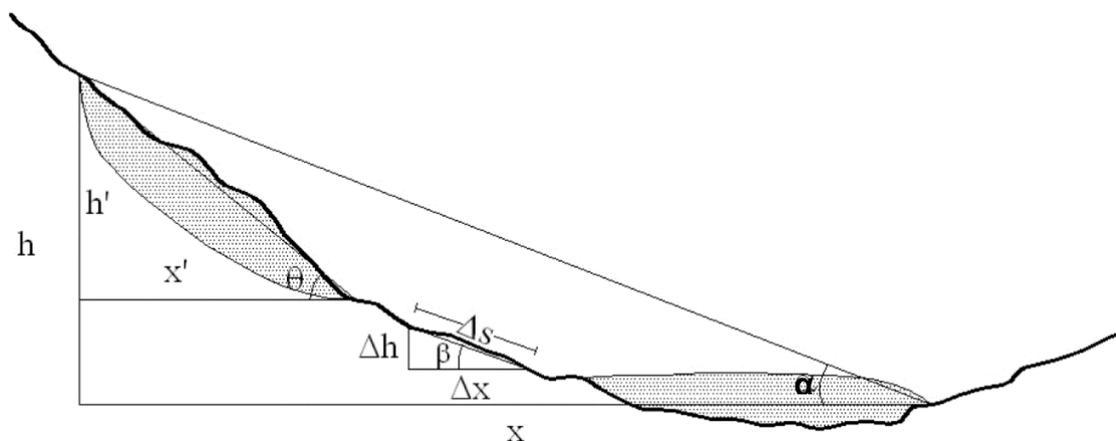


Figura 5. Geometria do fluxo e parâmetros considerados.

Fonte: Adaptado de SCHEIDEGGER (1973) e MORIWAKI (1987) apud KOBIYAMA et al. (2004).

A relação apresentada pela (5, de Scheidegger (1973), afirma que a tangente do ângulo de alcance é igual ao coeficiente de atrito da interface de contato entre a superfície e a massa de escorregamento, em conformidade com a afirmação de Shreve (1968), que considerou o ângulo *fahrböschung* como equivalente ao coeficiente de atrito. Corominas (1996) relatou que essa afirmação só é válida se considerada a linha que liga os centros de massa da área de escorregamento e depósito. Entretanto, essa abordagem considerando o centro de massa foi apresentada por Legros (2002), que concluiu em seu trabalho que em muitos casos onde a relação de  $H'/L'$  dos centros de massa era substituída por  $H/L$  das extremidades os resultados eram pouco alterados. Ademais, definiu que os resultados obtidos da relação  $H/L$  eram muito mais influenciados por alterações no volume do que variações do  $H$ , ou seja, considerando que o fluxo percorre longas distâncias a diferença entre  $H$  e  $H'$  é amenizada em função de  $L$ . Contudo, fluxos que possuem menor alcance, geralmente associados a menores volumes, podem sofrer maior influência desse parâmetro.

### Parâmetros Relacionados ao Ângulo Alfa

Guo et al. (2014) avaliaram a correlação entre o ângulo alfa, chamado pelos autores de coeficiente de atrito equivalente, com seis diferentes parâmetros, entre eles os efeitos gerados por fatores topográficos, tipo de rocha e volume de material.

Contudo, foram considerados apenas movimentos classificados como deslizamentos e desencadeados por terremotos. Ainda assim, a conclusão aponta uma correlação muito baixa ou até mesmo inexistente entre os parâmetros, com exceção da correlação entre os logaritmos do ângulo alfa e do volume, considerando apenas os volumes acima de  $10^5$  m<sup>3</sup>. Destarte, os autores defendem que o modelo que define o ângulo alfa deve ser feito considerando a influência simultânea de vários fatores de maneira conjunta, gerando a relação apresentada na Tabela 2, onde além do volume são considerados a altura da encosta, o ângulo de transição (mudança de inclinação da encosta) e o tipo de rocha.

Considerando que o volume do movimento é o parâmetro com melhor correlação ao ângulo alfa, foram desenvolvidos diversos estudos dessa relação, inicialmente apresentados por Heim (1932). Scheidegger (1973) definiu como reconhecido o fato de que grandes volumes envolvidos em movimentos de massa estavam associados a menores ângulos de atrito. Sendo que a relação entre as variáveis é estabelecida a partir de regressão linear aplicada aos logaritmos dos dados, conforme apresentado pela Equação (6).

$$\log\left(\frac{H}{L}\right) = a \cdot \log V + b \quad (6)$$

Onde  $V$  representa o volume de massa deslocado (m<sup>3</sup>), e as variáveis  $a$  e  $b$  são coeficientes determinados empiricamente de acordo com uma série de registros de ocorrência, variando em função principalmente do tipo de movimento. Alguns desses coeficientes são sugeridos por Corominas (1996), que analisou diversos eventos de uma mesma região, gerando diferentes equações específicas para cada movimento, sendo apresentada na Tabela 2 a equação referente a todos os movimentos observados. A Tabela 2 também apresenta as equações desenvolvidas a partir de deslizamentos por Scheidegger (1973) e Legros (2002) considerando apenas um coeficiente empírico.

Tabela 2. Equações de modelos em função do Ângulo alfa.

<b>Modelo de Alcance</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Dados utilizados</b>	<b>Referência</b>
$\alpha = 0,564 \log(h) - 0,077RT - 0,376 \sin\beta - 0,096 \log(V)$	-	46 deslizamentos	GUO et al. (2014)
$\alpha = -0,157 \log(V) + 0,624$	0,82	33 deslizamentos	SCHEIDEGGER (1973)
$\alpha = -0,085 \log(V) - 0,047$	0,625	204 deslizamentos, 71 fluxos de detritos	COROMINAS (1996)
$\alpha = 0,16V^{-0,15}$	0,63	32 deslizamentos	LEGROS (2002)

Onde: V é o volume em m<sup>3</sup>, com exceção de LEGROS (2002) onde V é o volume em km<sup>3</sup>); h é a altura da encosta (m); RT representa o tipo de rocha,  $\beta$  é um valor de transição da declividade.

Dos modelos apresentados na Tabela 2 os mais consolidados consideram a relação expressa pela Equação (6, sendo Corominas (1996) uma das maiores referências por ter apresentado coeficientes considerando separadamente os diferentes tipos de movimentos de massa. Além disso, geralmente, os modelos empíricos que descrevem a relação em função do volume, limitam a utilização para um intervalo de volumes pequenos ou grandes, sendo utilizados os valores acima do intervalo de 10<sup>5</sup> a 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, para caracterizar grandes volumes. Contudo, Corominas (1996) especificou que a equação geral descrita por ele, pode ser utilizada para um amplo intervalo de volume, mesmo apresentando um coeficiente de correlação melhor para os volumes maiores. A Tabela 3 apresenta alguns dos valores sugeridos de H/L indicados como recorrentes para cada movimento em específico ou obtidos por equações como a Equação (6).

Tabela 3. Valores sugeridos para o ângulo de alcance considerando diferentes tipos de movimento de massa.

<b>Característica</b>	<b>H/L</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>Referência</b>
Fluxo de lama não obstruído	0,08**	5°	COROMINAS, 1996
Fluxo de detritos (granulometria fina)	0,12	7°	ZIMMERMANN et al. (1997) apud KAPPES et al. 2010)
Fluxo de detritos a partir de escorregamento	≥0,17	10°	SCHEEVEL, 2017
Fluxo de detritos	0,19	11°	RICKENMANN e ZIMMERMANN (1993)
Fluxo de detritos canalizado	0,18**	11°	COROMINAS, 1996
Fluxo de detritos obstruído	0,20**	11°	COROMINAS, 1996
Fluxo de detritos em geral	0,22**	13°	COROMINAS, 1996
Fluxo de detritos não obstruído	0,23**	13°	COROMINAS, 1996
Fluxo de terra em geral	0,23**	13°	COROMINAS, 1996
Movimentos de massa de menor volume	0,41***	22°	COROMINAS, 1996
Escorregamentos	0,69*	34°	SCHEIDEGGER, 1973

Os volumes foram escolhidos em função dos limites estabelecidos pelos autores com melhor correlação. \*Valor estimado a partir dos coeficientes para o volume de  $10^5$  m<sup>3</sup>. \*\*Valores estimados a partir dos coeficientes para volumes de  $10^6$  m<sup>3</sup>; \*\*\*Valor estimado a partir dos coeficientes para volume de  $10^4$  m<sup>3</sup>.

### **3.4. *Avalanche Runout***

A modelagem empírica através do ângulo alfa (ângulo de alcance) pode ser feita a partir de softwares de mapeamento do fluxo de detritos. Dentre eles, a ferramenta *D-Infinity Avalanche Runout* (Escoamento da Avalanche pelo D-infinito), da plataforma de análises hidrológicas TauDEM (item 3.3.1.), permite a aplicação do ângulo alfa de forma automatizada. A *Avalanche Runout*, desenvolvida para identificar a área afetada por uma avalanche, pode ser aplicada a outros movimentos de massa, como o fluxo de detritos. A ferramenta é baseada em um modelo de movimento multidirecional, no qual são consideradas infinitas direções de fluxo entre todas as células adjacentes com menor altitude que a célula de origem. A

ferramenta é aplicada a partir da direção de fluxo D-infinito (item 3.3.2.), que permite determinar o caminho do fluxo com maior precisão. As condições de dispersão do fluxo são limitadas por um coeficiente chamado de coeficiente de espalhamento, que indica a porcentagem mínima de fluxo considerada para indicar como parte da área afetada.

Utilizando apenas um modelo digital de elevação é possível identificar o comprimento do fluxo a partir de cada célula da origem até o ponto onde a inclinação do movimento atingir o valor limiar estabelecido pelo ângulo alfa. A ferramenta permite gerar um modelo de previsão de fluxo de detritos, o qual estabelece o alcance e dimensão da área afetada, desde que, previamente indicadas às áreas mais suscetíveis a desencadear o movimento.

A ferramenta *D-Infinity Avalanche Runout* é de simples utilização, sendo usualmente aplicada na previsão de avalanches de neve. Entre os trabalhos realizados nesse contexto são referenciados os estudos realizados por Grilc (2016) e Kriticos e Davies (2014). Grilc (2016) realizou uma avaliação de ameaças de avalanches nos Alpes Julianos a partir de geoprocessamento. O estudo considera uma série de fatores para gerar um mapa de risco de deslizamento de avalanche. Entre os fatores considerados, o autor utiliza a ferramenta *Avalanche Runout* para estimar o comprimento de alcance da movimento. Além disso, considera outros fatores como curvatura da superfície, rugosidade superficial, velocidade do vento, vegetação, comprimento da encosta e duração e espessura da camada de neve. Cada um desses fatores é condicionado a um intervalo entre 0 e 1 e através de uma combinação linear ponderada permite a geração do mapa de risco.

Kriticos e Davies (2014) utilizaram a ferramenta *Avalanche Runout* para gerar um mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos numa região dos Alpes da Nova Zelândia. A obtenção das áreas suscetíveis a deslizamentos foi feita por modelos estatísticos e o melhor resultado foi aplicado à ferramenta de alcance do fluxo. Considerando as áreas com suscetibilidade muito alta a escorregamentos foi gerado o mapa indicado na Figura 6, exclusivamente utilizando a *Avalanche Runout* e considerando um limiar estabelecido pelo ângulo alfa de 4°.

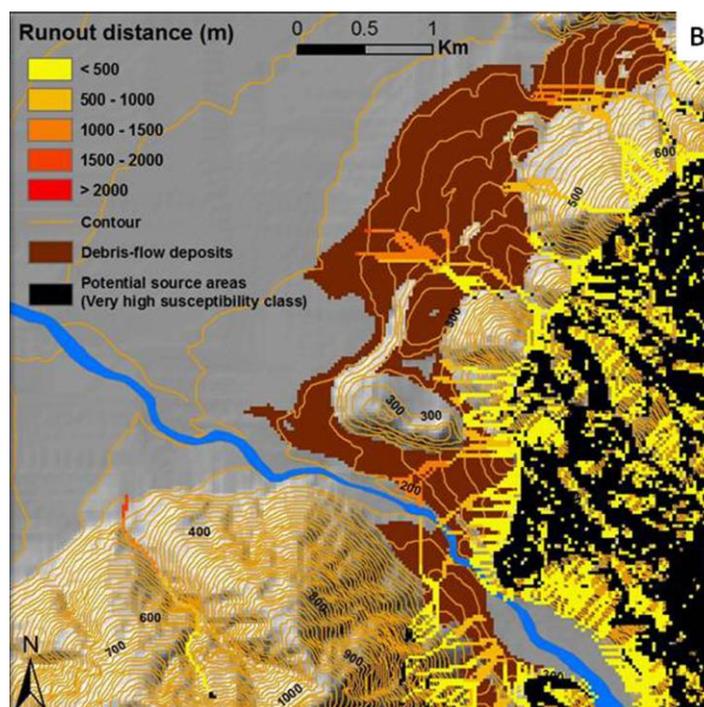


Figura 6. Mancha de alcance do fluxo de detritos gerada a partir de áreas de suscetibilidade muito alta a escorregamentos.

Fonte: KRITICOS e DAVIES (2014).

### 3.4.1. TauDEM

A Universidade do Estado de Utah (USU), pela responsabilidade de David Tarboton, desenvolveu no ano de 1997 um software chamado TauDEM, *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*, para análises hidrológicas a partir de modelos digitais de elevação (MDE). O TauDEM compreende um conjunto de ferramentas utilizadas em um software de geoprocessamento para obtenção de análise de informações hidrográficas e de topografia. A arquitetura do software separa o sistema em um conjunto de linhas de comando que executam diferentes funções e exibem os resultados de forma equivalente a qualquer outra ferramenta do software de geoprocessamento (TARBOTON, DASH, & SAZIB, 2015). O software é disponibilizado gratuitamente e é de fácil utilização.

### 3.4.2. Direção de Fluxo D-infinito

A *Avalanche Runout* é fundamentada no parâmetro de direção de fluxo, ou seja, o resultado está diretamente associado com o método de direção utilizado.

Existem diversas metodologias disponíveis para estimar direções de fluxo. Dentre elas, inicialmente foi introduzido por O'Catlangahn and Mark (1984) o D8, onde são consideradas as oito células vizinhas adjacentes ou diagonais de uma célula central. Outros métodos desenvolvidos são o DEMON que utiliza o valor da elevação de cada célula do MDE como o canto do pixel ao invés de um bloco centralizado (COSTA-CABRAL e BURGESS, 1994), e o MS, um método de múltiplas direções de fluxo baseadas proporcionalmente aos valores de declividade (QUINN et al., 1991). Contudo, todos os métodos citados apresentam algumas limitações respectivamente como a insuficiência de dispersão do fluxo, a precisão na qual as direções são escolhidas ou o espalhamento em excesso. Em função disso, visando suprir as limitações oferecidas pelos métodos já existentes, Tarboton (1997) criou o D-infinito a fim de determinar a direção do escoamento baseado no movimento multidirecional do fluxo.

O D-infinito, apresentado como *Dinfinity Flow Direction* pela plataforma TauDEM, é um mecanismo que considera infinitas opções de direção de fluxo. A configuração de divisão das células em oito facetas, unindo o centro da célula de origem com o centro das células vizinhas, permite estabelecer proporcionalmente a direção do fluxo em até duas células. Essa proporção é determinada em função do coeficiente de espalhamento que indica a porcentagem mínima necessária de fluxo na célula para que a mesma seja atingida. Dessa forma, é possível estabelecer a direção de maior desnível negativo com o pixel de origem com maior precisão.

A Figura 7 é uma representação de um modelo digital de elevação com dados de altimetria em cada pixel. Considerando o método Dinfinity é possível direcionar o fluxo para até duas células que apresentarem a direção de maior declividade negativa, no caso, partindo da célula central de valor 100, as células a sudeste de valores 87 e 92. A proporção de fluxo entre as duas células é de 62% e 38% respectivamente. Considerando um coeficiente mínimo de espalhamento de 0,5, ou seja, 50%, teríamos apenas a célula de valor 87 atingida.

Utilizando o método desenvolvido por Tarboton (1997) as limitações derivadas de efeitos de espalhamento em excesso ou reduzido são restringidas, conforme pode ser verificado na Figura 8 onde são comparados os quatro métodos citados. A representação da dispersão do fluxo em cada método varia significativamente, sendo o D-infinito o que apresenta uma condição mais equilibrada, sem dispersão em excesso ou extremamente reduzida.

120	118	112
115	<b>100</b>	95
98	<b>87</b>	92

Figura 7. Análise dos pixels pela direção de fluxo considerando o método do D infinito.

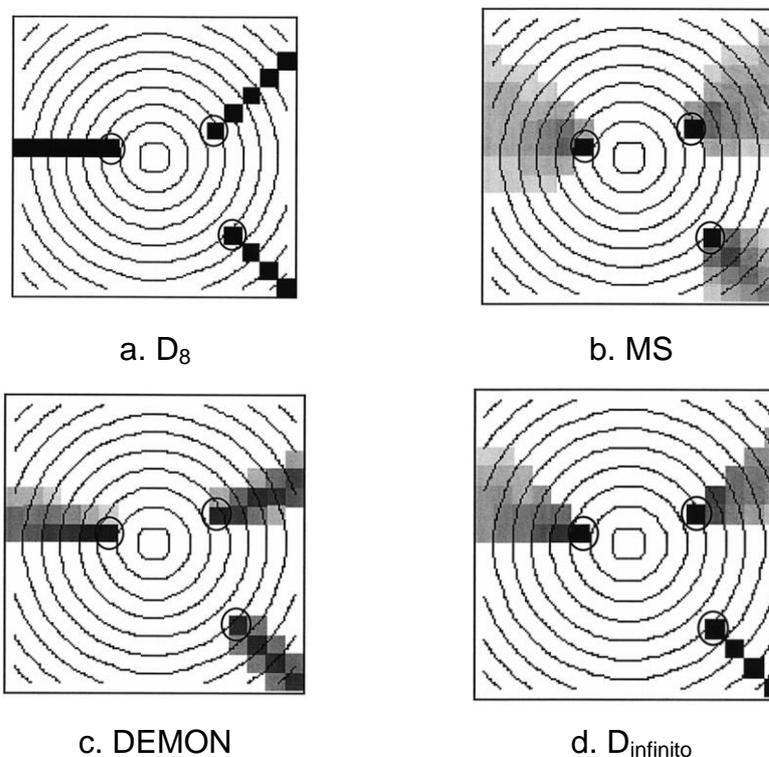


Figura 8. Comparação entre métodos utilizados para direção de fluxo.

Fonte: Adaptado de TARBOTON (1997).

### 3.5. Mapa de Suscetibilidade

A redução dos potenciais riscos relacionados com movimentos de massa e fluxo de detritos está diretamente associada com a orientação obtida através de modelos, os quais estabelecem uma previsão da distribuição e intensidade de

avanço do movimento. Conforme McKinnon (2010) essa é considerada a melhor técnica de redução de risco para os eventos de fluxo. Por conseguinte, após obtenção dos resultados de previsão do modelo a representação de maior utilidade e facilidade de interpretação é um mapa de suscetibilidade.

O termo suscetibilidade, no âmbito das geociências pode ser indicado como a predisposição ou propensão do terreno ao desenvolvimento de um fenômeno ou processo do meio físico (IPT e CPRM, 2014). O mapa de suscetibilidade está diretamente relacionado com a possibilidade de ocorrência de um evento e difere do conceito representado por um mapa de risco. Em termos conceituais a condição de risco une a suscetibilidade e a vulnerabilidade, considerando a exposição ao evento e o grau de perdas associado. Bertone e Marinho (2013) exemplificam essa condição considerando uma determinada população em situação de risco ao ocupar um terreno suscetível a desastres e, além disso, apresentar um padrão construtivo das edificações de caráter frágil, tornando-se então, vulnerável. Dessa forma, um mapa de risco considera as condições de perda e danos que seriam geradas, enquanto um mapa de suscetibilidade avalia apenas a predisposição de uma determinada área a sofrer os resultados de um evento em questão.

A suscetibilidade (*susceptibility*) é diretamente associada ao termo perigo (*hazard*), apresentando forte correspondência na literatura internacional (IPT e CPRM, 2014). O termo perigo remete à ameaça, de acordo com IPT e CPRM (2014) expressa uma condição com potencial para causar consequências negativas em um dado período de tempo. As duas nomenclaturas podem ser diferenciadas considerando que uma análise de perigo está mais direcionada para as consequências geradas pelo evento e o período em que pode ocorrer, enquanto que uma análise de suscetibilidade é voltada para identificar o local com maior propensão e fatores favoráveis a ocorrência do desastre.

O conhecimento prévio das suscetibilidades dos terrenos à geração e desenvolvimento de fenômenos e processos do meio físico cuja dinâmica pode ocasionar desastres é de grande importância, principalmente em âmbito municipal, contribuindo para o planejamento do uso e ocupação do solo, controle da expansão urbana, avaliação de cenários potenciais de riscos e, ainda, no âmbito regional para auxiliar na elaboração de zoneamentos ecológico-econômicos (IPT e CPRM, 2014). A utilização de mapas de suscetibilidade no planejamento de um município permite a aplicação de instrumentos de zoneamento, os quais propiciam um desenvolvimento

local adequado, reduzindo riscos e evitando danos e perdas na ocorrência de um evento de elevado potencial de impacto destrutivo.

