

Artigo de Pesquisa

Suscetibilidade a Fluxos de Detritos a partir de Descritores da Paisagem

Debris flow susceptibility from Landscape Descriptors

Clarissa Guerra Salvador ¹ e Gean Paulo Michel ²

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, Brasil.
clarissagsalvador@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7420-8136>

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, Brasil.
gean.michel@ufrgs.br ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7857-1941>

Recebido: 19/01/2022; Aceito: 28/03/2023; Publicado: 26/05/2023

Resumo: A demanda por ações de prevenção a desastres no Brasil é crescente e vagarosamente preenchida. Metodologias complexas que requerem grande disponibilidade de dados são bastante onerosas e inviáveis em escala nacional. Assim, o presente trabalho propõe uma metodologia para análise de suscetibilidade a fluxo de detritos utilizando descritores da paisagem. Os descritores utilizados são ferramentas da plataforma TauDEM, *Avalanche Runout* e *Distance Down*. Três parâmetros são necessários, o ângulo de alcance, definido como critério de parada, um limiar de proporção, para controlar a dispersão do fluxo, e a altura de material do fluxo considerada no entorno do canal de drenagem. O modelo resultou em uma taxa de 94% de verdadeiros positivos a partir da reconstrução de um fluxo de detritos ocorrido na bacia do arroio Jaguar, em Alto Feliz-RS, com a utilização de um MDT de 2,5 metros de resolução. Ainda, com os parâmetros calibrados foi gerado um mapa de suscetibilidade a fluxos de detritos para a bacia do arroio Jaguar e comparado à carta de suscetibilidade a corridas de massa da CPRM. O modelo proposto é considerado promissor especialmente para aplicação em estudos preliminares e locais com pouco recurso e baixa disponibilidade de dados.

Palavras-chave: Fluxo de detritos; Descritor da paisagem; TauDEM.

Abstract: The demand for disaster prevention actions in Brazil is growing, but slowly being filled. The use of complex methodologies that require a large amount of data is unfeasible on a national scale, besides being quite expensive. In this view, the present work proposes a new methodology for analyzing debris flow susceptible areas, based on landscape descriptors. The landscape descriptors used are from TauDEM platform, by combination of *Avalanche Runout* and *Distance Down* tools. Three parameters are required by the tools, the angle of reach, defined as a stopping criterion, a threshold of proportion, to control the flow dispersion, and the material flow height. The model resulted in a true positive rate of 94%, from the reconstruction of a debris flow that occurred in the Jaguar stream basin, in Alto Feliz, RS, using a DTM of 2.5 meters resolution. Furthermore a debris flows susceptibility map in the Jaguar stream basin was generated and compared with the debris flow high susceptibility areas designated by the CPRM in the municipality. The proposed model is considered promising especially for preliminary applications for places with low resources and data availability.

Keywords: Debris flow susceptibility; Landscape descriptors; TauDEM.

1. Introdução

A exposição da população à ocorrência de desastres tem crescido consideravelmente em concordância ao aumento ocupacional das áreas de risco. Dentre os desastres geológicos, o fluxo de detritos, também chamado de

corrida de massa pela classificação da COBRADE (2012), está entre os movimentos mais perigosos, geralmente associados a bacias de regiões montanhosas, apresentam elevado potencial destrutivo, percorrem longas distâncias e atingem altas velocidades (IMAIZUMI et al., 2017). Os fluxos de detritos podem ser ocasionados de diferentes formas, ocorrendo principalmente a partir de escorregamentos translacionais desencadeados por eventos extremos de precipitação.

A maneira mais efetiva para mitigação dos fluxos de detritos é a modelagem, onde é possível prever com certa precisão o caminho do fluxo (McKINNON, 2010). Os modelos que trazem um maior nível de precisão em geral estão vinculados a maior quantidade de dados e de esforço computacional. Modelos como MassMov2D (BEGUERÍA et al., 2009), Flo2D (O'BRIEN, JULIEN e FULLERTON, 2006) e Kanako-2D (NAKATANI, 2008) são alguns modelos numéricos que se propõe a simular a propagação do fluxo de detritos de maneira fisicamente embasada, com abordagens mais complexas quando comparadas a modelos empíricos. Em geral, modelos fisicamente embasados demandam uma grande quantidade de dados e parâmetros de entrada, que por sua vez podem acabar incorporando inúmeras incertezas aos resultados, além de dispor de grande quantidade de recursos técnicos e financeiros. Conforme Guinau, Vilajosana e Vilaplana (2007), em muitos países a escassez de recursos, de dados de qualidade e de pessoas especializadas constitui uma forte desvantagem para a análise de risco e suscetibilidade a movimentos de massa. Por conseguinte, para algumas finalidades, a utilização de modelos empíricos pode ser vantajosa em função da facilidade de uso e da redução na quantidade de parâmetros necessários. Em vista disso, modelos empíricos são recorrentemente utilizados em análises de suscetibilidade a fluxos de detritos, sendo aplicados localmente (FACURI e PIKANÇO, 2021; PARK et al., 2016) ou em escala regional (ZHOU et al., 2019; KANG e LEE, 2018; PASTORELLO et al., 2017; REID et al., 2016).