### **3.5.1. Mapeamento de Fluxos de Detritos no Brasil**

A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) após ser convocada para elaboração dos mapas de suscetibilidade dos municípios brasileiros, conforme melhor descrito no item 3.5.2, desenvolveu em 2012 uma metodologia para determinação de áreas suscetíveis a corridas de massa e enxurradas. Inicialmente são aplicados alguns critérios como fatores de predisposição ao fluxo de detritos, entre eles: (i) unidades de relevo serrano; (ii) terrenos com alta suscetibilidade a deslizamentos; (iii) amplitude maior que 500 metros; (iv) área da bacia de drenagem menor que 10 km<sup>2</sup> e (v) Índice de Melton (M), que representa a relação entre amplitude e área da bacia, maior que 0,3 (IPT e CPRM, 2014). Esses critérios são sobrepostos e aplicados às áreas de análise e resultam na delimitação das áreas que apresentam maior suscetibilidade à geração dos processos, em relação às demais.

Segundo a IPT e CPRM (2014) para aumentar a precisão do método caberia agregar um número maior de retroanálises de eventos nacionais e realizar maior detalhamento de levantamentos em campo, o que demanda maior tempo e equipe especializada. Outra limitação relevante apontada pelos autores indica que a trajetória e o raio de alcance não são passíveis de cálculo e de representação cartográfica adequada, uma vez que os dados disponíveis e a escala de referência adotada não permitem essa especificação. Ainda assim, diversas cidades do país já foram contempladas com o mapeamento de suscetibilidade gerado pela CPRM, principalmente os municípios com histórico de desastres ocorridos.

### **3.5.2. Cartas de Suscetibilidade da CPRM**

No Brasil, após a ocorrência de inúmeros desastres devastadores, em especial inundações e deslizamentos de terra como os ocorridos em 2011 em Nova Friburgo no Rio de Janeiro, o Governo Federal consolidou a relevância em prevenir e mitigar os desastres. Através de Lei 12.608/2012 é estabelecido como dever da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios adotar as medidas necessárias à

redução dos riscos de desastres. Por conseguinte, foi designado à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), seguindo o Programa de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais, incluído no Plano Plurianual 2012-2015 do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, elaborar mapas de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações para os municípios do país.

Em 2012 a CPRM foi convocada pela Presidência da República Brasileira para atuar na Força Tarefa do Governo Federal e desde então já foram feitos levantamentos de mais de 300 municípios brasileiros, considerando dados até janeiro de 2016. As informações geradas são disponibilizadas gratuitamente com intuito que sejam utilizadas pelos governantes e pela própria população a fim de evitar ou reduzir a exposição aos riscos. Os mapas gerados são apresentados como cartas de suscetibilidade contendo áreas suscetíveis a ocorrência de movimento de massa e inundações.

A Figura 9 apresenta o mapa gerado pela CPRM (2014) para o município de Alto Feliz, RS, que apresenta um histórico de fatalidades ocasionadas por fluxo de detritos nos anos de 1982 e 2000. Em especial, o evento ocorrido em dezembro de 2000, na bacia do arroio Jaguar, resultou em uma grande fatalidade. O evento foi marcado pela ocorrência de escorregamentos na encosta que culminaram para o canal dando origem ao fluxo de detritos. O fluxo atingiu uma residência localizada no vale da encosta, resultando na morte dos quatro membros da família que residiam no local. As Figura 10 e Figura 11 apresentam registros da região logo após a ocorrência do evento.

A CPRM evidencia que os mapas não apresentam interação entre os processos, sem indicar uma trajetória ou raio de alcance. As áreas são apenas classificadas entre os níveis alto, médio e baixo de acordo com a predominância quanto ao processo analisado, considerando maior ou menor propensão em relação ao restante das áreas. Ademais, reconhecem que em áreas urbanas e edificadas algumas classes indicadas podem estar alteradas apresentando maior ou menor suscetibilidade em função do grau de influência da ocupação existente. Assim sendo, adverte que as áreas reconhecidas como baixa suscetibilidade não abstem a possibilidade de ocorrência do evento, uma vez que deve-se considerar modificações da dinâmica e feição local devido aos processos naturais e alterações antrópicas.

Em vista das limitações indicadas pelo método da CPRM, e diante das inúmeras opções de modelos de fluxo de detritos, o presente trabalho verifica a aplicabilidade de uma metodologia simplificada a partir da ferramenta *Avalanche Runout*. A metodologia fundamentada no ângulo de alcance, em comparação a modelos mais complexos de difícil utilização, permite uma ampla aplicação devido à facilidade de uso, principalmente em regiões com pouca disponibilidade de dados e recursos. Dessa forma, facilita a geração de mapas de suscetibilidade a fluxo de detritos, em especial em municípios como Alto Feliz, que apresentam um histórico de ocorrência do movimento.

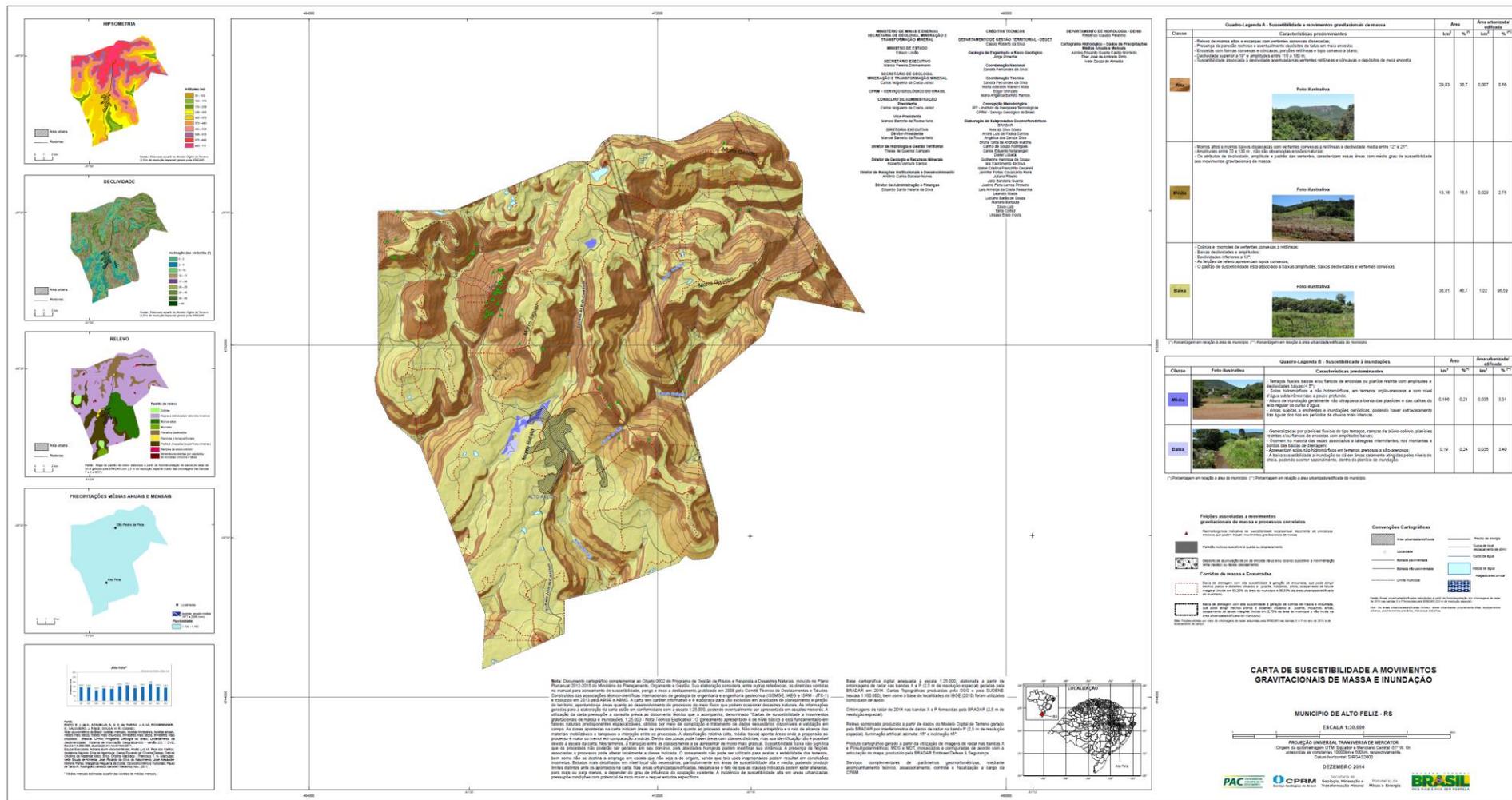


Figura 9. Mapa de suscetibilidade a desastres no município de Alto Feliz, RS.

Fonte: CPRM, 2014.



Figura 10. Local onde foi encontrado uma das vítimas carregada pelo fluxo. Ao fundo da imagem pode-se enxergar a cicatriz do escorregamento que deu origem ao movimento.

Fonte: Cedida por Laurindo Boeni.



Figura 11. Fusca pertencente à família atingida, localizado no pátio da casa e encontrado próximo ao local depois da ocorrência do evento.

Fonte: Cedida por Laurindo Boeni.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. Área de Estudo**

A bacia do Arroio Jaguar, de aproximadamente 25 km<sup>2</sup> de área, pertence ao município de Alto Feliz, o qual possui cerca de três mil habitantes. É dividido em 15 localidades, sendo uma das principais a região da Bacia do Arroio Jaguar. A bacia não é urbanizada, mas é composta por propriedades reconhecidas como minifúndios, 95% da área do município é considerada rural e destinada à agricultura familiar.

#### **4.1.1. Localização**

A bacia do arroio Jaguar está localizada no município de Alto Feliz no estado do Rio Grande do Sul (Figura 12). O principal curso d'água é o arroio Jaguar que deságua no arroio Forromeco, um dos principais afluentes do rio Caí. A maior parte da bacia está inserida no município de Alto Feliz, fazendo divisa com o município de São Vedelino, ambos parte da mesorregião Metropolitana de Porto Alegre e microrregião de Montenegro. Uma pequena área da bacia, cerca de 1,5 km<sup>2</sup>, está dentro dos limites das cidades de Carlos Barbosa e Farroupilha, municípios inseridos na mesorregião do nordeste Rio-Grandense e microrregião de Caxias do Sul.

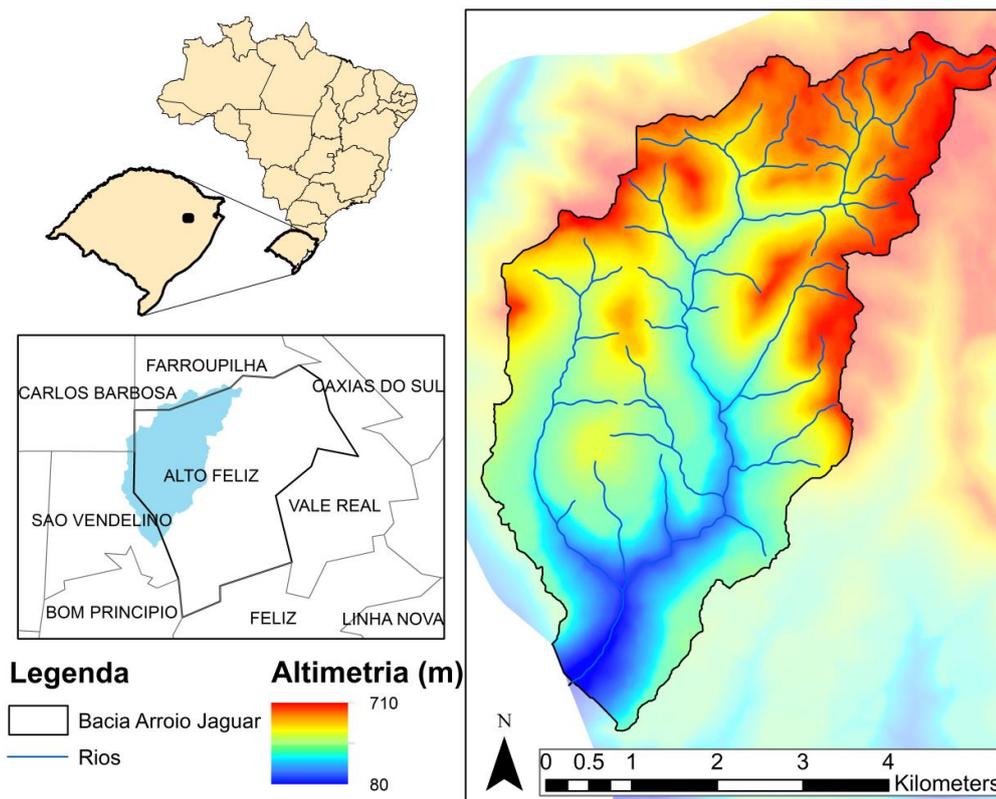


Figura 12. Localização e Altimetria da Bacia do Arroio Jaguar.

#### 4.1.2. Geologia e Geomorfologia

A bacia do Arroio Jaguar está inserida na região de Encosta Inferior do Nordeste Rio-Grandense, localizada sobre uma série de derrames da formação Serra Geral nas Fácies Palmas/Caxias e Gramado. Essa interface entre as duas Fácies, como apresentado pela Figura 13, resulta em uma forte interferência na geomorfologia local. Segundo Wildner et al. (2004), as lavas tipo Palmas assentam diretamente sobre os basaltos tipo Gramado, onde o contato entre elas caracteriza uma zona de erosão responsável pela geração de um paleorelevo formado por canais fluviais escavados sobre horizontes de conglomerados e platôs.

A Fácies Palmas-Caxias é formada por derrames de composição intermediária à ácida, caracterizada pela presença de riodacitos e riolitos de coloração cinza clara a esbranquiçada, textura fanerítica fina e aspecto mosqueado (pontos esbranquiçados), dominância de matriz vítrea com cristálitos de feldspato e clinopiroxênio. É caracterizada por derrames mais espessos, que apresentam disjunção tabular incipiente e irregular na base, uma porção central bem

desenvolvida e maciça, e no topo uma disjunção tabular extremamente bem desenvolvida.

Já a Fácies Gramado é caracterizada por rochas básicas, predominantemente basaltos e andesibasaltos. Apresenta zonas vesiculares bem desenvolvidas no topo e incipientes na base, preenchidas especialmente por zeólitas, carbonatos e apofilitas. A porção central é formada por rocha granular homogênea, com disjunção colunar bem desenvolvida, textura microfanerítica, compacta e de coloração cinza-escuro a cinza-esverdeado, além de possuir intercalações com arenitos Botucatu.

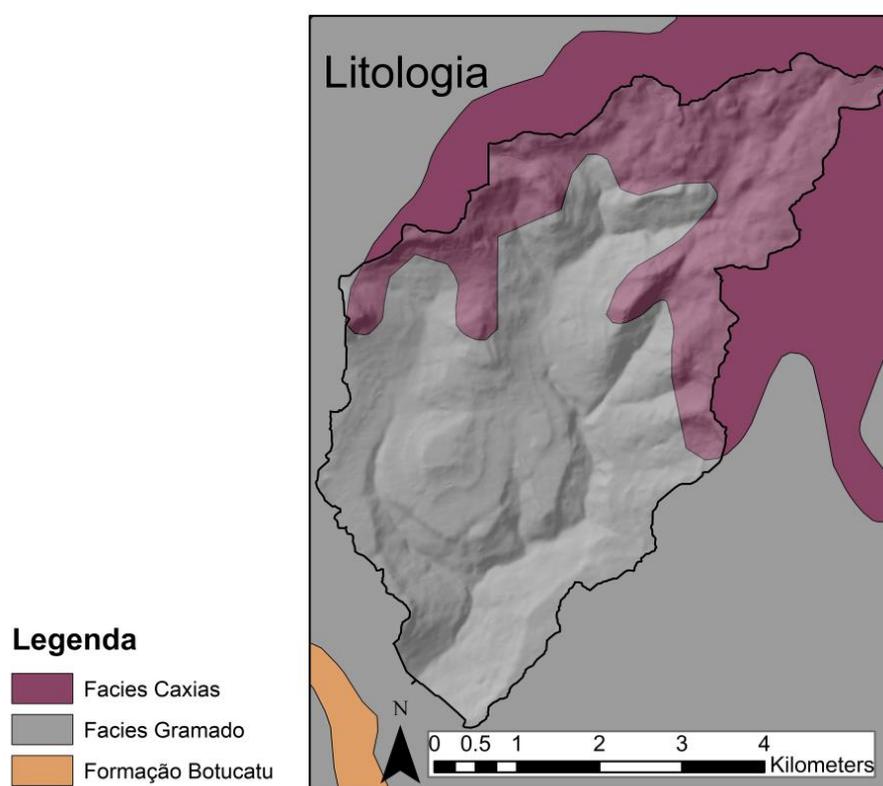


Figura 13. Litologia da Bacia do Arroio Jaguar.

As rochas ácidas apresentam maior resistência à erosão, o que fundamenta as diferenças de relevo fortemente associadas à formação rochosa local. Conforme Azambuja et al. (2001), a vertente dos fluxos de detritos está diretamente relacionada à principal quebra de relevo da região, caracterizada pelas bordas das unidades vulcânicas ácidas, proporcionando grande energia e velocidade aos fluxos nos canais. A origem do movimento geralmente ocorre na área de encosta sobre a formação ácida, segue pela zona de transporte caracterizada pela formação de basaltos que apresenta uma redução da declividade até atingir as zonas de

deposição. A Figura 14 apresenta um perfil da descrição desse movimento relacionado à geomorfologia da região, que pode ser embasado pelo Mapa de Declividades apresentado na Figura 15.

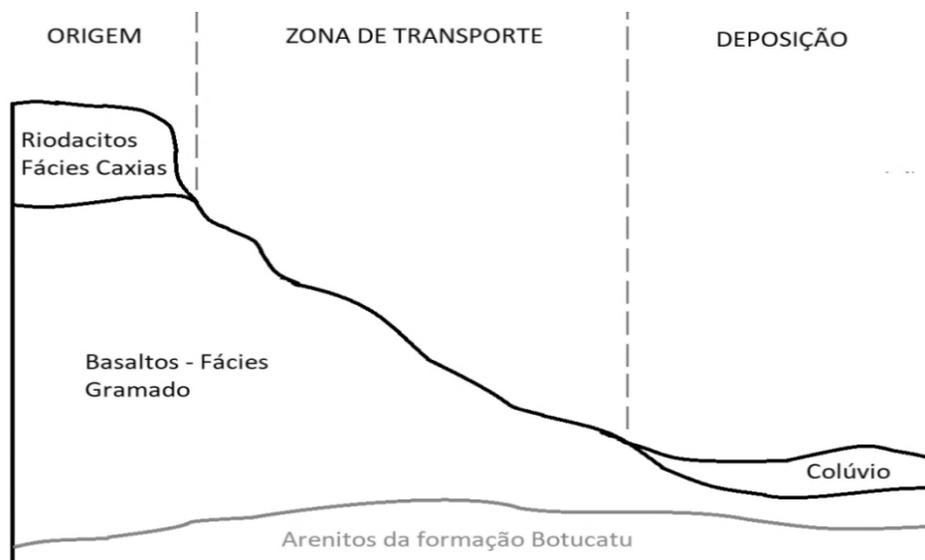


Figura 14. Perfil geológico típico da região da bacia do Arroio Jaguar.

Fonte: Adaptado de Azambuja (2001).

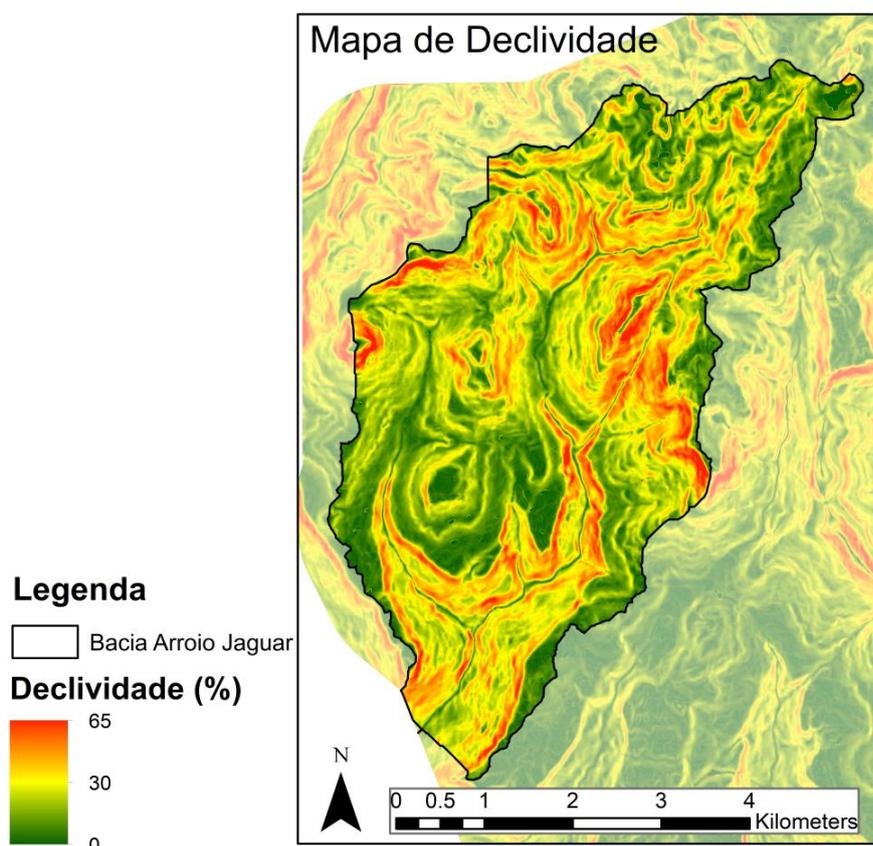


Figura 15. Mapa de Declividades.