Fannin e Wise (2001) ressaltam que em muitas situações onde a compreensão das propriedades do material é limitada e o percurso do fluxo de detritos é controlado por mudanças súbitas no terreno, métodos empíricos oferecem uma abordagem prática para prever o comportamento do movimento; especialmente quando associados a descritores da paisagem. Guinau, Vilajosana e Vilaplana (2007) descreveram ferramentas SIG como possíveis de serem aplicadas de maneira vantajosa, apresentando uma metodologia para zoneamento de áreas suscetíveis a escorregamentos e fluxos de detritos. Recentemente, a aplicação de modelos empíricos e baseados em descritores da paisagem (ZHOU et al., 2019; BEE, 2019; KANG e LEE, 2018) tem recebido especial atenção, justamente pela sua facilidade de aplicação em grandes áreas. A plataforma TauDEM – *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models* apresenta diversas ferramentas descritoras do terreno e utilizadas em análises de suscetibilidade a escorregamentos (KORNEJADY et al., 2018) e a fluxos de detritos (GUINAU, VILAJOSANA e VILAPLANA, 2007; KRITICOS e DAVIES, 2014; GRILC, 2016; MELO e ZÊRERE, 2017). Em geral, os modelos utilizam as ferramentas como parte da análise de suscetibilidade, contemplando os descritores da paisagem em conjunto com análises estatísticas e de probabilidade.

Eventos recentes de grande magnitude associados a fluxos de detritos ocorreram nos municípios de Rolante (RS) e na região do Alto Vale do Itajaí (SC), respectivamente em 2017 e 2020. Entretanto, diversos municípios são recorrentemente atingidos pelo movimento. Entre eles o município de Alto Feliz (RS) com um histórico de ocorrências de fluxos de detritos nos anos de 1982 e 2000 resultando em prejuízos à população local e fatalidades. Atualmente, a CPRM realiza o mapeamento de áreas suscetíveis a desastres através da elaboração das cartas de suscetibilidade, conforme previsto pelo Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais (BRASIL, 2012). O município de Alto Feliz e mais 527 localidades do Brasil (CPRM, 2021) já foram contempladas com o mapeamento de suscetibilidade, embora poucos municípios tenham sido contemplados com análises mais específicas que abrangem o alcance do movimento. Esses produtos são obtidos nas cartas de perigo geológico, elaboradas com escala de maior detalhe e metodologia empírica baseada na identificação de canais de drenagem confinados. Entretanto, poucos municípios foram contemplados com esse mapeamento, justamente devido a maior complexidade da análise e necessidade de validação em campo.

Portanto, a utilização de modelos simplificados em estudos preliminares ou para aplicação em locais com pouco recurso e disponibilidade de dados propicia abranger extensas áreas de forma rápida e pouco onerosa. Por conseguinte, tendo em vista a demanda por mapeamento de áreas de risco em escala nacional, que compreende a determinação de mapeamentos de suscetibilidade, e considerando a relevância desses produtos para planejamento territorial e restrição de ocupação de áreas de risco, o presente trabalho propõe avaliar o desempenho de um modelo simplificado, baseado nas ferramentas descritoras da paisagem, e gerar um mapa de

susceptibilidade a fluxo de detritos na bacia do arroio Jaguar, no município de Alto Feliz, RS, tendo como referência o evento ocorrido no ano de 2000.

2. Metodologia

A análise de susceptibilidade a fluxos de detritos por descritores da paisagem é aplicada em duas etapas a partir de duas ferramentas da plataforma TauDEM, e sua calibração feita a partir de variáveis empíricas. As duas ferramentas consistem na *D-infinity Avalanche Runout* e *D-infinity Distance Down*, ambas embasadas no método de direcionamento de fluxo *D-infinity Flow Direction* (TARBOTON, 1997). O algoritmo *D-infinity* permite considerar infinitas possibilidades de direções de fluxo continuamente numa direção entre 0 e 2π , no entanto o caminho preferencial é indicado proporcionalmente em até duas células vizinhas, na direção de maior desnível negativo. Esse mecanismo possibilita uma maior dispersão do fluxo, embora em determinadas condições, como em planícies aluviais, apresenta espalhamento reduzido, pelo confinamento completo do fluxo no canal de drenagem, adquirindo um comportamento similar ao direcionamento de fluxo D8 (O'CALLAGHAN e MARK, 1984).

A aplicação das ferramentas requer que sejam indicadas áreas de origem dos fluxos de detritos, a partir das quais ocorre a dispersão do escoamento. Essas áreas representam polígonos do terreno previamente identificados como áreas de elevada susceptibilidade através de modelos de susceptibilidade a escorregamentos translacionais, ou a partir de cicatrizes antigas de escorregamentos. A partir da área de origem previamente delimitada é aplicada a ferramenta *Avalanche Runout* que delimita a propagação do fluxo até o canal. No canal, onde todas as linhas do escoamento tendem a convergir em uma única direção de fluxo devido às características morfológicas do terreno e onde a ferramenta *Avalanche Runout* já não é capaz de representar o alcance lateral dos fluxos, a área afetada passa ser representada pela *Distance Down*. A junção das áreas indicadas pelas duas ferramentas, aplicadas em conjunto como um modelo empírico de base em geoprocessamento, resulta no mapa de susceptibilidade a fluxos de detritos.