Segundo a classificação da EMBRAPA (2006), a região de estudo apresenta um relevo predominantemente ondulado e forte-ondulado, caracterizados respectivamente por declividades de  $8^{\circ}$  a  $20^{\circ}$  e  $20^{\circ}$  a  $45^{\circ}$ , sendo a declividade média da bacia de  $15^{\circ}$ . As áreas de relevo suave-ondulado e plano consistem principalmente sobre a formação de rochas básicas de relevo mais dissecado. Além disso, pode-se verificar na Figura 16 alguns pontos nas encostas sobre a formação Fácies Caxias com declividades acima dos  $45^{\circ}$ , chegando próximo aos  $70^{\circ}$ , caracterizando um terreno montanhoso segundo classificação da EMBRAPA (2006).

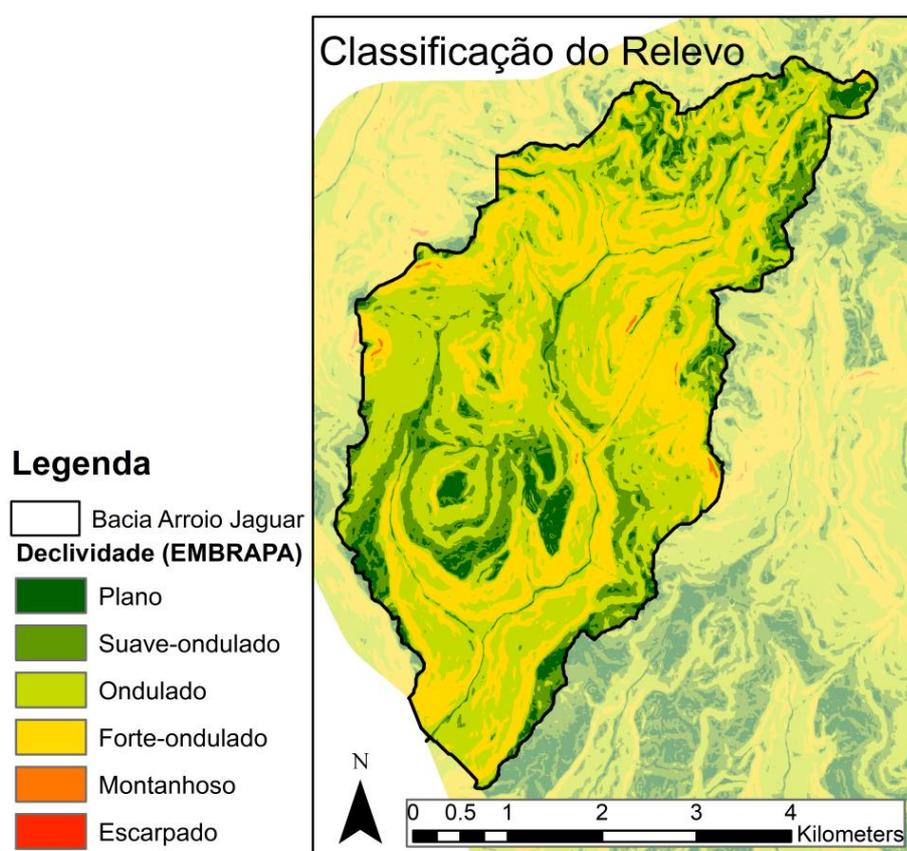


Figura 16. Declividades do terreno segundo classificação da EMBRAPA (2006).

#### 4.1.3. Solos

A região de Encosta do Rio Grande do Sul apresenta como solos característicos os Neossolos, Chernossolos, Cambissolos e Nitossolos, encontrados na região de estudo conforme apresentando pela Figura 17, segundo Vieiro e Silva (2010). Os Neossolos (RLe 2) ocupam a maior parte da bacia, constituindo também as áreas de maior declividade, onde apresentam afloramentos rochosos em grande

quantidade, são solos mais novos típicos de encostas, não bem consolidados. De acordo com a descrição de Flores et al. (2007) a classe RLe 2 representa a associação de neossolo litólico eutrófico típico, de textura média e com fases pedregosas e rochosas, associado a um terreno montanhoso; agregado ao cambissolo háplico Ta eutrófico áptico, de textura argilosa e fase pedregosa, associado ao relevo forte ondulado.

A segunda classe que ocupa maior área na bacia são os Nitossolos (NVdf 2), caracterizados por um nitossolo vermelho distrófico típico, de textura muito argilosa e em fase de relevo suave-ondulado; combinado com um cambissolo háplico Tb distrófico típico, de textura argilosa e em relevo ondulado. Ademais, encontra-se na bacia a classe dos Chernossolos (MXo 4), chernossolo argilúvico férrico típico, de textura muito argilosa e fase de relevo suave-ondulado; combinado com chernossolo háplico órtico típico, com textura argilosa e fase pedregosa em relevo ondulado; associados ao neossolo litólico eutrófico típico chernossólico, de textura média e fase pedregosa em relevo ondulado. Além da classe MXo 4 a região próxima a bacia também apresenta Chernossolo (MXo 1), uma associação de chernossolo háplico órtico típico, de textura argilosa e fase pedregosa em relevo ondulado; combinado com chernossolo argilúvico férrico típico, de textura muito argilosa e relevo plano. São solos férteis e agriculturáveis, atividade bastante realizada na região.

Por último, a área da bacia também apresenta a associação de Cambissolo (CXbd 11), cambissolo háplico Tb e Ta distrófico e eutrófico típico, com textura média e fase pedregosa em relevo suave ondulado; em conjunto com neossolo litólico distrófico típico, textura média e relevo ondulado, ambos com horizonte A proeminente; combinado com argissolo acinzentado distrófico úptico, horizonte A moderado textura média/argilosa e fase de relevo suave-ondulado. São solos de transição, também característicos de encostas.

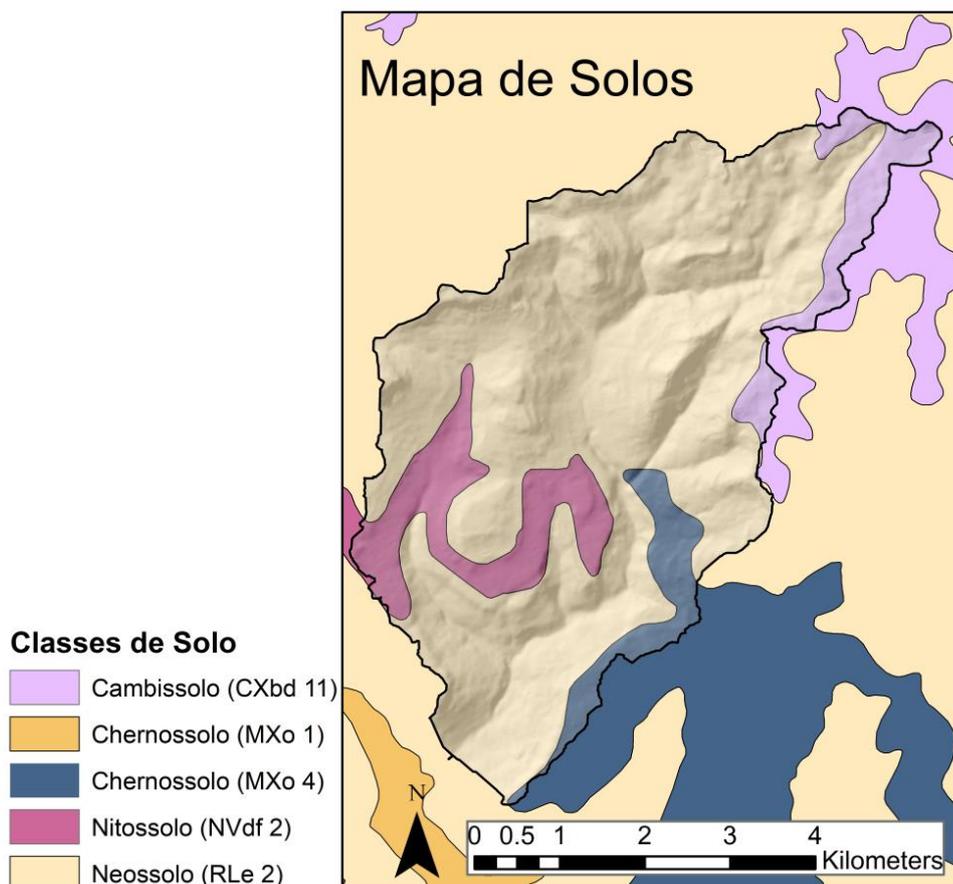


Figura 17. Mapa de solos da bacia do Arroio Jaguar.

#### 4.1.4. Uso do Solo e Vegetação

A vegetação na área de estudo segue um padrão semelhante à litologia da bacia, classificando a região de cabeceira como Floresta Estacional Decidual (Floresta Tropical Caducifólia), e o restante da bacia, sobre região de menor elevação, possui uma vegetação de classificação Floresta Ombrófila Mista (Floresta de Araucária), (SIGBio – RS, 2018). A bacia do arroio Jaguar consiste em uma zona rural, basicamente com atividades agrícolas e um forte crescimento de prática de silvicultura. Inclusive, áreas de cicatriz de movimento de massa, já apresentam plantação de eucaliptos. A remoção da cobertura natural da mata aumenta a exposição do solo e principalmente reduz o efeito gerado pelas raízes, facilitando a ocorrência de movimentos de massa no local. Apesar disso, a maior parte da vegetação, principalmente nas áreas de encosta, permanece inalterada.

#### 4.2. Modelagem de Fluxos de Detritos com a *Avalanche Runout*

O presente trabalho utilizou a ferramenta *Avalanche Runout* para determinação de áreas susceptíveis a fluxos de detritos. O processo num todo foi considerado como um modelo de fluxo de detritos, mesmo que simplificado, o qual é aplicado utilizando o pacote de ferramentas TauDEM manipuladas como extensão no ArcMap. O ArcMap é a principal plataforma do software de geoprocessamento ArcGIS desenvolvido pela Esri, onde é possível visualizar, criar e editar dados de informação geoespacial. As etapas de processamento e a obtenção dos resultados do modelo são descritos de acordo com as Figura 18 e Figura 19 e serão detalhadas nos próximos itens.

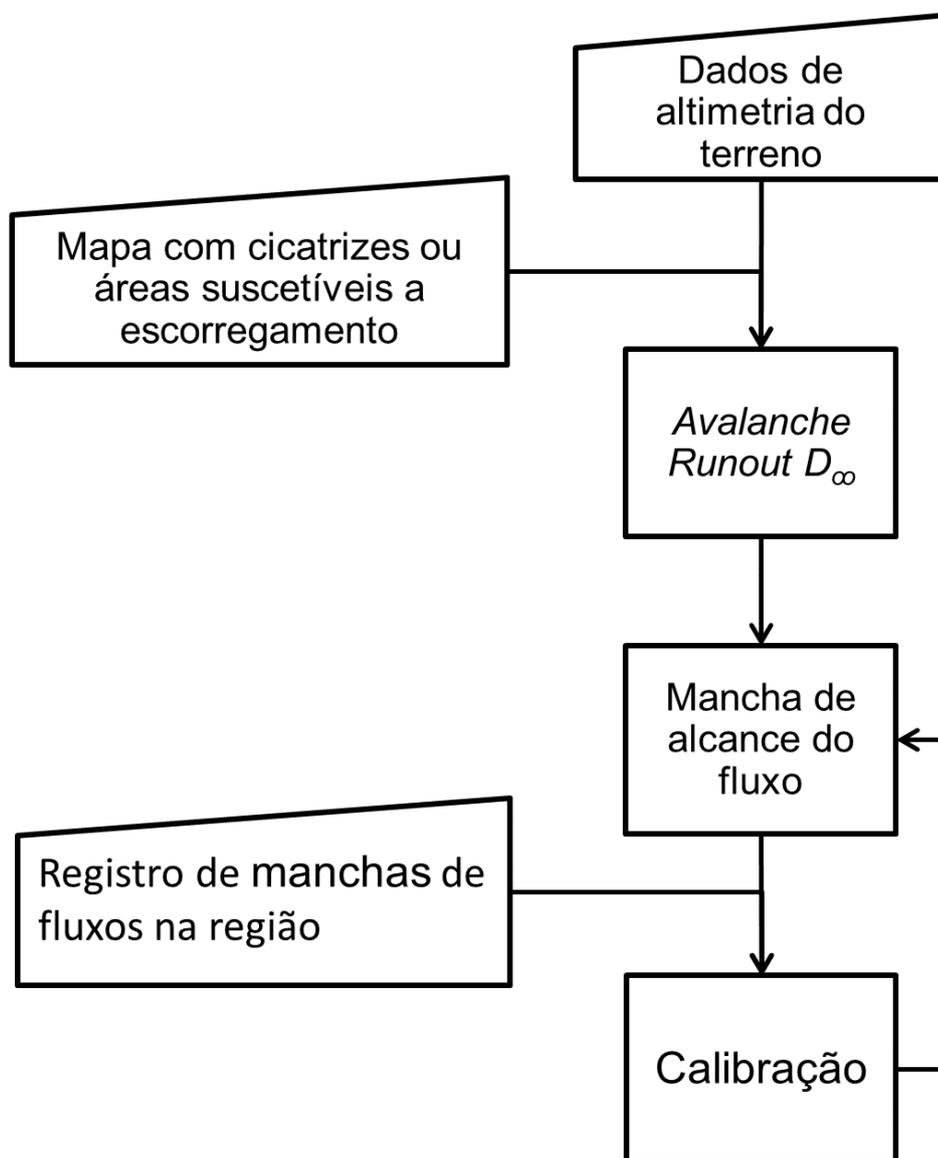


Figura 18. Fluxograma das etapas de processamento.

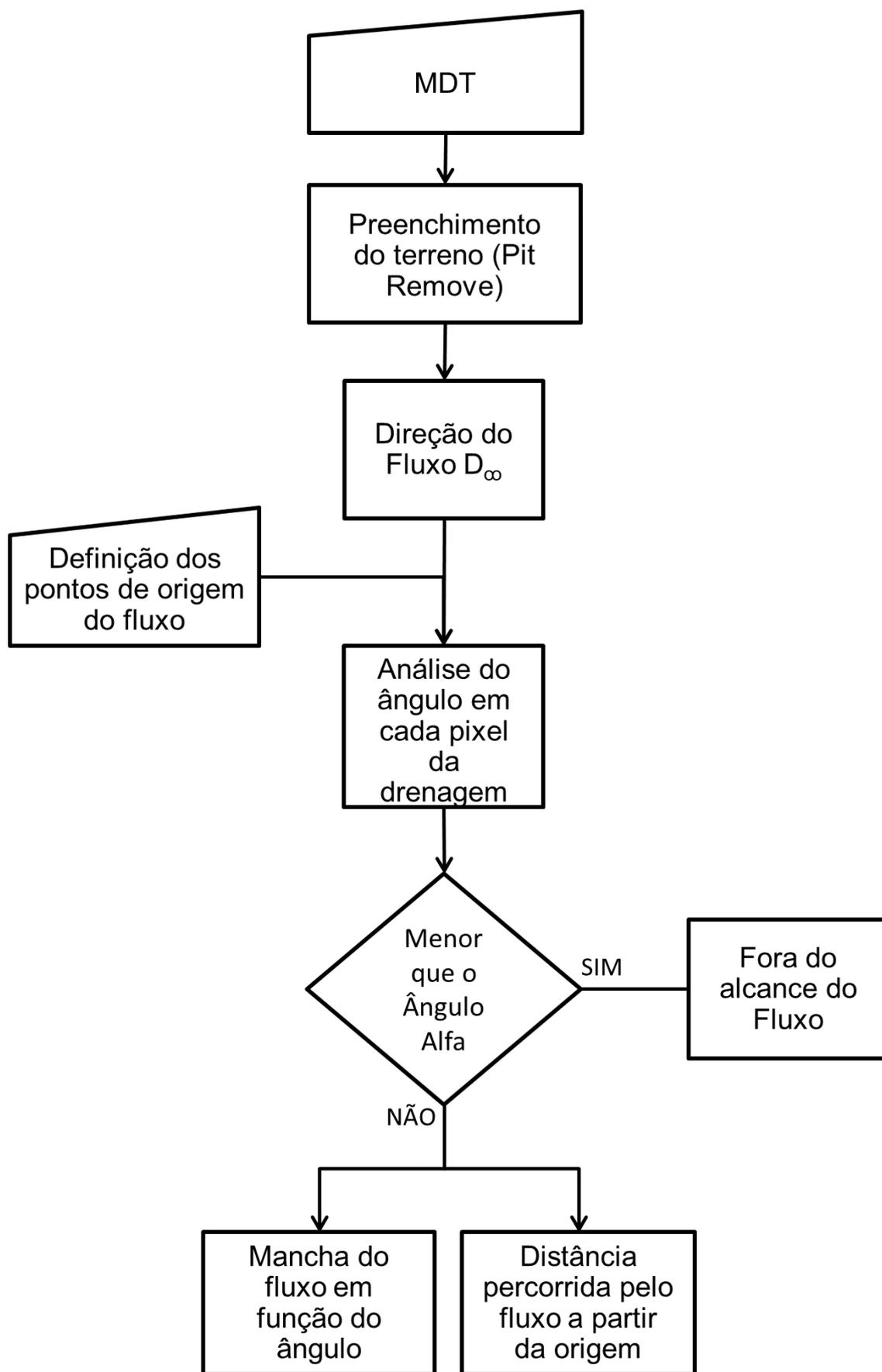


Figura 19. Fluxograma de aplicação da *Avalanche Runout*.

#### 4.2.1. Direção de Fluxo D-infinito

A determinação da direção de fluxo requer uma preparação dos dados de entrada, em especial a remoção das depressões do modelo digital do terreno (MDT). Os rebaixamentos isolados do terreno podem prejudicar o processamento e a geração dos resultados. Por conseguinte, foi utilizada a ferramenta *Pit Remove* com a finalidade de remover as depressões, identificadas como áreas de baixa elevação do terreno e inteiramente rodeadas por células de maior elevação. Esses rebaixamentos não permitem que ocorra a drenagem para a próxima célula, acumulando material e interrompendo o caminho do fluxo. O preenchimento é feito elevando a cota das células em depressão até a altura do ponto mais baixo no seu entorno.

Após a correção das depressões do MDT é possível determinar o caminho percorrido pelo fluxo em função da direção de fluxo de cada célula. O método utilizado para essa determinação é o D-infinito, aplicado através da ferramenta *D-infinity Flow Direction*. Nessa etapa é gerado para cada célula do MDT um caminho preferencial de drenagem, determinado em função da direção de maior desnível negativo. A definição dessa direção é feita através da formação de oito triângulos retângulos que ligam o centro do pixel de origem do fluxo com o ponto central de duas das oito células vizinhas, conforme apresentado na Figura 20. Dessa forma, são estabelecidas oito facetas triangulares que ocupam uma parcela da área de dois pixels diferentes. A direção do fluxo é estabelecida por um vetor partindo do pixel central em direção ao maior desnível negativo, separando a faceta em dois ângulos adjacentes, nomeados de  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , os quais são totalmente independentes do alfa considerado para o ângulo de alcance. No caso de um desses ângulos adjacentes ser zero, a direção do fluxo será centralizada em apenas uma das células, se um dos ângulos for maior que  $0^\circ$ , o fluxo será, então, dividido entre as duas células vizinhas. A divisão é estabelecida por uma relação de proporção conforme as Equações (7) e (8), sendo limitada pelo valor do coeficiente de espalhamento.

$$F_{(i-1,j)} = \frac{\alpha_2}{(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (7)$$

$$F_{(i-1,j+1)} = \frac{\alpha_1}{(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (8)$$

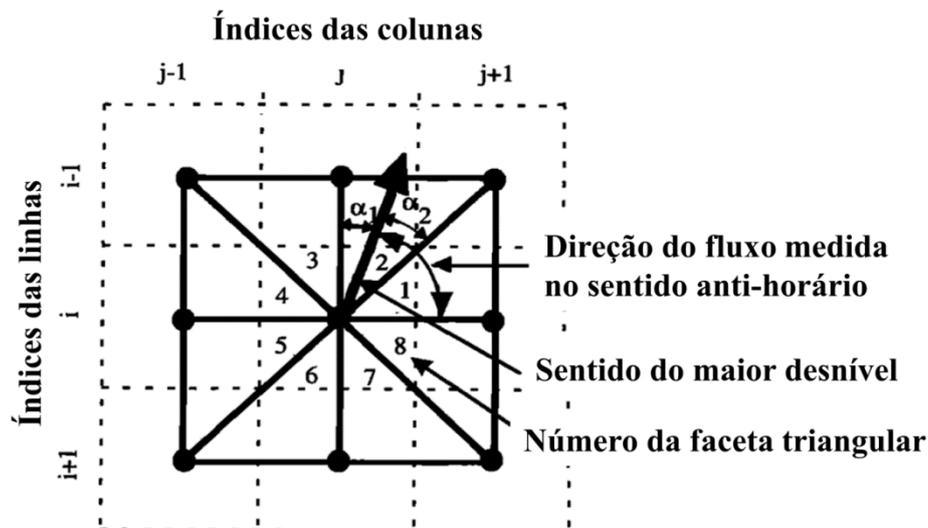


Figura 20. Direção de fluxo definida pelo D<sub>∞</sub>.

Fonte: Adaptado de Tarboton (1997).

#### 4.2.2. *Avalanche Runout*

O modelo de alcance do fluxo de detritos é obtido como resultado da aplicação da ferramenta *Avalanche Runout*. Essa etapa consiste em determinar efetivamente a área afetada pelo fluxo de detritos e o caminho do fluxo para cada célula de origem do movimento. Sendo que todas as células com elevação abaixo da célula de origem do movimento, desde que o ângulo formado entre a célula e o ponto de origem seja maior que o ângulo alfa, são potencialmente parte da área afetada.