2.1. *Avalanche Runout*

A *Avalanche Runout* simula a propagação do fluxo a partir de cada célula indicada como origem, seguindo o direcionamento de fluxo até atingir as células cujo ângulo de alcance é menor que o valor estabelecido na simulação. O ângulo de alcance, inicialmente introduzido como *fahrböschung* (HEIM, 1932), representa uma medida relativa da mobilidade do movimento (COROMINAS, 1996), caracterizado como o ângulo formado entre o ponto de origem, na cabeceira do escorregamento, até o ponto de maior alcance, no final da zona de deposição. Valores do ângulo de alcance associados a fluxo de detritos variam essencialmente entre 7° (ZIMMERMANN, 1997) e 14° (KAPPEL et al., 2011), sendo o intervalo de 10° a 13° descrito para fluxos de detritos ocorridos em áreas florestadas (JOHNSON, SWANSTON e MCGEE, 2000). Ainda, Scheevel (2017) relatou um ângulo de alcance de 10° para movimentos de fluxo de detritos originados por escorregamentos. Contudo, existem diversos valores na literatura e o ideal é estimar um ângulo a partir de eventos já ocorridos na bacia ou utilizar valores de bacias condizentes com características locais, uma vez que esse parâmetro está fortemente associado às características morfológicas da região de ocorrência e ao material de composição do fluxo.

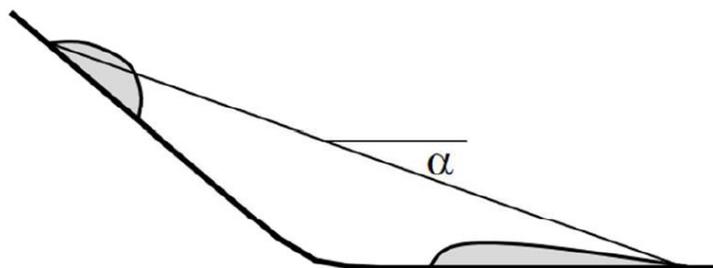


Figura 1. Representação do ângulo de alcance (α). Fonte: McDougall, McKinnon e Hungr, 2012.

Além do valor do ângulo de alcance, utilizado como critério de parada do movimento, a ferramenta considera outro parâmetro denominado limiar de proporção com a finalidade de restringir os efeitos de dispersão gerados pelo método de direção de fluxo. O limiar, variando de 0 a 1, representa a porcentagem mínima de fluxo que uma célula deve receber para ser considerada parte da área afetada. O método de direcionamento de fluxo

D-infinity permite estabelecer até duas células como caminho preferencial, mas a porcentagem de fluxo recebida em cada célula deve ser maior ou igual ao limiar de proporção para que seja considerada parte da área afetada. Um limiar de proporção zero representa uma ausência de restrição, resultando na máxima dispersão de fluxo. Por sua vez, um limiar igual a 1 indica que a célula deve receber 100% do fluxo para ser considerada parte da área afetada, restringindo completamente o espalhamento do fluxo.

2.2. Distance Down

A *D-infinity Distance Down* (TESFA et al., 2011) apresenta um princípio de funcionamento similar ao do modelo HAND (RENNÓ et al., 2008), porém ainda permite medir a distância vertical, horizontal, real ou euclidiana entre cada célula da bacia e o canal de drenagem. O diferencial da ferramenta consiste ainda na utilização do método de direcionamento de fluxo *D-infinity*, permitindo que a distância medida seja calculada a partir do caminho de fluxo mais próximo, mais longo ou pela média ponderada até o canal de drenagem. A delimitação do canal de drenagem, a partir do qual a ferramenta calcula as diferenças de elevação em cada célula, deve ser feita por um limiar de área de contribuição a partir do qual a *Avalanche Runout* perde representatividade devido à restrição de dispersão do fluxo no canal. Não obstante, o critério de parada do movimento deve ser mantido pela *Avalanche Runout*, em função do ângulo de alcance característico daquela região, caso contrário a área simulada seguiria até o exutório da bacia.

Para estimativa da área afetada pelo fluxo de detritos foi utilizada a medida da distância vertical em relação à linha do talvegue através da média ponderada do caminho de direção de fluxo. Tendo um valor associado a cada célula é possível estabelecer um limiar em função da altura de material do fluxo de detritos, estimada de maneira empírica, e obter a mancha de área afetada, a qual necessariamente ocorre em torno do canal de drenagem.

2.3. Calibração dos parâmetros

Modelos empíricos são baseados em observações de campo e dados históricos, quanto mais completo o banco de dados disponível a tendência é de que os resultados do modelo sejam mais confiáveis. A análise por descritores da paisagem apresenta base empírica na calibração dos parâmetros, sendo eles o ângulo de alcance, o limiar de proporção e a altura de deposição do fluxo. O ângulo de alcance e a altura de deposição são variáveis estimadas por medições empíricas, obtidas diretamente a partir de geoprocessamento com base em eventos já ocorridos na região, neste caso, o evento ocorrido no ano 2000. Ambos os parâmetros foram definidos conforme o alcance na simulação do modelo que apresentou maior semelhança visual em comparação à mancha da área afetada pelo fluxo de detritos.

Já o valor do limiar de proporção não representa uma variável diretamente medida a partir do evento do fluxo de detritos, mas sim um parâmetro de calibração associado ao próprio algoritmo da *Avalanche Runout*. A sensibilidade do modelo a esse parâmetro é relativamente baixa, portanto é mais difícil identificar visualmente qual o limiar de proporção ideal na simulação do fluxo de detritos. Portanto, a determinação do limiar de proporção na simulação foi obtida por uma análise adaptada da curva ROC - *Receiver Operating Characteristic*, considerando o valor mais próximo do ponto de 100% de verdadeiros positivos e 0% de falsos positivos. A utilização da curva é apenas representativa do desempenho de cada um dos limiares de proporção, sendo considerados os valores variando de 0,2 a 0,5, espaçados em 0,025. A taxa de verdadeiro positivo é dada pela área simulada que incidiu sobre a área da cicatriz mapeada, em função da área total da cicatriz mapeada. A taxa de falso positivo é dada pela área incidente fora da área da cicatriz mapeada, em função da área máxima possível de ser atingida. Para a calibração do parâmetro do limiar de proporção foi considerada como área máxima possível de ser atingida, a área simulada pelo limiar de proporção nulo, o que resulta na dispersão máxima do fluxo na simulação.

Para avaliação do desempenho do modelo também foram consideradas as taxas de verdadeiro e falso positivo. A taxa de verdadeiro positivo foi obtida da mesma forma que a estimativa do limiar de proporção, enquanto que para os falsos positivos foi considerado como área máxima possível de ser atingida a área da sub-bacia de elevação máxima nas cotas das cicatrizes e exutório em função do ângulo de alcance estabelecido na simulação.

3. Estudo de caso

Como estudo de caso consideramos a área do estudo da bacia do arroio Jaguar, de aproximadamente 25 km², pertencente ao município de Alto Feliz no estado do Rio Grande do Sul (Figura 2). A região está localizada sobre a Encosta Inferior do Nordeste Rio-Grandense, sobre a Formação Serra Geral que resulta em forte interferência na geomorfologia local. A interface entre os derrames ácidos e básicos das fácies Caxias e Gramado resulta em um relevo mais declivoso nas regiões de montante da bacia seguido por um comprimento de encosta mais dissecado, favorecendo o desenvolvimento de eventos como fluxos de detritos. A bacia é considerada de área rural, com a maior parte da cobertura natural mantida nas áreas de encosta, mas com crescente aumento de silvicultura na região.

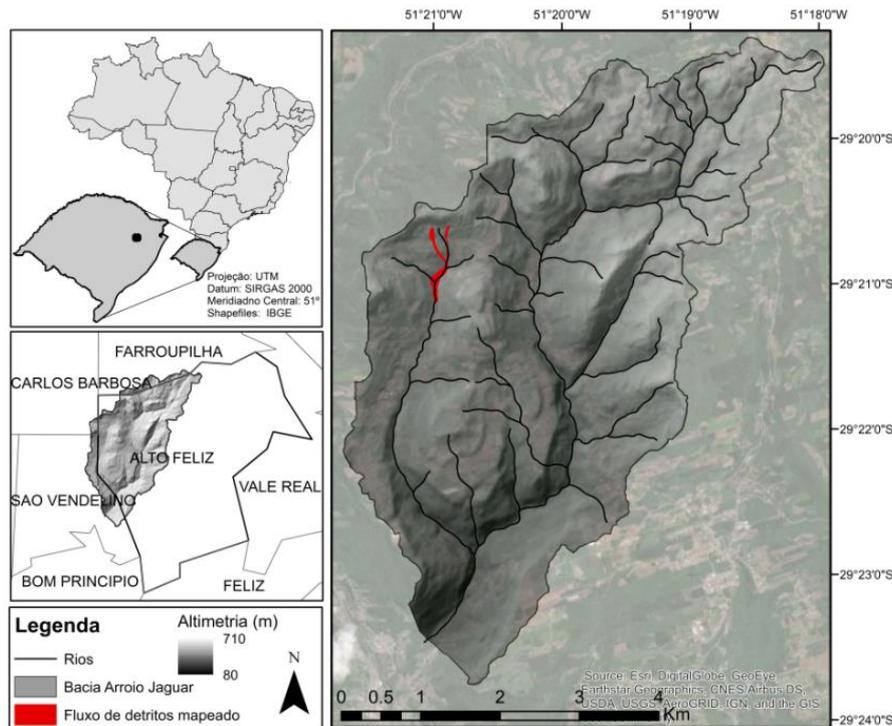


Figura 2. Mapa de localização da bacia do arroio Jaguar.

3.1. Dados utilizados

Os descritores da paisagem têm como principal dado de entrada um modelo digital do terreno (MDT), previamente processado com o preenchimento das depressões do terreno pela elevação das células até a altura do ponto mais baixo ao seu entorno. O MDT utilizado no estudo foi cedido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), obtido em 2014 a partir de interferometria de radar na banda P, com 2,5 metros de resolução.