A direção do fluxo é definida pelo método D-infinito e requer que sejam indicados os pontos de origem do movimento. O local de origem pode ser caracterizado tanto pela delimitação de cicatrizes de escorregamentos quanto por áreas de maior suscetibilidade à ocorrência do movimento. Além disso, podem ser introduzidos como uma mancha, pela junção de todos os pontos de origem, ou como um único ponto centralizando todo o material na cabeceira do escorregamento ou no centro de massa.

Além de introduzir as informações de origem e direção de fluxo, é necessário indicar o valor do ângulo alfa e o valor do coeficiente de espalhamento. O coeficiente de espalhamento é utilizado para controlar os efeitos de dispersão do fluxo. Ele representa o valor mínimo da porcentagem do fluxo que deve passar pela célula para que esta seja considerada parte da área afetada. Tendo esses valores

definidos, a ferramenta gera dois produtos. Um dos resultados é a zona de escoamento do fluxo de detritos, onde são apresentados valores numéricos da variação do ângulo formado com a célula de origem, sendo que o valor mínimo é expresso pelo próprio ângulo alfa. E o segundo produto gerado é a mancha do fluxo de detritos onde são indicadas as distâncias atingidas pelo alcance de cada ponto do fluxo a partir da origem.

#### **4.2.3. Ângulo de Alcance**

A determinação do ângulo de alcance, determinado como ângulo alfa, foi feita através da calibração do modelo pela sobreposição com a mancha mapeada a partir de um evento específico de fluxo de detritos ocorrido na bacia. O evento considerado ocorreu no ano de 2000 e gerou a fatalidade de quatro pessoas de uma família. Foram coletados dados e informações em campo, junto de moradores da região, em um projeto coordenado pela Engenheira Ambiental Mildred Liliana Monsalve Barragán, ocorrido em 2017. A partir do ponto considerado como limite do fluxo ocorrido foram considerados diferentes ângulos dentro de um intervalo para determinar a melhor aproximação do ponto registrado.

A determinação dos valores inicialmente utilizados foi feita com base na literatura, considerando um intervalo de análise entre  $4^{\circ}$  a  $20^{\circ}$ , com espaçamento de  $2^{\circ}$  entre eles. A escolha do limite inferior do intervalo foi feita a partir da afirmação de Takahashi (2007) que definiu como sendo o ângulo limite para ocorrência de deposição, ou seja, a partir dele, não haveria mais transporte do fluxo. A extremidade maior do intervalo foi sugerida pelo próprio software, apresentada como padrão da ferramenta. O valor do ângulo que melhor representou o alcance do fluxo mapeado em campo foi definido como o ângulo alfa para toda a bacia do arroio Jaguar.

#### **4.2.4. Coeficiente de Espalhamento**

Além da definição do ângulo alfa, foi necessário determinar o valor mais adequado para o coeficiente de espalhamento do fluxo. Esse coeficiente representa a porcentagem mínima de uma parcela do fluxo que deve passar pelo pixel para que este seja considerado parte da área afetada. Dessa forma, é possível controlar os

efeitos de dispersão resultantes do modelo de direção de fluxo infinito utilizado pela ferramenta. Esse coeficiente representa um limiar de proporção variando de 0 a 1. O valor 0 indica a inexistência de um limiar, ou seja, todo o pixel que receber mesmo uma mínima porcentagem do fluxo é indicado como parte da área afetada. Já o valor 1 representa uma proporção 100% do fluxo sobre a célula, o que dificilmente ocorreria, limitando a área afetada apenas na circunferência da cicatriz ou próxima dela.

A relação que considera a área da mancha do fluxo gerado pelo método do ângulo alfa e da mancha real mapeada em campo é estabelecida em função da curva ROC. A análise ROC, do inglês *Receiver Operating Characteristic*, considera a escolha do sistema de previsão melhor representativo a partir de um método gráfico de avaliação, considerando no eixo das abcissas as taxas de falsos positivos e no eixo das ordenadas as taxas de verdadeiros positivos. Neste trabalho a análise foi feita em função da área da mancha do fluxo gerado. Os valores de verdadeiros positivos consistem nos pontos do fluxo gerado que caíram dentro da área do fluxo mapeada em campo. Enquanto que os valores falsos positivos representam todo o restante da área gerada, subtraída da área sobre o fluxo mapeado.

O valor máximo de falso positivo foi obtido pela área referente à mancha de fluxo com coeficiente de espalhamento zero, a qual representa a mancha de maior abrangência de espalhamento. Essa condição de restrição da área máxima de falsos positivos proporciona maiores valores para essas taxas, que poderiam ser reduzidos se fosse utilizado outro método de determinação da área possível de ser atingida. Como, por exemplo, em faixas de declividade do terreno.

O ponto de melhor representação do fluxo consiste no valor representado pelas coordenadas (0,1) caracterizado por abranger 100% dos verdadeiros positivos e 0% dos falsos positivos. Analisando os resultados gerados pelo modelo de fluxo de detritos é utilizado o valor que mais se aproximou dessa condição. O intervalo selecionado para análise variou de 0,2 a 0,5 com espaçamento de 0,025, sendo o valor mínimo sugerido como padrão pelo software.

### **4.3. Análises de Sensibilidade**

A *Avalanche Runout* utiliza poucos dados de entrada, essencialmente requer os dados de origem do movimento, o modelo digital de elevação e a definição do

ângulo alfa e do coeficiente de espalhamento. A fim de analisar a sensibilidade da ferramenta em relação a esses dados, os resultados obtidos foram comparados a partir da curva ROC. As análises realizadas consistem em variações do coeficiente de espalhamento, variação do formato da origem entre um único ponto e a cicatriz do escorregamento ocorrido, e, por último, as variações do MDT entre as resoluções de 2,5 metros, 15 metros e 30 metros.

#### **4.4. Dados de Entrada e Procedimentos**

Para aplicação da *Avalanche Runout* os dados necessários consistem quase que exclusivamente de dados topográfico, como um MDT, facilitando e abrangendo a utilização do modelo. Contudo, os dados requeridos do MDT devem ser de qualidade e preferencialmente de boa resolução. Nesse estudo foi utilizado o MDT elaborado a partir de interferometria de radar nas bandas X e P, com resolução de 2,5 metros, cedido pelo Serviço Geológico Nacional (CPRM, 2014). A partir desse mesmo dado foram gerados MDT's de menor resolução para verificação da aplicabilidade do modelo com diferentes qualidades de dados de entrada. Considerando os modelos disponíveis com acesso gratuito foram gerados MDT's nas resoluções de 30 metros e de 15 metros para verificar a proporção das alterações. Além disso, também foi utilizado um Modelo Digital de Superfície (MDS) de resolução 30 metros, obtido por dados do SRTM (2014), a fim de comparar os resultados obtidos com o MDT de 30 metros de resolução produzido, uma vez que os dois modelos digitais apresentam diferenças significativas, principalmente em função das referências de elevação consideradas. Enquanto o MDT considera valores de elevação do terreno, o MDS utiliza valores de elevação da superfície, sendo influenciado pela copa das árvores e construções no terreno.

A calibração do modelo foi feita exclusivamente com os dados referentes ao evento ocorrido no ano de 2000, pelo fluxo de detritos que resultou na fatalidade envolvendo a família que residia no local. Foram geradas diversas manchas para o mesmo evento, a fim de estimar a que melhor se aproximou da mancha mapeada. A área utilizada como origem do fluxo foi definida a partir das cicatrizes dos deslizamentos ocorridos na bacia, identificadas por fotointerpretação pela CPRM (2014). Contudo, considerando imagens de satélite e observações em campo, constatou-se que as cicatrizes da CPRM relacionadas ao evento de 2000 na bacia

do Arroio Jaguar estavam levemente deslocadas, sendo necessário corrigi-las movendo-as na direção leste. Além disso, a região da encosta que deu origem ao fluxo de detritos gerou quatro escorregamentos independentes naquele evento, dos quais, de acordo com os registros, apenas dois efetivamente deram origem ao fluxo. Sendo apenas esses dois considerados no modelo. Por conseguinte, obteve-se a sobreposição da cicatriz delimitada pela CPRM com as imagens de satélite e os dados coletados em campo. O ajuste dos parâmetros foi feito considerando a origem como uma massa contínua no formato da cicatriz interpretada e como um único ponto localizado na extremidade inicial do movimento.

A delimitação da mancha do fluxo do ano de 2000, utilizada para a calibração, foi feita por mapeamento em campo coletando informações com os moradores locais, através de um trabalho em campo coordenado pela Engenheira Ambiental Mildred Liliana Monsalve Barragán, em 2017 (Figura 21). A engenheira gerou uma mancha em softwares de geoprocessamento através da sua interpretação pela junção dos pontos coletados em campo. Por último, o mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos para a bacia foi gerado a partir do mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na bacia do arroio Jaguar, gerado em função do fator de segurança, a partir do TRIGRS, um modelo de estabilidade de encosta com uma abordagem hidrológica dinâmica, que foi disponibilizado por Michel (2015).

Por último, os resultados obtidos pela *Avalanche Runout* foram confrontados com o modelo Kanako-2D e com a metodologia da CPRM. A simulação gerada pelo Kanako-2D foi disponibilizada por Kobiyama et al. (2018) e considerou apenas o evento ocorrido no ano de 2000, sendo que todo o fluxo foi simulado tendo como origem apenas a cicatriz mais ao leste. Já a metodologia da CPRM considerou todo o município de Alto Feliz, indicando como suscetível uma sub-bacia dentro da bacia do arroio Jaguar, sem especificar alcance e dispersão do fluxo. Em suma, os dados utilizados para aplicação da *Avalanche Runout* e posteriormente para comparação dos resultados estão indicados na Tabela 4.

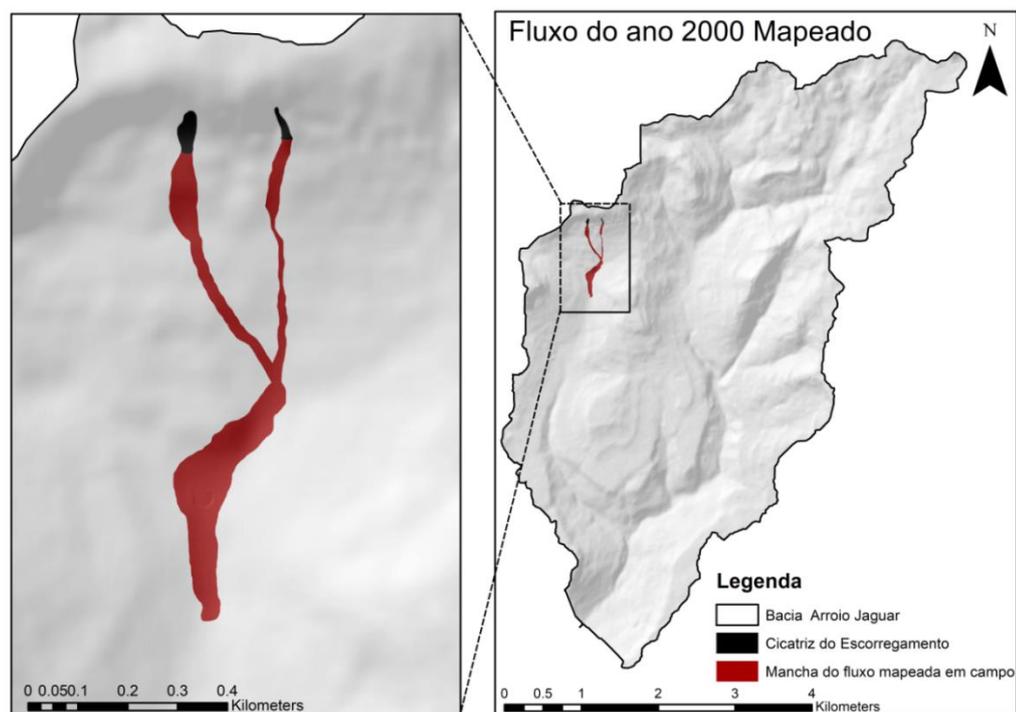


Figura 21. Mancha do fluxo mapeado em campo do evento ocorrido em 2000.

Tabela 4. Dados de entrada utilizados no modelo.

Dados de Entrada	Referência
MDT (2,5 metros)	CPRM, 2014
MDS (30 metros)	SRTM, 2014
Cicatrizes de escorregamentos na bacia do arroio Jaguar	CPRM, 2014
Mancha do fluxo mapeada em campo	Eng. M. L. M. Barragán
Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais na bacia do arroio Jaguar	MICHEL, 2015
Mancha do fluxo de detritos gerado pelo Kanako-2D	KOBIYAMA et al., 2018
Mapa de Suscetibilidade a fluxo de detritos no município de Alto Feliz	CPRM, 2014

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Ângulo de Alcance da Bacia do Arroio Jaguar

A aplicação do modelo foi inicialmente feita considerando a origem do movimento como o formato registrado da cicatriz. O menor ângulo do intervalo analisado, o ângulo de  $4^\circ$ , resultou em um fluxo de alcance de mais de 6 km, que foi propagado por todo o canal, ultrapassando o exutório da bacia, conforme apresentado na Figura 22, seguindo canalizado na maior parte do trecho. Possivelmente o movimento seria retratado como uma inundação de detritos transportando os sedimentos ao longo do canal de drenagem. Como o fluxo de detritos ocorrido no ano de 2000 foi desencadeado por um evento de elevada precipitação, gerando enchentes em toda a bacia, as altas vazões possivelmente ampliaram a capacidade do canal, favorecendo o transporte dos sedimentos aportados pelo fluxo de detritos. Contudo, as informações e fotos obtidas em relação ao alcance do fluxo de detritos visivelmente indicam que o término da zona de deposição antecede o exutório da bacia, sem registros da continuidade do movimento além do local indicado.

Analisando a extremidade oposta do intervalo, o ângulo de  $20^\circ$  subestimou o alcance do fluxo (Figura 23). Embora tenha melhor representado o fluxo da direita atingindo o início da zona de deposição mapeada, não foi capaz de seguir até o ponto indicado como extremidade do fluxo ocorrido. Ademais, deixou de retratar a zona de confluência a partir da origem dos dois escorregamentos, que pode ser verificada na mancha real do fluxo mapeado.

Aplicando o modelo para os ângulos de  $4^\circ$  a  $20^\circ$ , com um intervalo de análise a cada  $2^\circ$ , o valor que mais se aproximou do limite do fluxo mapeado em campo foi o ângulo de  $12^\circ$ , o qual foi atingido separadamente por ambos os escorregamentos (Figura 24). De acordo com registros do evento, o local estimado para o ângulo de  $12^\circ$  foi a maior distância atingida pelo material, caracterizando a extremidade final da zona de deposição. Considerando que as principais características são mantidas em toda a bacia, o ângulo de  $12^\circ$  foi estipulado como o ângulo alfa da bacia do arroio Jaguar.

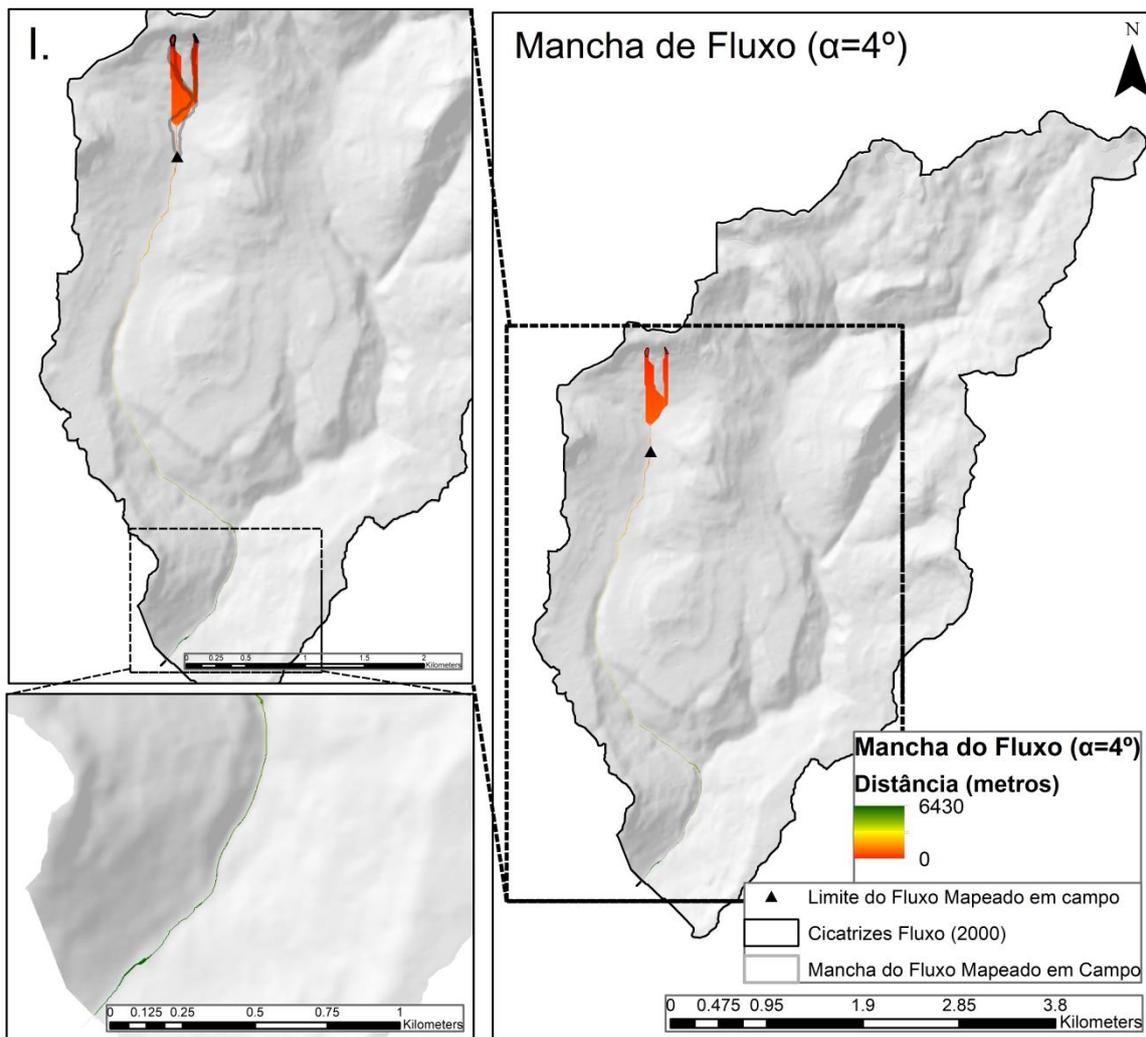


Figura 22. Mancha do Fluxo de detritos para  $\alpha=4^\circ$  e  $c=0,37$ .

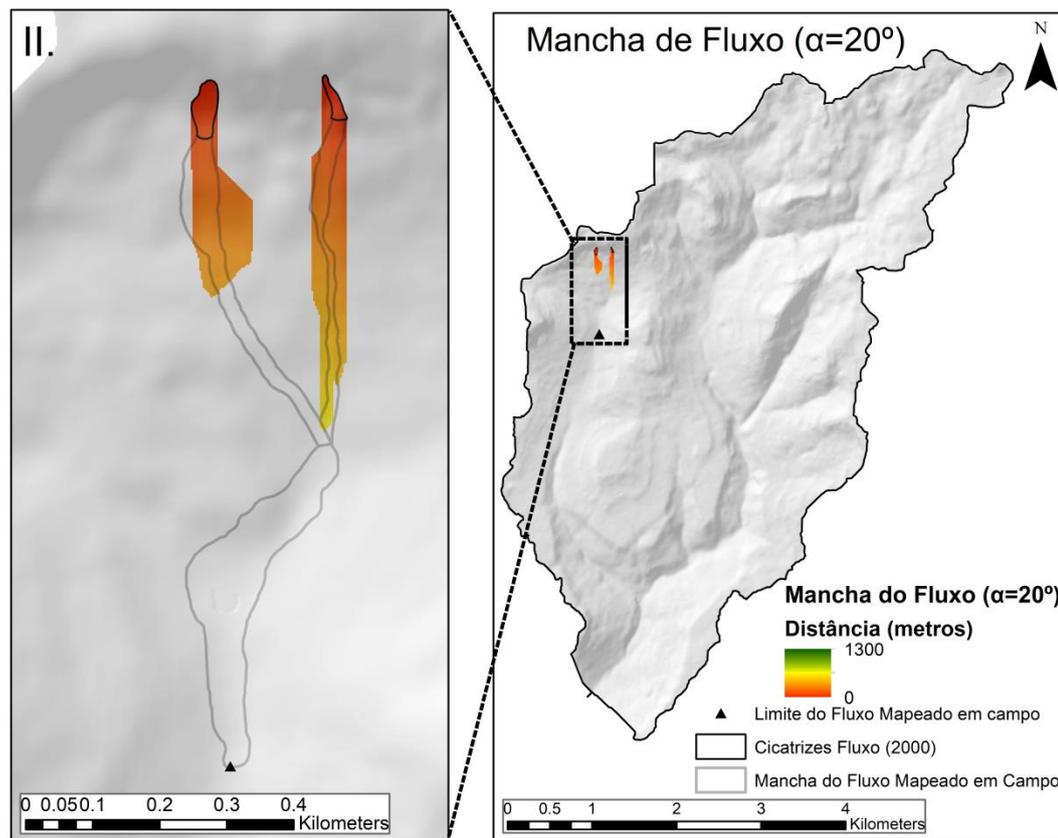


Figura 23. Mancha do Fluxo de detritos para  $\alpha=20^\circ$  e  $c=0,37$ .

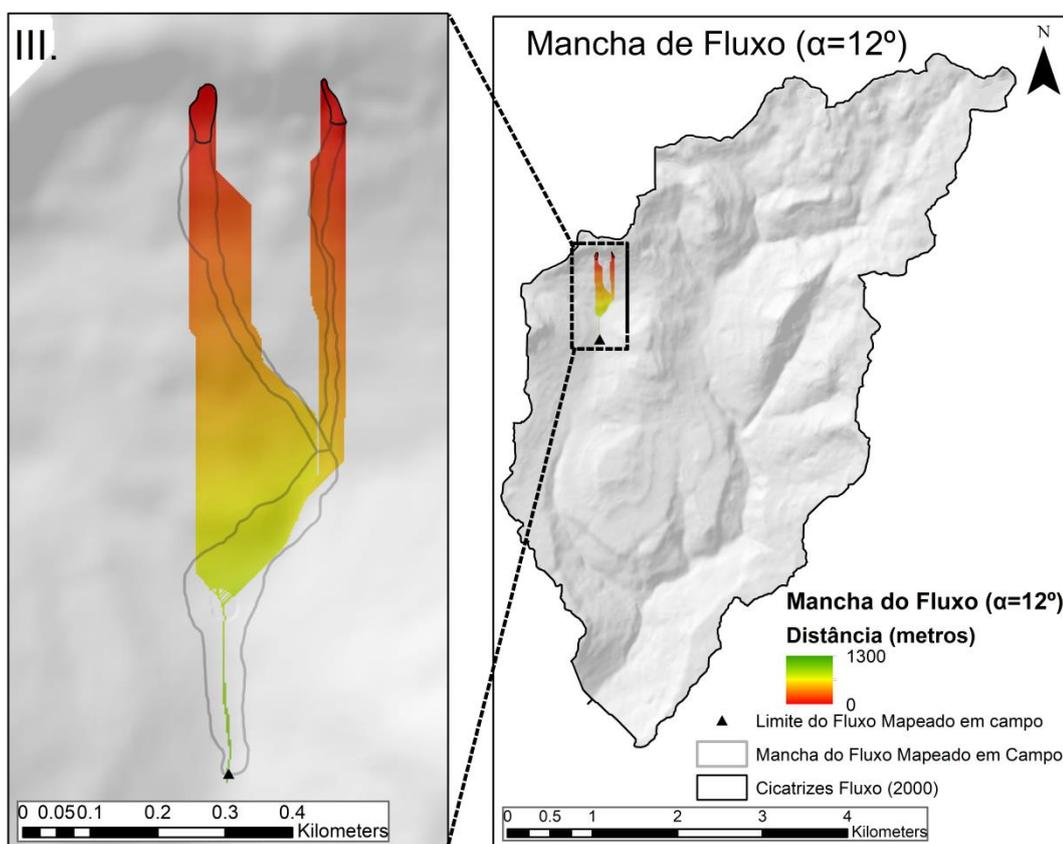


Figura 24. Mancha do Fluxo de detritos para  $\alpha=12^\circ$  e  $c=0,37$ .

Entre os valores apresentados na Tabela 3, no item 3.3.1.2, os ângulos que aparecem com maior recorrência na literatura, referentes a fluxo de detritos, variam de  $11^\circ$  a  $13^\circ$ , sendo a maior parte deles propostos por Corominas (1996). Rickenmann e Zimmermann (1993) também mapearam diversos fluxos de detritos nos Alpes Suíços, e encontraram valores de ângulo alfa próximo de  $11^\circ$ . Entretanto, os valores referenciados por Corominas (1996) são referentes ao volume de  $10^6 \text{ m}^3$ , possivelmente um valor superior ao volume envolvido no fluxo analisado. Embora o autor tenha ressaltado que as equações eram mais bem descritas para volumes acima de  $10^5 \text{ m}^3$ , apontou que poderiam também ser utilizadas por volumes menores. Contudo, utilizando as equações de Corominas (1996), considerando um volume de  $20.000 \text{ m}^3$ , aproximado para as cicatrizes, o menor ângulo alfa considerado entre elas seria de  $16^\circ$ , interrompendo o fluxo muito antes do limite de alcance mapeado. Por conseguinte, indicando que possivelmente as equações definidas pelo autor não são bem aplicadas à bacia do arroio Jaguar.

## **5.2. Coeficiente de Espalhamento na Bacia do Arroio Jaguar**

Após a definição do ângulo alfa em função do limite do fluxo mapeado, o modelo foi gerado para o mesmo ângulo de  $12^\circ$  considerando diferentes coeficientes de espalhamento. De acordo com a análise da curva ROC (Figura 25), o valor mais próximo do ponto ideal foi obtido pelo coeficiente de 0,37 (Figura 26), resultando em 66% de verdadeiros positivos e 35% de falsos positivos. Esse valor foi considerado o que melhor se ajustou à calibração, gerando o melhor resultado dentro das limitações do modelo. Considerando a restrição utilizada para o alcance máximo de espalhamento na encosta, a taxa de falsos positivos foi consideravelmente elevada. Uma vez que fosse ampliada a área possível de ser atingida, as taxas de falsos positivos seriam reduzidas.

A mancha a partir do menor coeficiente do intervalo considerado, obtida com o coeficiente 0,2 (Figura 27), gerou um total de 72% de verdadeiros positivos, contudo os falsos positivos também foram consideravelmente altos, com um valor de 71%. Por último, a outra extremidade do intervalo, o coeficiente de 0,5 (Figura 28) gerou o resultado de menor porcentagem de verdadeiros positivos como também de falsos positivos, respectivamente iguais a 29% e 10%.

Utilizando um valor extremamente baixo para o coeficiente de espalhamento, onde todas as células atingidas mesmo com a mínima porcentagem de fluxo foram consideradas parte da mancha, os resultados obtiveram a máxima porcentagem de verdadeiros positivos, igual a 74%. Já os falsos positivos foram de 100%, uma vez que essa condição foi considerada como a máxima abrangência da área possível de ser atingida pelo fluxo de detritos. A mancha gerada para essa condição está apresentada na Figura 29, onde é possível verificar um excesso de espalhamento. A ocupação da mancha se estende por grande parte da encosta, gerando demasiada ampliação lateral do fluxo, divergindo a partir da cicatriz de origem.

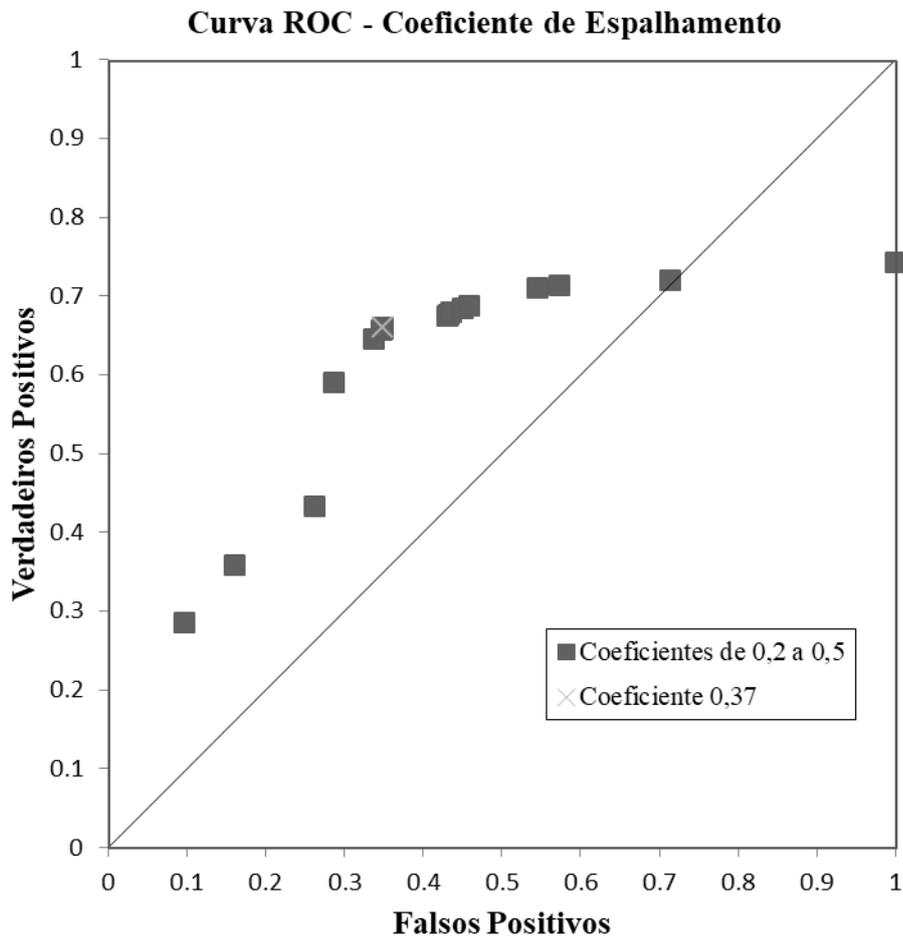


Figura 25. Curva ROC dos coeficientes de espalhamento utilizados no modelo com  $\alpha=12^\circ$ .

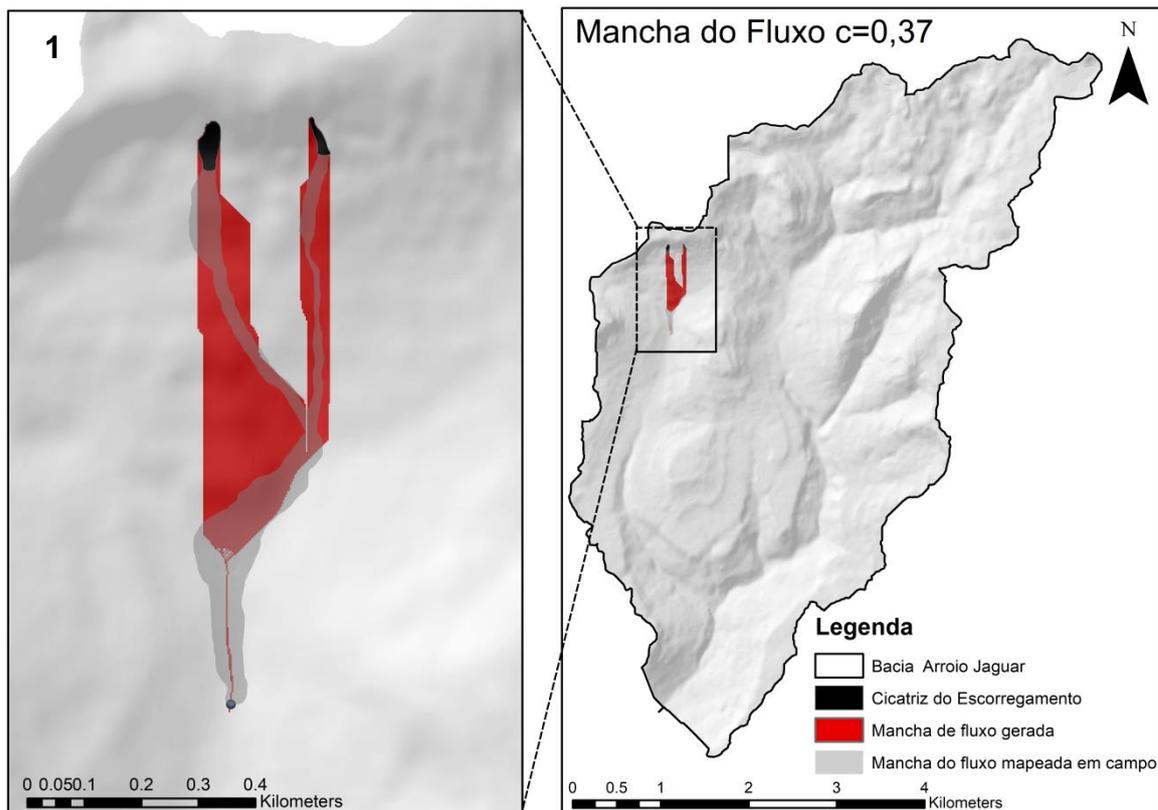


Figura 26. Mancha do Fluxo de Detritos gerada para coeficiente de dispersão igual a 0,37 e  $\alpha=12^\circ$ .

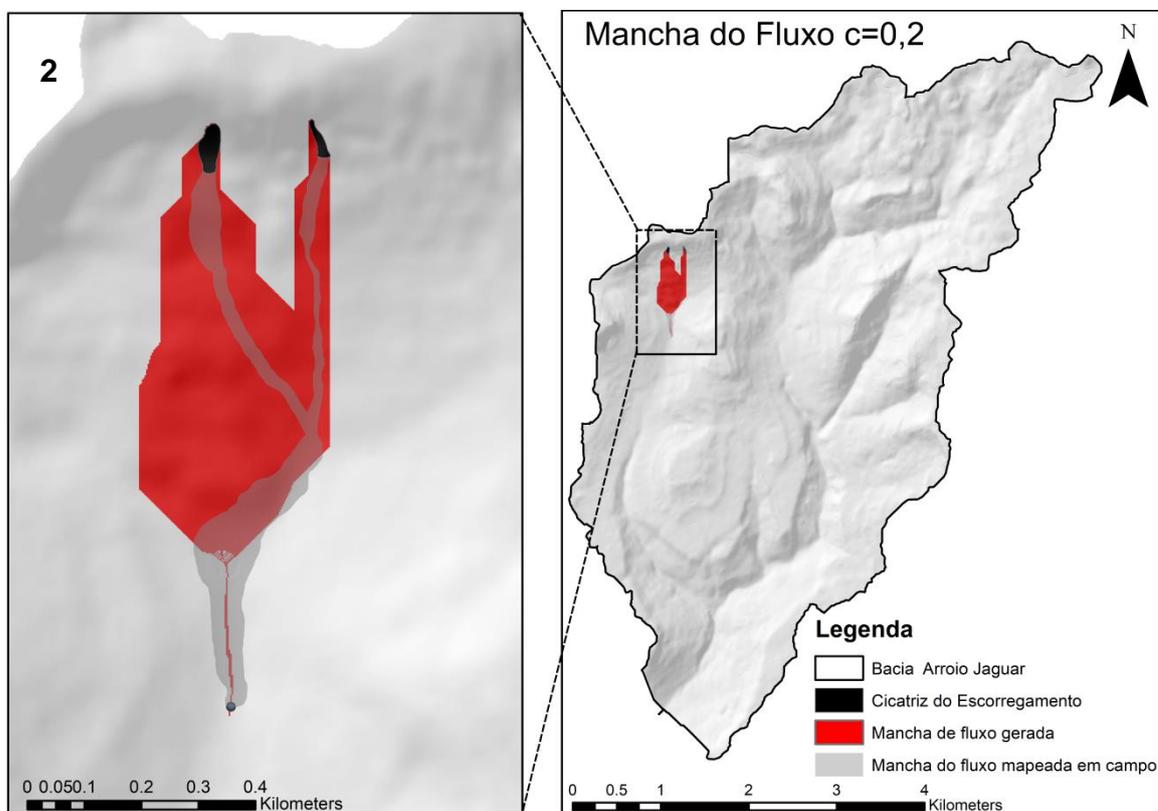


Figura 27. Mancha do Fluxo de Detritos gerada para coeficiente de dispersão igual a 0,2 e  $\alpha=12^\circ$ .

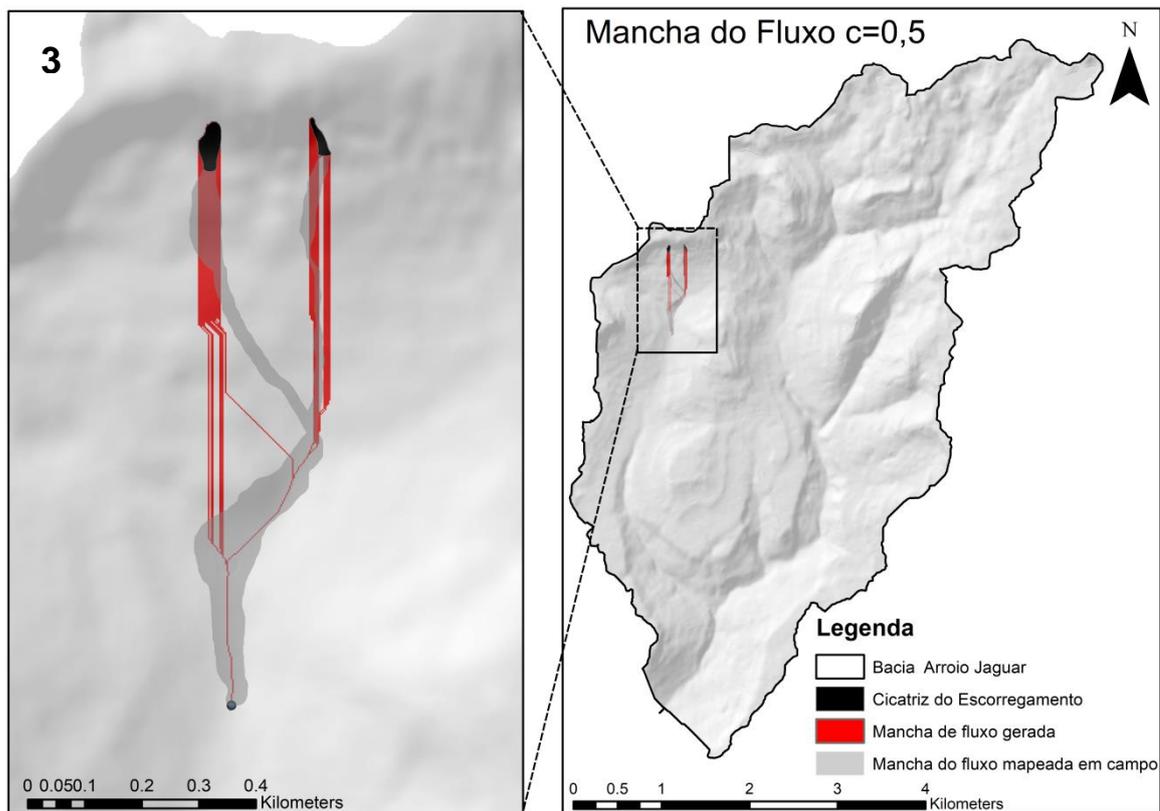


Figura 28. Mancha do Fluxo de Detritos gerada para coeficiente de dispersão igual a 0,5 e  $\alpha=12^\circ$ .

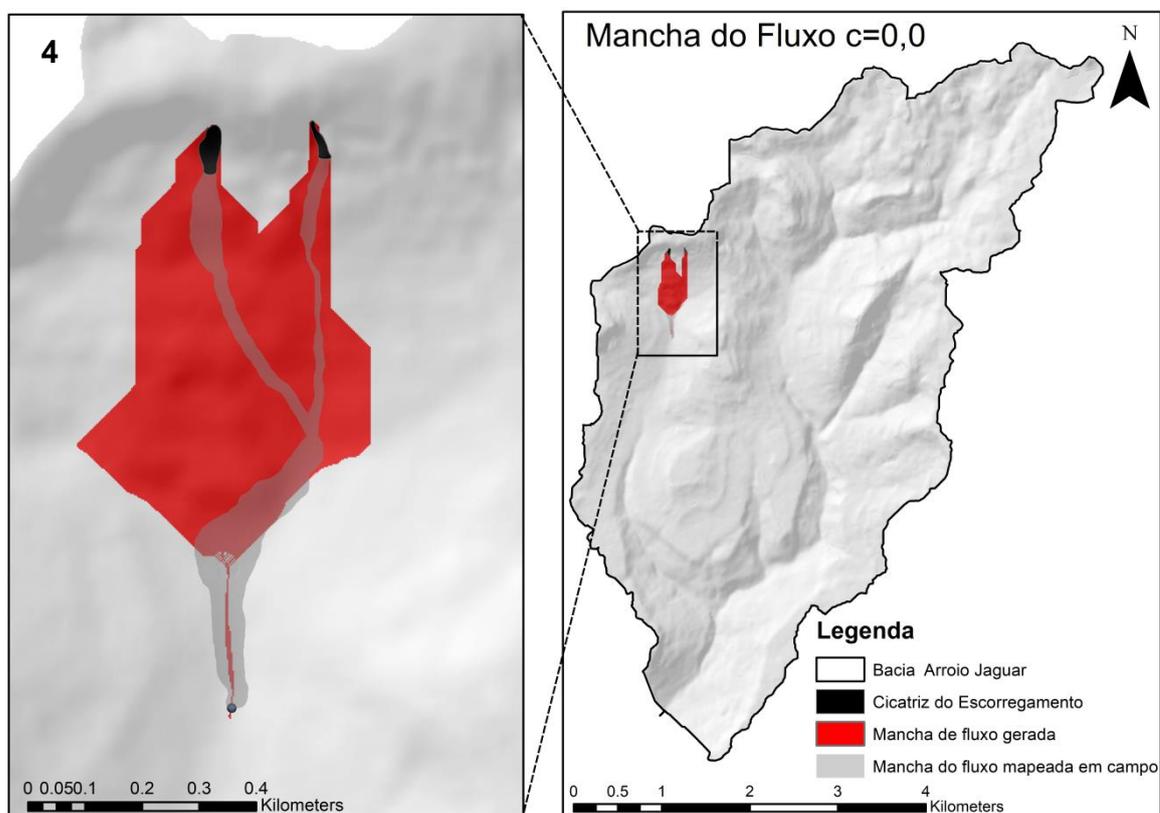


Figura 29. Mancha do Fluxo de Detritos gerada para coeficiente de dispersão igual a 0,0 e  $\alpha=12^\circ$ .