O evento utilizado para calibração dos parâmetros é um fluxo de detritos ocorrido no ano 2000, na bacia do arroio Jaguar, que foi mapeado através de estudos de campo e fotointerpretação. Foram utilizadas imagens de satélite após o evento, e levantados pontos em campo com registro de passagem do fluxo para delimitação da mancha da área afetada com maior precisão. Os parâmetros empíricos melhor ajustados no evento do ano 2000 foram estendidos para toda a bacia. A aplicação do modelo foi feita considerando como origem as áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais geradas pelo modelo TRIGRS e calibradas com cicatrizes de escorregamentos do evento do ano 2000 (MICHEL, 2015) (Figura 3b), a fim de gerar o mapa de suscetibilidade a fluxos de detritos na bacia do arroio Jaguar. O mapeamento das áreas suscetíveis de toda a bacia foi confrontado à carta de suscetibilidade a corridas de massa para o município de Alto Feliz (CPRM, 2014), gerada a partir da análise de critérios definidos como fatores de predisposição à ocorrência do movimento. Na bacia do arroio Jaguar foi identificada pela CPRM apenas uma sub-bacia com alto nível de suscetibilidade, conforme indicado na Figura 3a.

A simulação do modelo para o fluxo de detritos usado na calibração dos dados foi comparada à simulação da área afetada pelo fluxo de detritos gerada pelo modelo Kanako-2D (KOBAYAMA et al., 2018), a fim de verificar o desempenho do modelo proposto frente aos resultados obtidos por um modelo fisicamente embasado. O

Kanako-2D simula a propagação do fluxo de detritos a partir da zona de transporte, utilizando equações de continuidade, de conservação de momento e de deformação do leito do canal. O modelo considera um volume inicial de propagação, e requer que sejam determinados parâmetros de geometria do canal, características do material do fluxo, taxas de erosão e deposição e tensões de cisalhamento no leito, parâmetros de difícil obtenção que acabam sendo estimados na maioria das vezes.

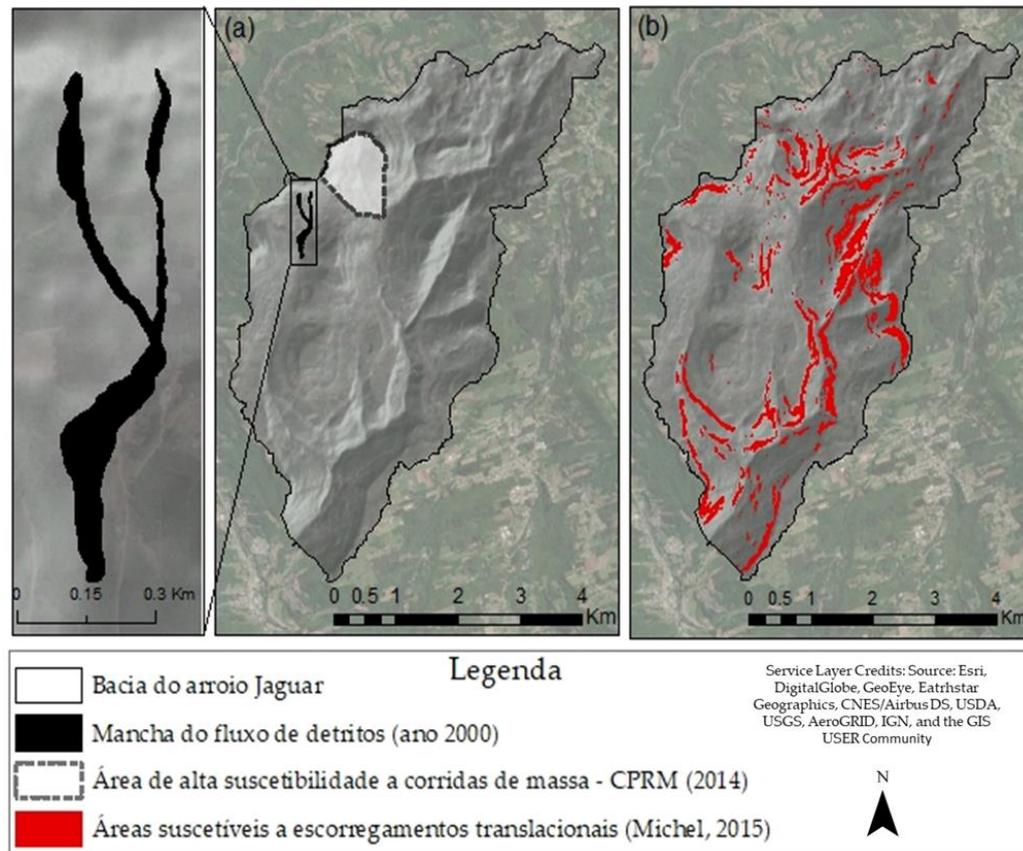


Figura 3. a. Sub-bacia com alta suscetibilidade a fluxos de detritos, conforme carta de suscetibilidade a corridas de massa para o município de Alto Feliz (CPRM, 2014) e mancha do fluxo de detritos mapeado. b) Mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais (MICHEL, 2015).