Analisando o fluxo de detritos separadamente por cada escorregamento de origem, a região de transporte da cicatriz a oeste produziu a maior porcentagem de falsos positivos, sendo que na Figura 28 o fluxo, inclusive, não manteve a direção preferencial do fluxo real mapeado. Esse desvio e excesso de espalhamento gerados pelo fluxo da esquerda estão relacionados ao formato da encosta, que não possui um canal precisamente definido, dificultando determinar o caminho da direção do fluxo. Além disso, a própria ocorrência do fluxo no ano de 2000 pode ter gerado alterações significativas no formato da encosta, que influenciaram no resultado, considerando que o MDT foi criado no ano de 2014. Já na mancha gerada a partir da cicatriz a leste, analisando o modelo com os parâmetros selecionados (referentes à Figura 26), a direção do fluxo real foi mantida, mesmo que retificada, sem exceder demasiadamente a área de abrangência do fluxo nas laterais, constituindo uma mancha muito próxima ao ocorrido até o início da zona de deposição.

Os resultados gerados pelo modelo não obtiveram uma boa representação da zona de deposição do fluxo. Todo o escoamento converge para um mesmo ponto e a partir dele segue canalizado até atingir o ângulo alfa estabelecido na simulação. Dessa forma, a zona de deposição acaba sendo representada por um único trajeto linear do fluxo, aglomerando todo o volume disponível em um mesmo canal. Esse comportamento difere significativamente de um comportamento tradicional do fluxo de detritos na zona de deposição, que seria a condição oposta, caracterizada pelo espalhamento do fluxo em função da redução da declividade.

A continuação do trajeto do fluxo modelado se for considerado além do limite real mapeado permanece concentrada no canal de drenagem, uma vez que todo ele convergiu para um mesmo ponto, e o canal segue encaixado por toda a bacia. De forma que a direção do fluxo, independente da porcentagem de espalhamento considerada, não é capaz de exceder a cota das células de margem do canal e representar o espalhamento. Essa condição comprova que o volume do fluxo de detritos está sendo completamente desconsiderado pelo modelo, uma vez que a altura da massa certamente extravasaria as margens do canal, conforme verificado pelo mapeamento do fluxo ocorrido.

### **5.3. Alteração dos Dados de Entrada**

A definição do ângulo alfa e coeficiente de espalhamento a partir da melhor representação da mancha do fluxo mapeado foi feita considerando um MDT de resolução 2,5 metros e partindo da origem do movimento no formato da cicatriz do escorregamento. A fim de verificar a sensibilidade do modelo aos dados de entrada, e considerando a dificuldade em dispor de produtos de elevada qualidade, o modelo foi aplicado utilizando MDT's de menor resolução, representando dados que podem ser gratuitamente obtidos. Ademais, a origem do movimento foi considerada como um único ponto, ao invés do formato mapeado da cicatriz do escorregamento.

#### **5.3.1. Origem Pontual do Movimento**

Em função da desconsideração de parâmetros de volume do fluxo, representação da zona de iniciação do movimento a partir de um único ponto não é adequada para representar o comportamento do mesmo. Em todos os cenários de diferentes parâmetros os resultados obtidos para origem pontual foram piores que os obtidos a partir da cicatriz. Uma vez que o modelo considera apenas a direção do fluxo em função da maior declividade, ao limitar as células de origem, o espalhamento do fluxo torna-se reduzido. Em vista disso, as taxas de falsos positivos obtidas foram consideravelmente menores. Além disso, em função da redução do espalhamento, o coeficiente que melhor representou o fluxo para origem do movimento como um ponto é de 0,2, com taxas de verdadeiro e falso positivos respectivamente iguais a 65% e 42%. As Figura 30 e Figura 31 exibem a comparação dos resultados gerados para os coeficientes ótimos de ambas as formas de origem consideradas. Enquanto que as taxas obtidas para os diferentes coeficientes de espalhamento em ambas as considerações de origem, podem ser observadas na curva ROC da Figura 32.

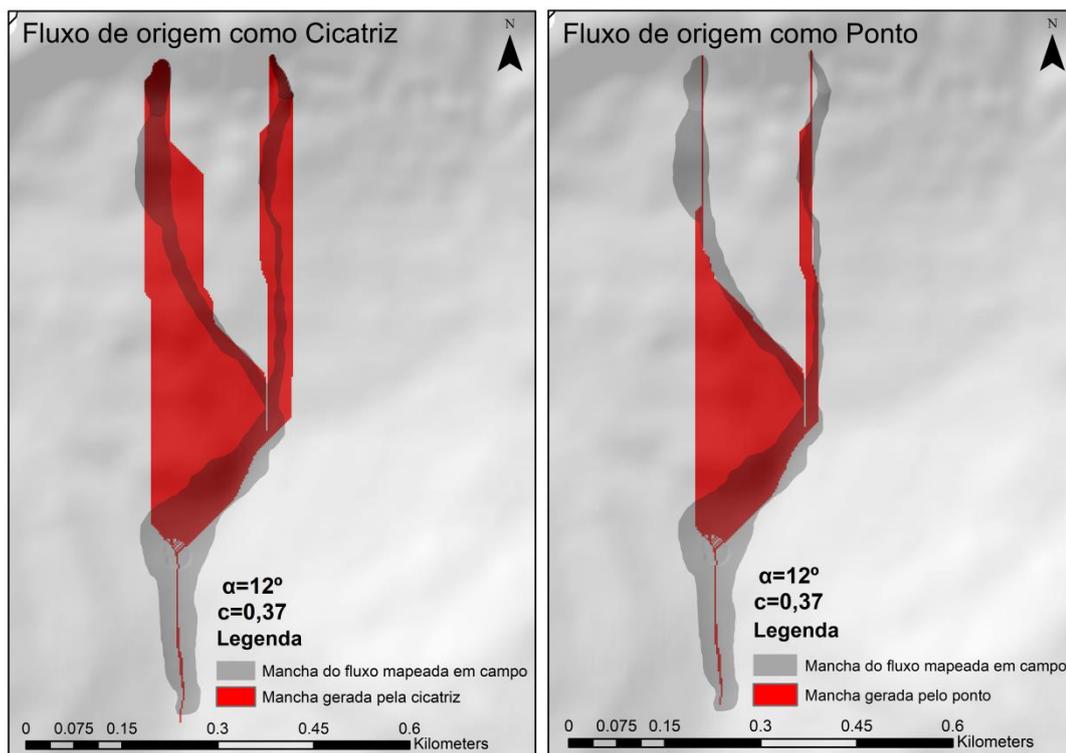


Figura 30. Mancha do fluxo considerando a origem como cicatriz e como ponto, gerada pelo modelo com  $c= a 0,37$  e  $\alpha=12^\circ$ .

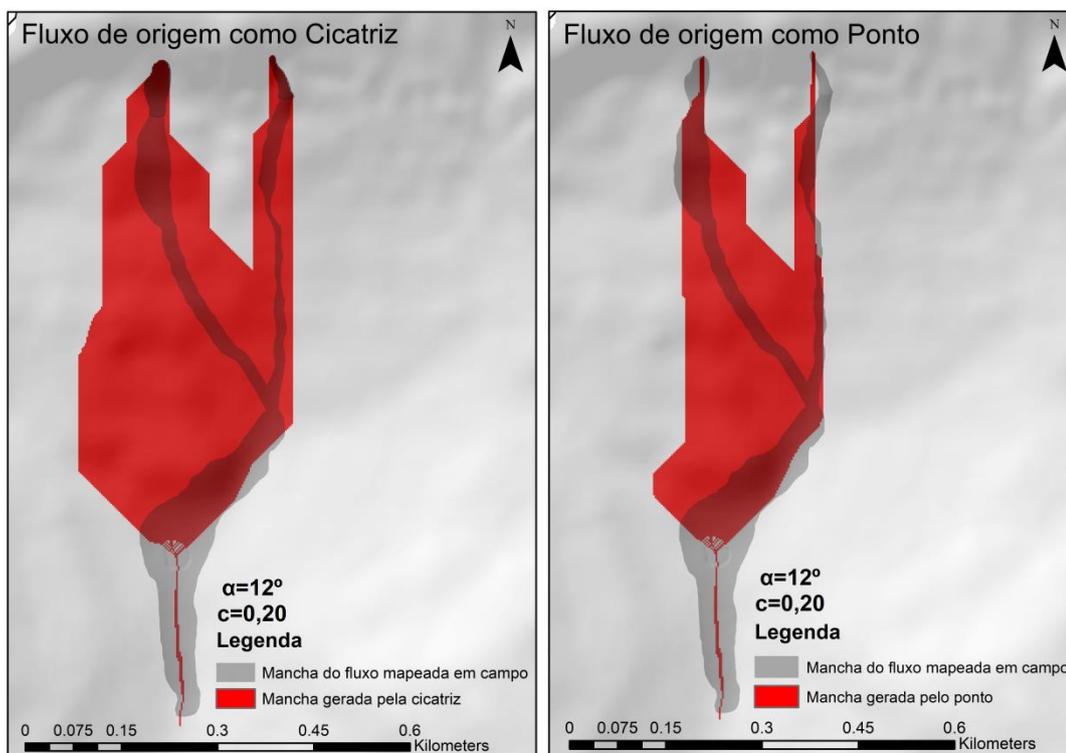


Figura 31. Mancha do fluxo considerando a origem como cicatriz e como ponto, gerada pelo modelo com  $c= a 0,20$  e  $\alpha=12^\circ$ .

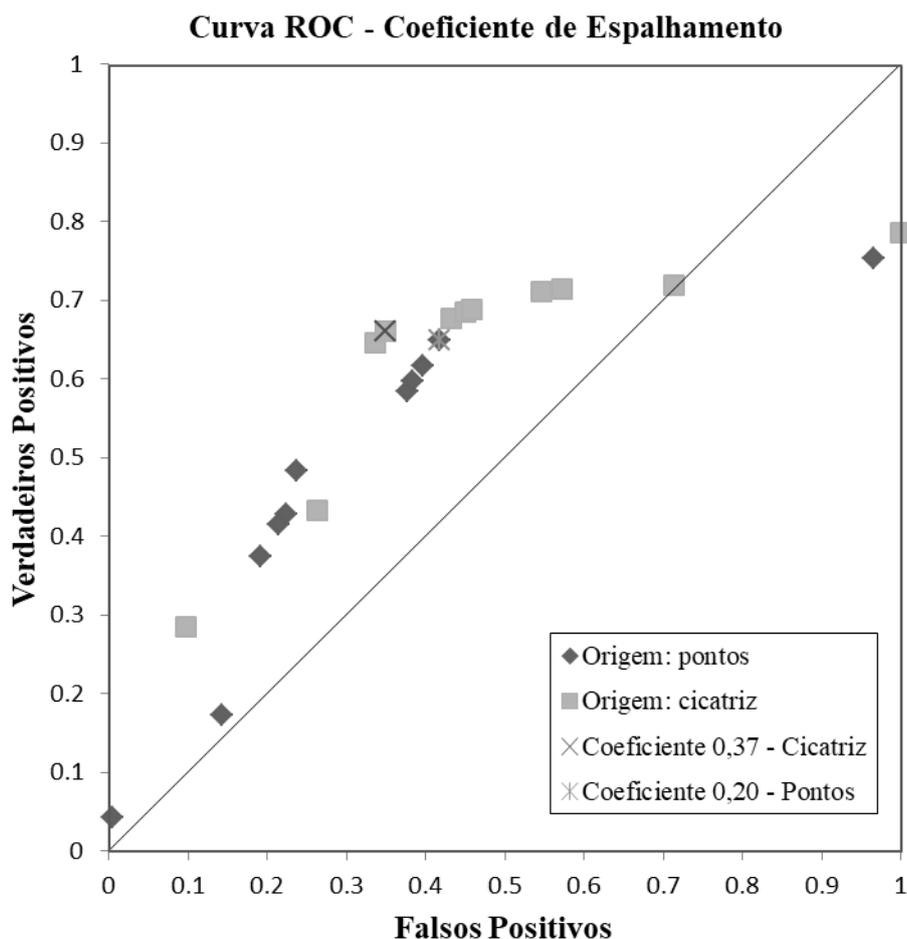


Figura 32. Curva ROC dos coeficientes de espalhamento considerando a origem como ponto e como cicatriz.

### 5.3.2. Resolução do Modelo Digital do Terreno

O resultado obtido a partir da utilização do modelo com os MDT's de menor resolução, mantendo igual o restante dos parâmetros, resultou em uma redução do espalhamento e do alcance do fluxo (Figura 33). Embora o coeficiente de espalhamento utilizado tenha sido o mesmo, os modelos com MDT de menor resolução apresentaram menor dispersão do fluxo, uma vez que as células abrangendo uma área menor são mais facilmente atingidas pelo limiar de porcentagem considerada para o espalhamento. O alcance antecipado do ângulo alfa ocorre em função do aumento do tamanho da célula. Um maior tamanho de pixel apresenta menor representatividade da real inclinação da encosta e de zonas de maior declividade, uma vez que considera um mesmo valor médio de altimetria para uma área maior do terreno, reduzindo o valor de declividade daquele trecho.



Uma das principais alterações positivas nos modelos gerados com menor resolução são refletidas próximas à zona de deposição e principalmente na redução do espalhamento do fluxo. Particularmente a mancha gerada pelo MDT de resolução 30 metros resultou em cerca de 10% a menos de falsos positivos, apesar de ter deslocado praticamente todo o caminho do fluxo da cicatriz a leste para fora da mancha do fluxo mapeado, contribuindo para redução também de verdadeiros positivos. Ademais, em ambas as resoluções (Figura 33 b. e c.), os fluxos provenientes da cicatriz a oeste dividiram-se em duas direções, representando as direções que recebem a maior porcentagem de fluxo. Além disso, entre os dois direcionamentos é possível observar uma tendência maior a seguir o caminho da mancha mapeada, ou seja, afirmando que essa é a direção que recebe a maior porcentagem de fluxo. O outro trajeto do fluxo proveniente da cicatriz a oeste, retilíneo até a zona de deposição (Figura 33 c.), é então a segunda direção a receber maior porcentagem do fluxo. Essa diferença pode ser confirmada ao aumentarmos o coeficiente de espalhamento do modelo com MDT de resolução 30 metros, limitando o caminho do fluxo a uma única direção (Figura 34 a).

Considerando o ângulo alfa adaptado ao MDT de 30 metros,  $10^{\circ}$ , e coeficiente de espalhamento de 0,5, o cenário gerado representa visualmente um comportamento mais aproximado do fluxo real mapeado, conforme apresentado na Figura 34 a. Contudo, mesmo com tal representatividade, gerando próximo de 8% de falsos positivos e cerca de 40% de verdadeiros positivos, o modelo não apresentou os melhores resultados entre os cenários. Mantendo o coeficiente de 0,37, a partir da análise da curva ROC, os resultados obtidos são considerados mais próximos do ideal.

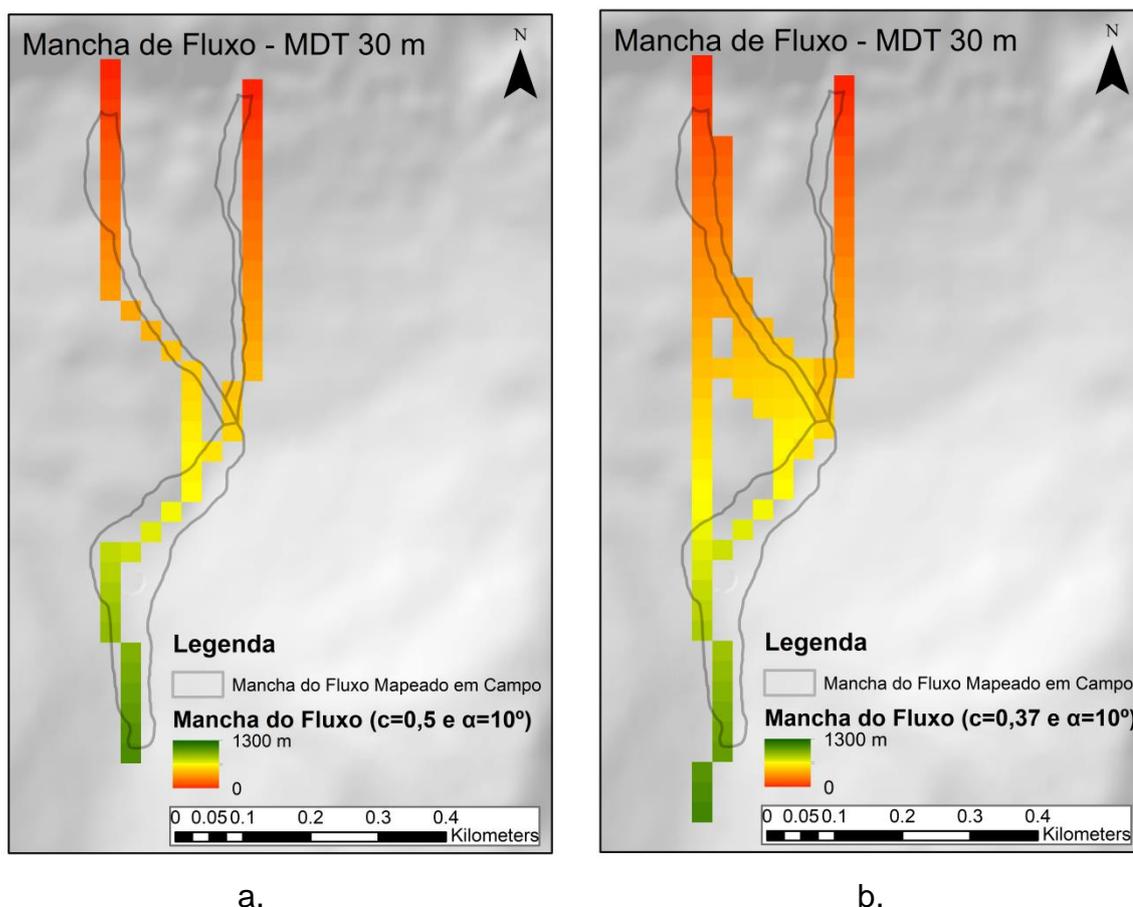


Figura 34. Mancha do fluxo de detritos gerada para  $\alpha=10^\circ$  com MDT de 30 metros.

Considerando que o MDT de 30 metros utilizado nas análises é derivado de dados de topografia do terreno levantados pela CPRM (2014), diferindo da origem dos dados globais atualmente disponíveis gratuitamente, o modelo foi aplicado utilizando como entrada os dados SRTM, dados de elevação da superfície com resolução de 30 metros. Os resultados foram um pouco discrepantes considerando que tenham sido utilizados os mesmo parâmetros. Mas ainda assim foram bastante satisfatórios considerando o comportamento muito aproximado do fluxo real mapeado.

Os valores de verdadeiro e falso positivos para alfa igual a  $10^\circ$  e coeficiente de 0,37 (Figura 35 a.) são 38% e 28%, reduzindo significativamente dos resultados obtidos pelo MDT de 30 metros proveniente dos dados da CPRM (

Tabela 5), respectivamente 53% e 25%. Além disso, é interessante ressaltar que ao reduzirmos a coeficiente de espalhamento para um valor mínimo, a área de falsos positivos gerada reduz cerca de 40% em relação ao MDT de 30 metros proveniente da CPRM, com uma descontinuação da mancha no interior das

margens do fluxo (Figura 35 b). Possivelmente justificando as diferenças geradas pelos dados de elevação, em função da presença significativa de árvores na região.

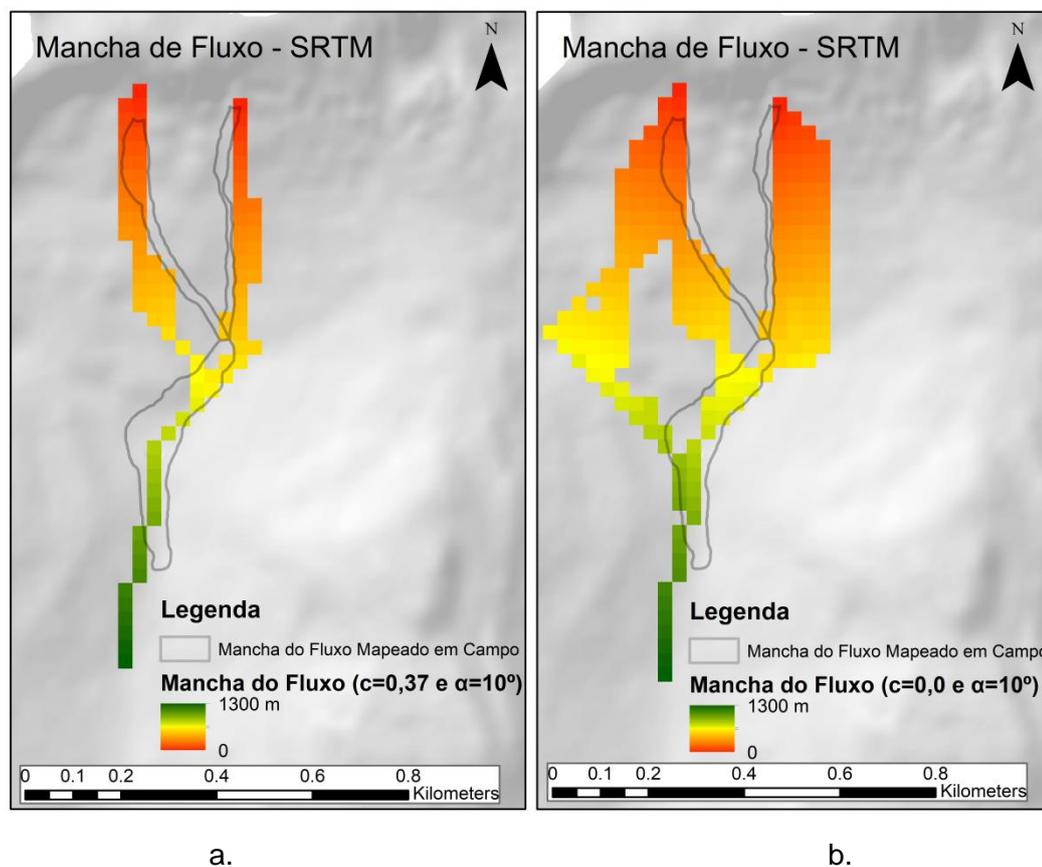


Figura 35. Mancha do fluxo de detritos gerada a partir do MDS de resolução 30 m do SRTM.