4. Resultados

4.1. Calibração dos Parâmetros

A calibração do modelo a partir da mancha mapeada em campo do fluxo de detritos ocorrido no ano 2000 (Figura 3), utilizando o MDT de 2,5 metros de tamanho de pixel, resultou em um ângulo de alcance de 12° , um limiar de proporção de 0,37 e uma altura de deposição de material de 5 metros. Enquanto a delimitação do ângulo de alcance e da área indicada como deposição pode ser visualmente reconhecida, o limiar de proporção apresenta uma variação mais sutil, sendo individualmente determinado por uma análise adaptada da curva ROC conforme Figura 4. Entre os valores analisados foi identificado o intervalo entre 0,35 e 0,375 como mais próximo do melhor desempenho do modelo. Portanto, dentro desse intervalo foi estabelecido o valor de 0,37 como o limiar de proporção que gerou o resultado mais próximo do ideal, com uma porcentagem associada de verdadeiros positivos de 66%, e falsos positivos de 35%. A máxima taxa de verdadeiros positivos alcançada foi de 74% obtida pelo limiar de proporção nulo, consequentemente resultando em 100% de falsos positivos, pois conforme os critérios adotados na definição do limiar de proporção o limiar zero representa a área máxima possível de ser atingida na simulação. As taxas de falsos positivos resultam em valores elevados em função dessa condição mais conservadora, restrita à determinação do limiar de proporção, uma vez que restringe excessivamente a área considerada como possível de ser atingida.

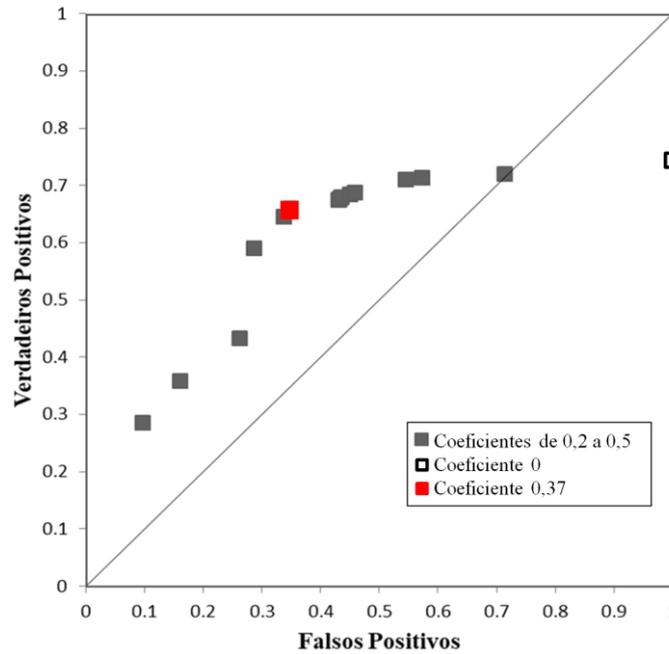


Figura 4. Curva ROC dos limites de proporção para *Avalanche Runout*.

Tabela 1. Taxas de Verdadeiro Positivo (VP) e Falso Positivo (FP) para cada coeficiente testado.

Coeficiente	VP	FP	Coeficientes	VP	FP
0	74%	100%	0,35	67%	43%
0,2	71%	71%	0,375	65%	35%
0,225	71%	57%	0,4	64%	33%
0,25	70%	47%	0,425	55%	28%
0,275	68%	46%	0,45	42%	26%
0,3	68%	45%	0,475	34%	16%
0,325	67%	44%	0,5	27%	9%

4.2. Simulação *Avalanche Runout* e *Distance Down*

A área afetada pelo fluxo de detritos conforme cada etapa da simulação do modelo é apresentada na Figura 5. O trecho inicial da macha do fluxo de detritos simulado, obtido a partir da *Avalanche Runout*, foi bem representado particularmente no fluxo partindo da cicatriz ao leste, pois incide sobre um terreno mais encaixado. Contudo, a propagação do fluxo ao atingir o canal mostrou-se inadequada, ocorrendo a convergência de todo material no canal de drenagem, tendo a largura de um único pixel e seguindo canalizado até atingir o valor do ângulo de alcance estabelecido (Figura 5a). Por mais que muitos fluxos de detritos inseridos no canal de drenagem sigam canalizados por longas distâncias, possivelmente transformados em inundações de detritos ou fluxos hiperconcentrados, resultando em elevada concentração de sedimentos ao longo do canal, grande parte do material permanece acumulada em zonas de deposição, ou ao menos apresenta as margens laterais do canal (zona ripária) como zona de passagem, divergindo consideravelmente do comportamento gerado nesse trecho pela ferramenta.

Assim, aplica-se a ferramenta *Distance Down* nessa região do entorno do canal (Figura 5b), considerando o início da drenagem próximo à zona com baixa representatividade da *Avalanche Runout*, e utilizando como limiar uma altura vertical de cinco metros a partir da linha do talvegue. A delimitação dessa altura foi estimada de maneira visual com base no alcance de espalhamento do fluxo mapeado em comparação com o alcance da área simulada com diferentes limiares, sendo o de cinco metros o mais aproximado, em sobreposição das manchas. A junção das duas ferramentas reflete a melhor representação do fluxo de detritos, considerando que no trecho a jusante a *Avalanche Runout* não apresenta bons resultados, e a zona de iniciação não pode ser reproduzida pela *Distance Down*. A sobreposição das duas manchas (Figura 5c), como representação final da área afetada pelo fluxo

de detritos ocorrido no evento do ano 2000, resulta em taxas de verdadeiro positivo de 94% e falso positivo de 5%, com melhorias significativas na junção dos resultados de cada ferramenta, conforme apresentado pela Tabela 1.

Ainda se ressalta que as taxas de falso positivo estão fortemente associadas à falta de representação do MDT elaborado com dados do ano de 2014, posteriormente a ocorrência do evento, em função das diferentes características morfológicas presentes na data de ocorrência do evento (dezembro de 2000). A própria modificação do terreno pelo fluxo de detritos, entre trechos de erosão e deposição, pode ter alterado significativamente as curvaturas da encosta, influenciando no caminho preferencial de direcionamento do fluxo. Analisando o desempenho do modelo estritamente na área afetada apresentada pela Figura 5a é possível identificar dois trechos de comportamento do fluxo simulado a partir das duas zonas de iniciação. A zona de transporte a partir da cicatriz de origem mais ao leste se mostrou condizente com o fluxo mapeado em campo, uma vez que excedeu levemente o contorno da cicatriz delimitada. Já no trecho do fluxo com origem a oeste, ocorreu uma dispersão responsável por grande parte dos falsos positivos da simulação. Essa diferença de comportamento está associada ao formato da encosta, que apresenta uma condição de maior confinamento no trecho de fluxo ao leste, enquanto que a região da encosta com o fluxo a oeste acaba apresentando uma atenuação do confinamento da vertente, de forma que mesmo com redução do limiar de proporção, apresenta um excesso de dispersão do fluxo. Essa condição pode ser observada na Figura 6, com alguns perfis transversais do terreno por onde ocorreu a passagem do fluxo, sem considerar as profundidades do escoamento.

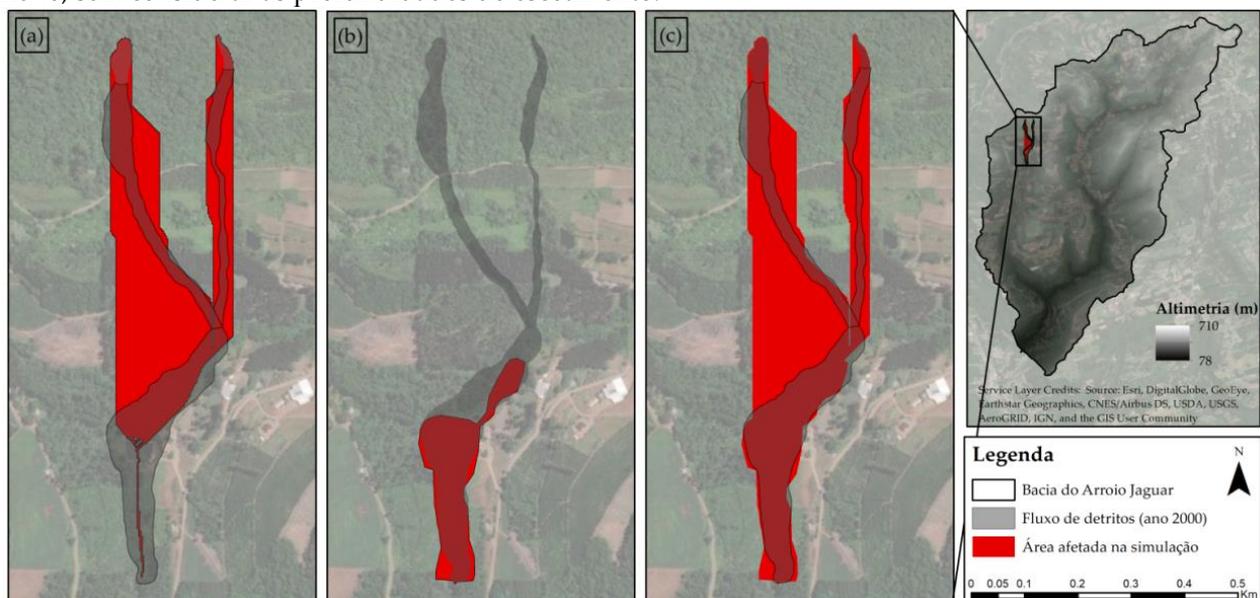


Figura 5. a) Simulação do fluxo de detritos ocorrido no ano 2000 pela *Avalanche Runout*. b) Simulação em torno do canal de drenagem do fluxo de detritos ocorrido no ano 2000 pela *Distance Down*. c) Área afetada simulada para o fluxo de detritos no ano 2000.

Tabela 2. Taxas de verdadeiro e falso positivo das áreas afetadas pelo fluxo de detritos.

	VP ¹	FP ²
<i>Avalanche Runout</i>	65,6%	5,2%
<i>Distance Down</i>	38,0%	0,3%
Modelo Final	93,8%	5,5%

¹Taxa de verdadeiros positivos (área simulada coincidente com área mapeada em função de área total mapeada para o fluxo).

²Taxa de falsos positivos (área simulada não coincidente com área mapeada em função da área da sub-bacia de elevação máxima nas cotas das cicatrizes e exutório em função do ângulo de alcance de 12°).