Os resultados de todas as análises realizadas com alteração dos dados de entrada estão apresentados na Figura 36 através da curva ROC. É possível verificar que os melhores resultados estão associados com a utilização do MDT de melhor resolução, ainda mais quando é considerada a origem no formato da cicatriz do escorregamento. O resultado obtido pelo coeficiente 0,5 embora tenha apresentado a menor taxa de falsos positivos, ficou entre os piores resultados, evidenciando o coeficiente de 0,37 como mais apropriado. Entre as análises apresentadas, o pior resultado foi obtido com a utilização dos dados SRTM, que ainda assim foram razoavelmente bons considerando que estão acima da linha indicada, além de representarem com ótima aproximação o comportamento do fluxo ocorrido.

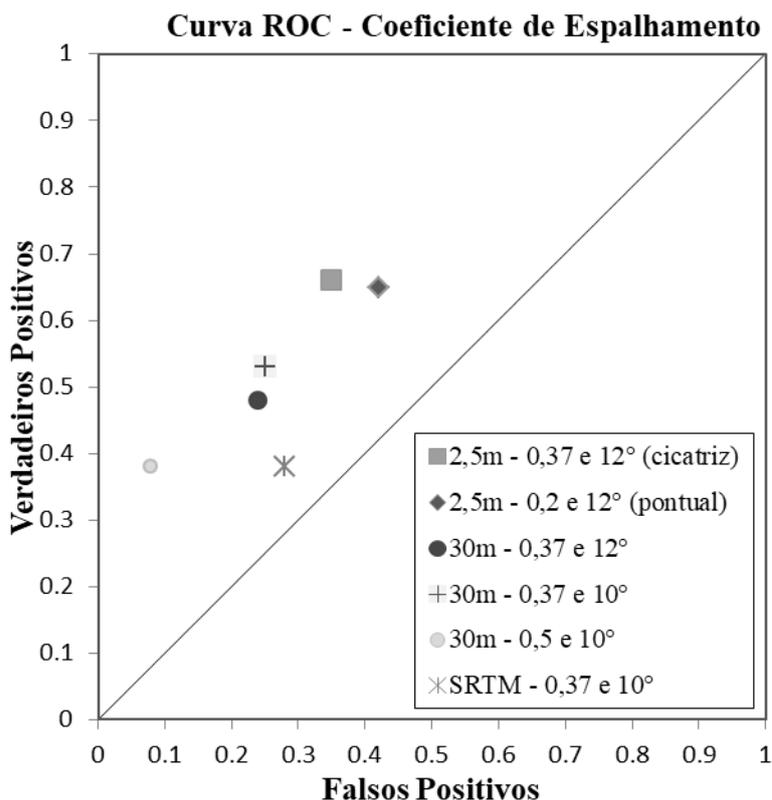


Figura 36. Curva ROC em função das diferentes análises de sensibilidade do *Avalanche Runout*.

#### 5.4. Mapa de Suscetibilidade Bacia do Arroio Jaguar

A definição do local de origem é uma das condições necessárias para aplicação do modelo, de forma que os resultados são diretamente relacionados com a delimitação da origem considerada. Para gerar o mapa de suscetibilidade a fluxos de detritos pelo método do ângulo alfa foi considerado o mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais, gerado por Michel (2015), a partir do modelo TRIGRS. A Figura 37 apresenta apenas as áreas classificadas com um fator de segurança menor que 1, indicando uma condição de instabilidade ou falha. Além disso, também foram sinalizadas as cicatrizes registradas na bacia, que coincidem com as regiões suscetíveis do mapa, inclusive as cicatrizes de origem do fluxo ocorrido em 2000.

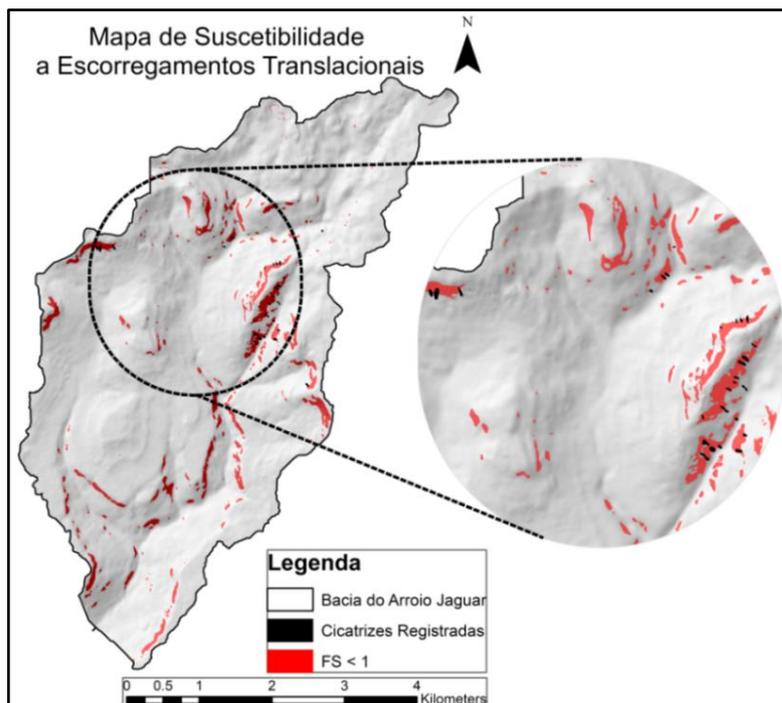


Figura 37. Mapa de Suscetibilidade a Escorregamentos Translacionais.

Fonte: Adaptado de Michel (2015).

A partir das áreas delimitadas por Michel (2015) foi gerado o mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos na bacia do arroio Jaguar, considerando o cenário obtido a partir dos parâmetros definidos para a bacia, ângulo alfa de  $12^\circ$  e coeficiente de espalhamento de 0,37 (Figura 38 A). Além disso, também foram gerados outros três cenários, conforme a Tabela 6, considerando a variação em função dos dados de entrada utilizados. A Figura 38 B representa o mapa gerado para o coeficiente de máximo espalhamento, a fim de comparar o resultado obtido considerando a pior condição possível. As Figura 38 C e D apresentam os mapas de suscetibilidade da bacia gerados a partir do MDT de 30 metros, com os parâmetros definidos como melhor representativos.

Tabela 6. Cenários considerados para geração do mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos na bacia do arroio Jaguar.

Cenário	MDT	Ângulo Alfa	Coefficiente de Espalhamento
A	2,5 m	$12^\circ$	0,37
B	2,5 m	$12^\circ$	0,0
C	30 m	$12^\circ$	0,37
D	30 m	$10^\circ$	0,37

### Mapa de Suscetibilidade a Fluxo de Detritos

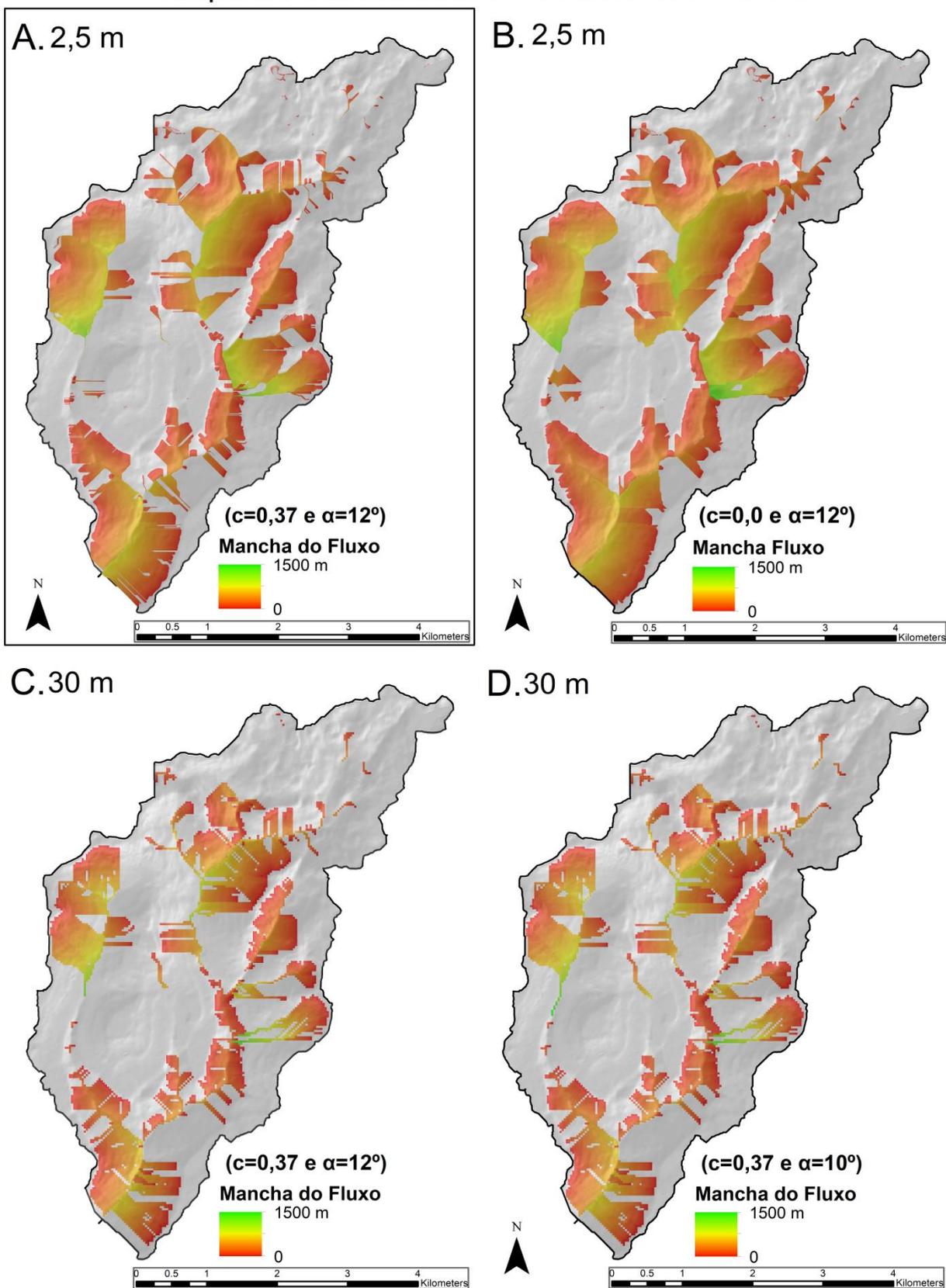


Figura 38. Mapa de Suscetibilidade a Fluxo de Detritos na Bacia do Arroio Jaguar.

A área suscetível sinalizada nos mapas está diretamente relacionada à extensão da área de origem considerada. Ainda assim, em função dos diferentes parâmetros, cada cenário gerado apresentou uma porcentagem diferente da área atingida na bacia, conforme os valores da Tabela 7. O cenário A, destacado como o mapa de fluxo de detritos na bacia do arroio Jaguar, atingiu cerca de 35% da área da bacia, apresentando o valor mediano entre os cenários gerados. Não obstante, representa uma porcentagem bastante elevada, indicando uma vasta área suscetível a fluxo de detritos na bacia. O cenário B resultou na maior área atingida, uma vez que não foi considerado um limite de proporção do espalhamento. Os cenários C e D, os quais diferem em função do ângulo alfa considerado, apresentaram a mesma porcentagem de área atingida, uma vez que em grande escala a variação do ângulo resultou em menos de 1% de alteração dos resultados. Em função da convergência dos fluxos propagados nos canais de drenagem, a diferença de área atingida apenas dentro do canal, entre os ângulos 12° e 10° dos cenários C e D, não foi significativa.

Tabela 7. Porcentagem de área atingida pelo fluxo de detritos na bacia do arroio Jaguar.

Cenários	Área Atingida
A	35%
B	44%
C	27%
D	27%

A Figura 39 facilita a visualização do fluxo individualmente a partir da origem. Ela representa a mancha de fluxo gerada pela *Avalanche Runout* com os parâmetros definidos para a bacia, conforme o cenário A. Contudo, considera como origem as cicatrizes geradas pela CPRM referentes às áreas de ocorrência de escorregamentos na bacia. Entre os escorregamentos, duas regiões apresentam registro de fluxo de detritos, ambos ocorridos no evento de 2000, a região do fluxo analisado neste trabalho e a sub-bacia indicada na Figura 39, nomeada de Sanga Groß. O fluxo ocorrido nessa sub-bacia foi decorrente de uma série de escorregamentos que convergiram para o canal, gerando um grande fluxo de detritos que destruiu uma estrada localizada próxima ao local.

Entre os fluxos gerados destacam-se dois comportamentos da mancha, um fluxo contido e estreito ao longo da encosta de propagação, e outro bastante

espalhado com maior amplitude de dispersão a partir da origem. Assim, pode-se associar o comportamento diretamente com o formato da encosta. Respectivamente uma encosta mais encaixada, com maior condição de confinamento, e uma encosta de formato mais uniforme, sem exibir direções de maior confinamento, favorecendo o espalhamento do fluxo. O fluxo analisado neste trabalho exemplifica a condição sem confinamento evidenciado, favorecendo o espalhamento a partir da cicatriz ao oeste. Da mesma forma, os fluxos sinalizados com elevada amplitude de espalhamento possivelmente estão superestimados. Já os fluxos gerados pelas cicatrizes inseridas na sub-bacia Sanga Groß, por se tratar de uma bacia extremamente encaixada, foram mais bem representados. De acordo com registros do evento, as manchas configuram o comportamento do movimento ocorrido na sub-bacia, onde diversos escorregamentos convergiram para o canal formando um fluxo de detritos que seguiu confinado até atingir uma estrada próxima ao exutório, ponto atingido pela mancha.

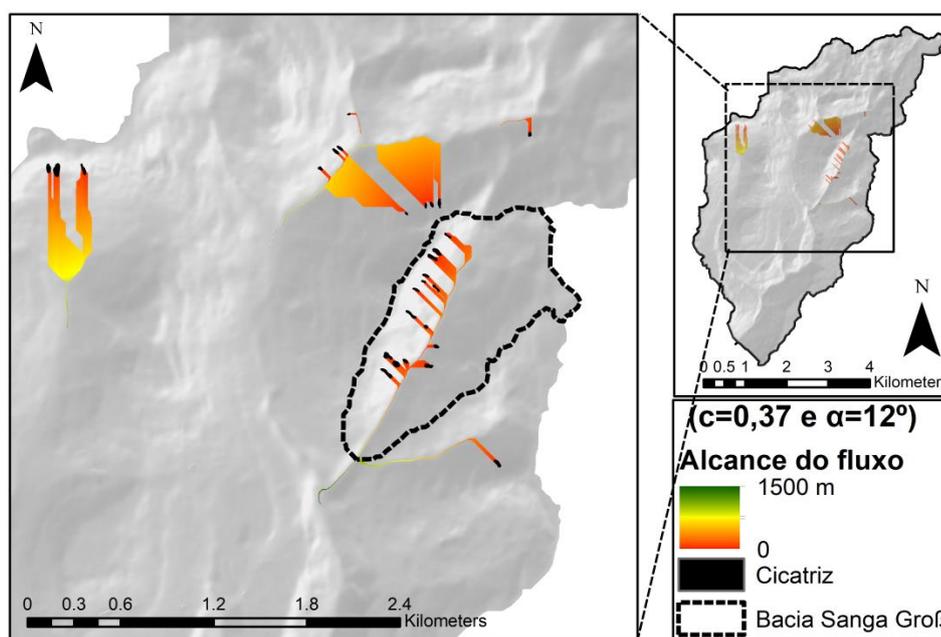


Figura 39. Mancha do fluxo de detritos a partir das cicatrizes de escorregamentos da bacia do arroio Jaguar.

### 5.5. Verificação com outras Metodologias

A fim de verificar os resultados gerados pelo modelo, foram utilizados para comparação os resultados gerados por outras duas metodologias, Kanako-2D e o

método utilizado pela CPRM. O modelo Kanako-2D foi utilizado por Kobiyama et al. (2018) para simular apenas o evento ocorrido em 2000 na bacia do arroio Jaguar. Enquanto que a CPRM gerou em 2014 e disponibilizou, conforme determinado pela LEI 12.608/2012, o mapa de suscetibilidade a movimentos de massa para o município de Alto Feliz, especificamente, considerado na análise o mapeamento de suscetibilidade referente a fluxo de detritos.

### 5.5.1. Modelo KANAKO-2D

O cenário gerado pelo Kanako-2D considerou apenas o fluxo ocorrido no ano de 2000 na bacia do arroio Jaguar. O MDT utilizado na simulação foi o mesmo disponibilizado pela CPRM para aplicação do *Avalanche Runout*. Contudo, para melhor representação dos resultados, Kobiyama et al. (2018) simularam o fluxo considerando a somatório do volume de todas as áreas de escorregamento do evento adentrando em um mesmo ponto de origem, na cicatriz mais ao leste da encosta. Esse trecho apresenta uma condição de maior confinamento, enquanto que o outro trecho da encosta é mais difícil de ser simulado. A simulação foi feita considerando um volume de entrada de 20.000 m<sup>3</sup>, e a mancha de área atingida, seja por erosão ou deposição, foi apresentada na Figura 40 A. A Figura 40 B apresenta a mancha gerada pelo *Avalanche Runout*, considerando apenas como origem a cicatriz mais a leste e os parâmetros definidos para bacia, coeficiente de espalhamento de 0,37 e ângulo alfa de 12° aplicados ao MDT de 2,5 metros.

Em função da entrada de um volume maior, a mancha gerada pelo Kanako-2D possivelmente excedeu um pouco os limites que seriam alcançados de espalhamento, principalmente até a zona de confluência dos fluxos. Ainda assim ambos os modelos obtiveram repostas bastante semelhantes. Especificamente no comportamento de direção do fluxo e até mesmo na redução da área atingida na zona de deposição. Possivelmente em função do maior confinamento do canal, restringindo o fluxo a um menor espalhamento lateral.

A mancha gerada pelo Kanako-2D desconsidera a zona de origem do movimento, sendo representada a partir de um trecho um pouco a jusante da iniciação. A fim de garantir uma comparação equivalente a mancha gerada pelo *Avalanche Runout* foi considerada a partir do mesmo ponto, omitindo a maior parte de verdadeiros positivos gerada pelo fluxo. Já os falsos positivos, foram

consideravelmente menores, possivelmente em função do maior volume considerado pelo Kanako-2D. As taxas obtidas para os modelos podem ser observadas na Tabela 8, sendo considerado como máximo de falsos positivos a área referente ao fluxo gerado pela *Avalanche Runout* apenas pela cicatriz ao leste com um coeficiente de espalhamento mínimo.

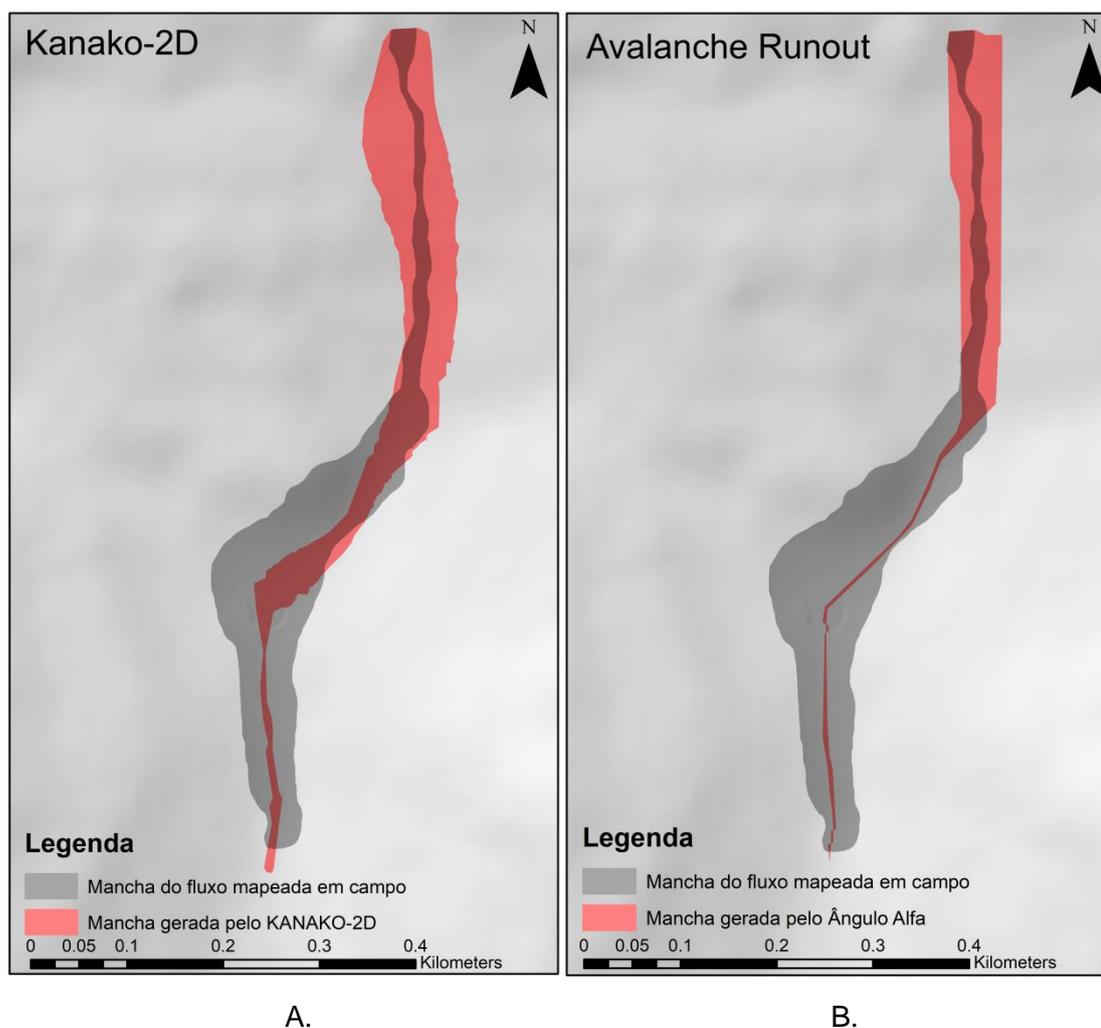


Figura 40. Comparação dos resultados gerados pela metodologia do ângulo alfa e do KANAKO-2D considerando o fluxo ocorrido no ano de 2000.

Tabela 8. Taxas de verdadeiro e falso positivos para os dois modelos.

Modelo	TP	FP
Kanako-2D	41%	14%
<i>Avalanche Runout</i>	20%	8%

Considerando a complexidade do Kanako-2D e a quantidade de parâmetros necessários em comparação a facilidade de uso do ângulo alfa, o resultado pelo

modelo da *Avalanche Runout* foi bastante eficiente. Uma vez que o interesse seja exclusivamente o alcance do fluxo, desconsiderando as informações adicionais oferecidas pelo Kanako-2D, e relevando a condição de confinamento nos canais, é possível utilizar o *Avalanche Runout* mesmo que como resultado preliminar, obtendo resultados consideravelmente satisfatórios.

### 5.5.2. Modelo CPRM

Seguindo a metodologia atualmente utilizada pela CPRM, em toda a bacia do arroio Jaguar apenas uma área foi delimitada como suscetível a ocorrência de fluxo de detritos, omitindo, inclusive, as bacias com histórico de ocorrência do movimento. A classificação sugerida pela CPRM (2014) descreve a área suscetível como uma bacia de drenagem com alta suscetibilidade à geração de corrida de massa e enxurrada, que pode atingir trechos planos e distantes situados à jusante, ainda induzindo solapamento de talude marginal.

Sobrepondo os mapas de suscetibilidade da bacia do arroio Jaguar, conforme a Figura 41, a sub-bacia indicada como suscetível pela CPRM também foi apontada como suscetível pelo método do ângulo alfa, uma vez que sobre essa região foi considerada a existência de área suscetível a escorregamentos. Sobre a sub-bacia suscetível da CPRM a mancha gerada pelo ângulo alfa apresenta melhor uma delimitação, sinalizando apenas as áreas sobre a direção de caminho do fluxo.

A metodologia da CPRM inclusive desconsiderou o local de ocorrência do fluxo de detritos em 2000, como também de outros fluxos já registrados na região. A área sinalizada pelo método representa apenas 4% da bacia do arroio Jaguar, enquanto que o mapa gerado pelo ângulo alfa indicou cerca 35% da área. Por conseguinte, a metodologia da CPRM está subestimando as áreas de maior suscetibilidade a ocorrência de fluxo de detritos. De acordo com a CPRM (no prelo, 2018), já foi desenvolvida uma nova metodologia para substituir a atualmente utilizada, na qual são consideradas as bacias com área de contribuição superior a 1 hectare, drenagem em vale confinado e linha do talvegue com inclinação mínima de 10°. Além disso, a nova metodologia ainda considera as áreas com registro de ocorrência de fluxo de detritos, o que incluiria ao menos a área referente ao evento de 2000, uma vez que o fluxo proveniente da cicatriz ao oeste não é confinado.

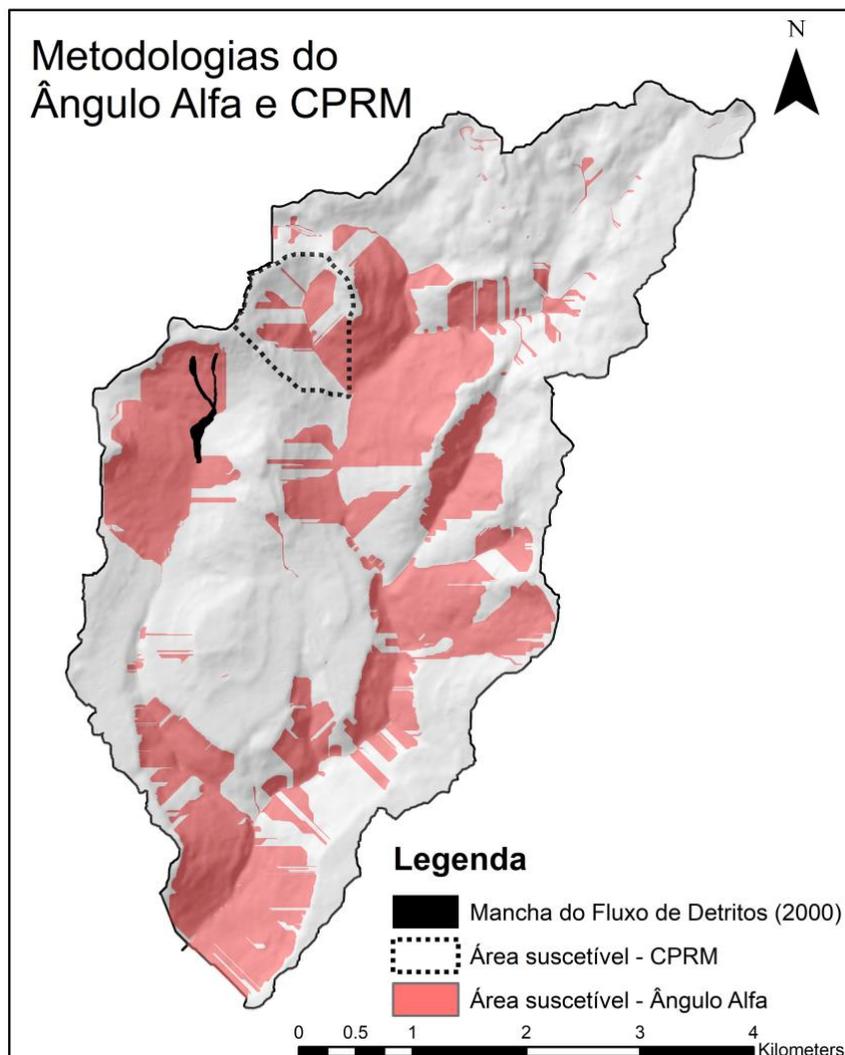


Figura 41. Comparação dos resultados gerados pela metodologia do ângulo alfa e da CPRM para a bacia do arroio Jaguar.

## 5.6. Limitações do Modelo e Incertezas Consideradas

As principais limitações destacadas nos resultados do modelo correspondem principalmente aos efeitos resultantes do formato da encosta e dos efeitos de confinamento do fluxo nos canais encaixados. As encostas com alguma condição de confinamento foram muito mais representativas, mas os vales encaixados reduziram significativamente a mancha do fluxo. Além disso, principalmente no local do fluxo analisado, as modificações do terreno, perda de representação das concavidades e mudanças no uso do solo, certamente influenciaram os resultados. Idealmente deveriam ser utilizados dados coletados anteriormente a data de ocorrência do evento, que teriam maior representatividade.

Entre as incertezas assumidas, além de não considerar o volume, a composição do material também foi desprezada. As variações de tipos de fluxo, mais lenhosos ou pedregosos, também influenciam nos resultados e principalmente no valor do ângulo. Em vista disso, a calibração do modelo com as ocorrências registradas na região é extremamente importante. O ideal seria obter uma maior quantidade de dados e registros para resultados mais abrangentes, uma vez que a própria determinação do ângulo foi feita em função de um único fluxo ocorrido.

Além das incertezas na determinação do coeficiente de espalhamento e do ângulo alfa ideais para a bacia, a definição das áreas de origens também deve ser criteriosa. A mancha gerada pelo fluxo está diretamente associada à extensão da área delimitada como origem. Todavia, os modelos existentes para estabilidade de encostas e áreas suscetíveis a escorregamentos são mais consolidados, com acessibilidade facilitada em relação aos modelos de fluxo de detritos.

Por último, destaca-se a saída limitada de dados ou informações do modelo, uma vez que são obtidos apenas o alcance e espalhamento do fluxo. Dados de velocidade, volume, movimentação das partículas, os processos e mecanismos de erosão e deposição que geram alteração de massa não são concedidos. Contudo, considerando a simplificação do modelo, o propósito é que seja utilizado justamente para obtenção apenas destas informações disponíveis. Uma vez que os dados de entrada solicitados também são consideravelmente reduzidos, facilitando sua obtenção e utilização do modelo.

## 6. CONCLUSÕES

Considerando a importância dos riscos associados a fluxo de detritos e o histórico de ocorrências na bacia do arroio Jaguar, foi possível gerar a partir da *Avalanche Runout* um mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos resultando em 35% da área da bacia considerada suscetível. A partir dos registros de um único evento foram obtidos os valores considerados ideais de ângulo alfa e coeficiente de espalhamento, respectivamente iguais a  $12^\circ$  e 0,37. Contudo, o ideal seria a utilização de outros eventos, a fim de garantir melhor representatividade dos valores definidos. A Lei 12.608/12 especifica como dever dos municípios realizar o monitoramento hidrológico, meteorológico e geológico das áreas de risco, salientando a relevância dessas informações que facilitariam a aplicação do modelo. Além disso, podem também ser exploradas outras equações e valores sugeridos na literatura a fim de determinar as referências mais adequadas e adaptadas a fluxos de detritos no Brasil, e especificamente no município de Alto Feliz.

As análises de sensibilidade em relação à resolução do MDT indicam melhores resultados quando aplicados dados com melhor resolução. Entretanto, mesmo os dados obtidos pelo SRTM, com resolução de 30 metros, foram bastante aproximados do comportamento do fluxo mapeado, mesmo que apresentando pouca precisão na delimitação do caminho do fluxo. As alterações em relação à origem do movimento indicaram melhores resultados quando considerado o formato real do escorregamento de origem. Uma vez que a origem pontual reduziu significativamente o espalhamento do fluxo, o valor ideal obtido passou para 0,2 e ainda assim gerou resultados inferiores aos obtidos pelo coeficiente 0,37 com origem pela cicatriz.

O modelo apresentou dificuldades em representar o fluxo em encostas sem confinamento, devido a um excesso de espalhamento; e em vales muito confinados devido a um excesso de confinamento, gerando um trajeto de fluxo bem definido e estreito. Além disso, a menor precisão de resultados em relação a modelos numéricos e a limitada variedade de informações geradas restringem um pouco a sua utilização. Contudo, desde que os objetivos de uso sejam simples, focados no alcance do fluxo, é possível utilizar a *Avalanche Runout* e obter resultados satisfatórios. Ademais, seu uso pode ser considerado apropriado para estudos

preliminares e principalmente para aplicação em locais com pouco recurso e disponibilidade de dados.

A demanda por serviços de prevenção de desastres no Brasil é crescente e vagarosamente preenchida. A aplicação de metodologias complexas que requerem a determinação de diversos parâmetros é inviável em escala nacional e totalmente dispendiosa. Portanto, os modelos simplificados de fluxo de detritos, como o *Avalanche Runout*, são considerados ótimas alternativas. Ademais, as comparações realizadas neste trabalho, com uma metodologia amplamente utilizada e um modelo dinâmico de elevada complexidade, resultaram em um desempenho satisfatório da ferramenta *Avalanche Runout*, com resultados aproximados entre ambos os modelos.

O mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos atualmente disponível para o município de Alto Feliz pela CPRM, como apresentado anteriormente, subestima consideravelmente as áreas suscetíveis à ocorrência do movimento. Portanto, recomenda-se fortemente que o planejamento da região seja revisado, levando em consideração as áreas indicadas pela *Avalanche Runout* como suscetíveis de serem atingidas. Dessa forma, é possível reduzir consideravelmente a probabilidade de ocorrer novamente um desastre relacionado a fluxo de detritos na região.

## REFERÊNCIAS

- AZAMBUJA, E., ZENI, C. A., BRESSANI, L. A., & NANNI, A. S. (2001). Avaliação dos Fluxos de Detritos em Alto Feliz no Rio Grande do Sul. 3ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (3º COBRAE), Anais, ABMS/ABGE, p. 17-24.
- BAGNOLD, R. A.. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Royal Society. Londres, v. 225, p. 49-63.1954.
- BERTONE, Pedro; MARINHO, Clarice. Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais: A Visão do Planejamento. In: VI Congresso de Gestão Pública CONSAD, Brasília, DF. 2013.
- BIGARELLA, J. J., e PASSOS, E. (2003). Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis: Ed. Da UFSC: v. 3 (p.877-1436).
- COROMINAS, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. p. 260-271.
- COSTA-CABRAL, M. a. (1994). Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. Water Resour. Res., v. 30, p. 1681-1692.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. (2014). Cartas de Suscetibilidade a movimentos gravitacionais e inundação. Escala 1:30.000.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. (2018). Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). (2006). Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. – Rio de Janeiro : EMBRAPA-SPI. p. 306.
- FLORES, C., PÖTTER, R., FASOLO, P., & HASENACK H. & WEBER, E. (2007). Levantamento semidetalhado de solos: Região da Serra Gaúcha - Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS/Embrapa Clima Temperado.
- GUO, D. P., HAMADA, M., & HE, C. (2014). An evaluation of influential factors on landslide mobility during the 2008 Wenchuan earthquake. Natural Hazards and Earth System Sciences , p. 613-647.
- HEIM, A. (1932). Bergsturz und Menschenleben. Zurich: Fretz and Wasmuth Verlag: p. 218.

HIGHLAND, L., M., & BOBROWSKY, P. (2008). The landslide handbook – A guide to understanding landslides. Reston, Virginia, U.S.: Geological Survey Circular 1325, 129p.

HUNGR, O. (1990). Mobility of rock avalanches. Report of the National Institute for Earth Science and Disaster Prevention. p. 11-20.

HUNGR, Oldrich. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. Canadian Geotechnical Journal. Canada, p. 610-623. 1995.

HUNGR, O., LEROUEIL, S., & PICARELLI, L. (2013). The Varnes classification of landslide types, an update. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

HUNGR, O., COROMINAS, J., & EBERHARDT, E. (2018). Estimating landslide motion mechanisms, travel distance and velocity. Landslide Risk Management, Taylor and Francis. p. 99-128.

HUSSIN, H. Y. (2011). Probabilistic Run-out Modeling of Debris Flow in Barcelonnette, France.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas; CPRM - Serviço Geológico do Brasil. (2014). Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações -a 1:25.000. Nota Técnica Explicativa. São Paulo.

IVERSON, R., SCHILLING, S., & VALLANCE, J. (1998). Objective delineation of lahar inundation hazards zones. Geological Society of America Bulletin.

JAKOB, M., & HUNGR, O. (2005). Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Chichester, UK: Praxis. Springer.

KAPPES, M. S. et al. Assessment of debris-flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France. Natural Hazards And Earth System Science, [s.l.], v. 11, n. 2, p.627-641, 28 fev. 2011. Copernicus GmbH.

KOBIYAMA, M., SILVA, R. V., CHECCIA, T., & ALVES, A. (2004). Mapeamento de Área de Perigo com Consideração do Alcance da Massa Deslizada: Estudo de Caso. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais. Florianópolis, Anais, p. 117-128.

KOBIYAMA, M.; CHAFFE, P.L.B.; GOERL, R.F.; GIGLIO, J.N.; REGINATTO, G.M.P. (2010) Hydrological disasters reduction: lessons from hydrology. In Science and Technology for Environmental Studies: Experiences from Brazil, Portugal and Germany. Org. por SENS, M.L.; MONDARDO, R.I., Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, p.49-72.

KOBIYAMA, M.; MICHEL, G.P. Ocorrência de fluxo de detritos e seus estudos no Brasil. *Revista Geonorte*, V.10, N.1, p.132-137, 2014.

KOBIYAMA, M.; MICHEL, G.P.; ENGSTER, E.C.; PAIXAO, M. A. Historical analyses of debris flow disaster occurrences and of their scientific investigation in Brazil. *Labor & Engenho*, v.9, p.76-89, 2015.

KRITIKOS, Theodosios; DAVIES, Tim. (2014). Assessment of rainfall-generated shallow landslide/debris-flow susceptibility and runout using a GIS-based approach: application to western Southern Alps of New Zealand. *Landslides*, v. 12, n. 6, p.1051-1075.

LEGROS, François. The mobility of long-runout landslides. *Engineering Geology*, [s.l.], v. 63, n. 3-4, p.301-331, mar. 2002. Elsevier BV.

MCDUGALL, S., MCKINNON, M., & HUNGR, O. (2012). Developments in landslide runout prediction. *Landslides: Types, Mechanisms and Modeling*, ed. John J. Clague and Douglas Stead. Published by Cambridge University Press., p. 187-195.

MCKINNON, M. (2010). *Landslide Runout Statistical Analysis of Physical Characteristics and Model Parameters*. Vancouver, Canada.

MICHEL, G.P. Estimativa da profundidade do solo e seu efeito na modelagem de escorregamentos. 2015. 164 f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2015.

MICHEL, G. P., KOBIYAMA, M., GOERL, R. F., & MICHEL, R. (2015a). Metodologia de mapeamento de escorregamentos e fluxos de detritos. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília. *Segurança Hídrica e Desenvolvimento Sustentável*. Porto Alegre: ABRH, p. 1-8.

MICHEL, G., KOBIYAMA, M., & GOERL, R. (2015b). Effectiveness analysis of small artificial reservoir for reducing sediment delivery due to debris flow with KANAKO model. In: 6th International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation, Tsukuba/Japão, Proceedings, p.119.

MICHEL, R. D. L .; KOBIYAMA, M. (2018). Avaliação da ocorrência de fluxo de detritos na região rural do município de Alto Feliz/RS com a utilização do Kanako-2D. I Encontro Nacional de Desastres.

NAKATANI, K.; WADA, T.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. Development of “Kanako 2D (Ver.2.00),” a user-friendly one- and two-dimensional debris flow simulator

equipped with a graphical user interface. *International Journal of Erosion Control Engineering*, v. 1, n. 2, p. 62-72, 2008.

O'CALLAGHAN, J. F. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Comput. Vision Graphics Image Process.*, 28, 328-344.

PAIXAO, M. A. Análise de sensibilidade do modelo de fluxos de detritos – KANAKO-2D. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR/RS.

PAIXAO, M. A.; MICHEL, R.D.L; KOBIYAMA, M; RICHIT, L. A.;BARRAGAN, M. M.; MICHEL, G.P. Guia prático de modelagem de fluxo de detritos com utilização do modelo KANAKO-2D. Porto Alegre: GPDEN/IPH/UFRGS, 2017. 25p. (Trabalho Técnico GPDEN. No. 05).

QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P., & PLANCHON, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrol. Proc.*, v. 5, p. 59-98.

RICKENMANN, D. (2005). Runout Prediction Methods. In: M. Jakob, & O. Hungr, *Debris Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer Berlin Heidelberg: Praxis .

RICKENMANN, D.; ZIMMERMANN, M.. The 1987 debris flow in Switzerland: documentation and analysis. *Elsevier Science Publishers, Amsterdam*, n. 8, p.175-189, jun. 1993.

RILC, Žiga, 2016, Ocena ogroženosti zaradi snežnih plazov v Julijskih Alpah s pomočjo geografskih informacijskih sistemov : magistrsko delo [na spletu]. Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta . [Dostopano 25 december 2018]. Disponível em: <<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?lang=slv&id=88093>>

ROCHA, H. L. Aplicação do modelo FLO-2D para simulação de fluxo de detritos na bacia do rio Cunha, Rio dos Cedros/SC. Dissertação de Mestrado. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

SCHEEVEL, C. R. (s.d.). (2017) Predicting landslide stability, runout, and failure velocity at cook lake landslide, wyoming. Golden, Colorado.

SCHEIDEGGER, A. (1973). On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics*. p. 231-236.

SHARPE, C. F. (1938). *Landslides and Related Phenomena*. Columbia University Press, New York.

SHREVE. (1968). The blackhawk landslide. Geological Society of America.

SLAYMAKER, O. (1988). The distinctive attributes of debris torrents. Hydrological Sciences – Journal –des Sciences Hydrologiques, v. 33, p. 567-573.

STINY, J. (1910). Die Muren. Verlag der Wagner'schen Universitäts-buchhandlung, Innsbruck. [Debris Flow (English translation by M. Jacob e N. Skermer 1997,p. 106. Vancouver, Canada: EBA Engineering Consultants.

TAKAHASHI, T. (1991). Debris Flow. A.A. Balkema, Brookfield, Vt.: p. 165.

TAKAHASHI, T. (2007). Debris Flow. Mechanics, Prediction and Countermeasures. Taylor & Francis/Balkema.

TARBOTON, T.. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. Water Resources Research. v. 33, n. 2, p.309-319, fev. 1997.

TARBOTON, D. G., DASH, P., e SAZIB, N. (2015). TauDEM 5.3. Guide to Using the TauDEM Command Line Functions.

USGS - U.S. Geological Survey. Landslide Types and Processes. Factsheet 2004-3072, 2004, 4p.

VARNES, D. (1978). Slope movement types and processes. In: R.J. Schuster and R.J. Krizek (eds), Landslides, Analysis and Control. . Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington, DC. Special Report 176: p. 11-33.

VIERO, A. C.; SILVA, D. R. A. (org.) Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM, 2010.

WILDNER, W., ORLANDI FILHO, V., & GIFFONI, L. (2004). Excursão Virtual dos Aparados da Serra – RS/SC: aspectos geológicos e turísticos – Cânions do Itaimbezinho e Fortaleza. . Porto Alegre. CPRM, p. 88.