No trecho inicial de propagação (Figura 6a) é possível observar duas seções de maior confinamento, possivelmente acentuadas após a erosão do fluxo de detritos. No trecho seguinte (Figura 6b) a seção de passagem do fluxo a oeste não apresenta mais um confinamento tão evidenciado, que pode ter sido preenchido com material depositado durante o evento, favorecendo um maior espalhamento do fluxo na simulação. O oposto ocorre quando todo o fluxo converge para um mesmo ponto no canal de drenagem e segue canalizado até atingir o

ângulo de alcance, independentemente do valor do limiar de proporção considerado (Figura 5a). Isso resulta em uma má representação da zona de deposição do fluxo, indicada por um único trajeto linear (com largura de 1 pixel) até o final do movimento, que por sua vez pode ser corrigido com a aplicação da ferramenta *Distance Down*. Essa condição pode ser observada na Figura 6c, onde o terreno apresenta uma pequena seção confinada de aproximadamente 5 metros de largura. Nas margens desse canal, o terreno segue uma elevação gradual para ambos os lados onde é considerada a altura de 5 metros do fluxo de detritos como extravasamento da calha de passagem do fluxo. A área afetada pela simulação passa a ser condizente com um comportamento esperado para fluxos de detritos e a área mapeada no evento. No entanto, o uso da *Distance Down* se dá apenas nesses casos de fluxos de detritos canalizados, ou em trechos de propagação pelo canal de drenagem.

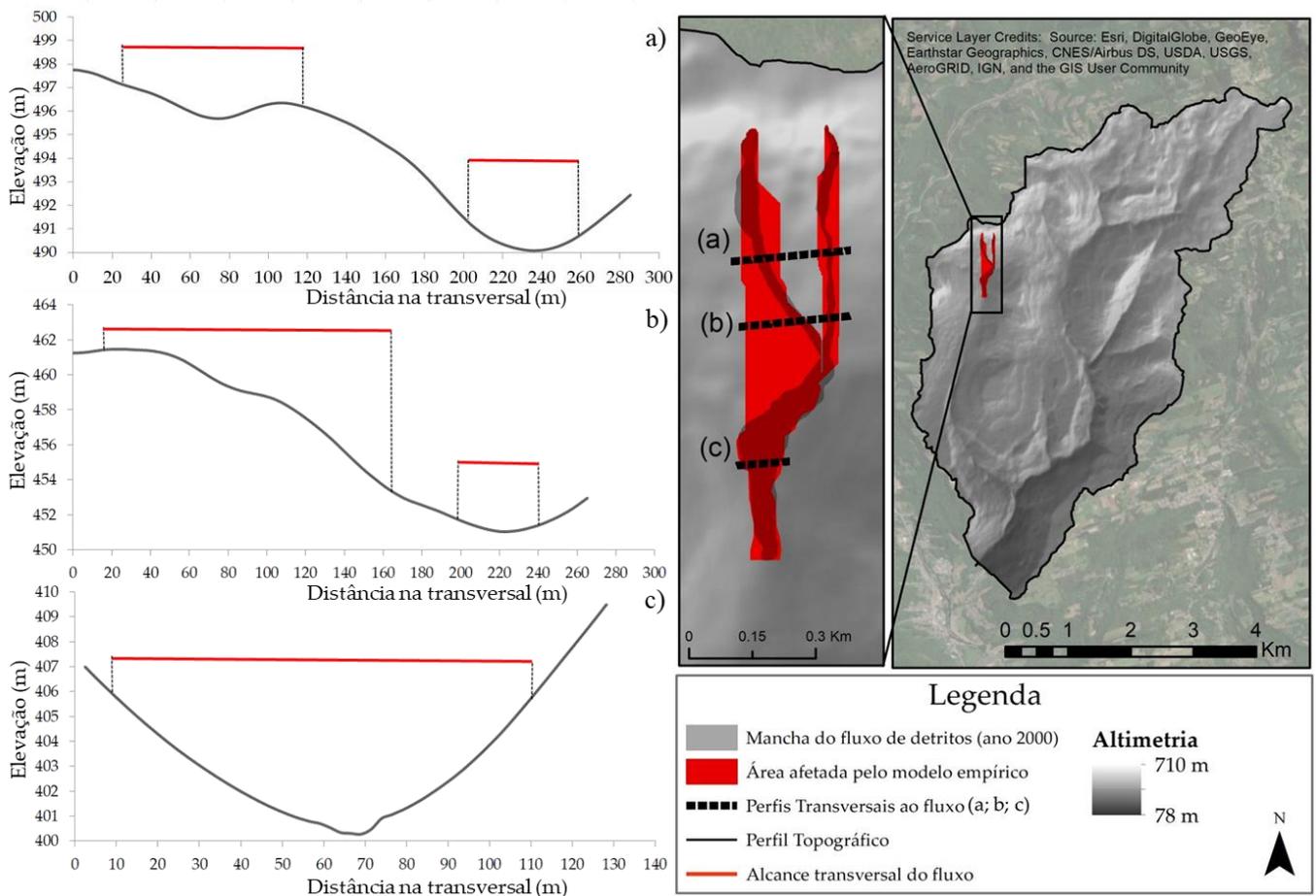


Figura 6. a) Perfis topográficos de seções transversais (a; b; c) com passagem do fluxo de detritos.

4.3. Comparação Modelo Kanako-2D

Ao confrontarmos exclusivamente o fluxo de detritos ocorrido no ano de 2000 partindo da cicatriz ao leste com os resultados obtidos pelo modelo de descritores da paisagem e do Kanako-2D é possível identificar vantagens e limitações de ambos os modelos (Figura 7). O trecho de fluxo a oeste, em condições de menor confinamento e possível baixa representação do terreno previamente ao evento, foi desconsiderado na simulação do Kanako-2D, concentrando um volume inicial de ambas as cicatrizes (20.000 m³) deslocado exclusivamente da cicatriz ao leste. Além disso, a simulação é considerada apenas a partir do trecho considerado por Kobiyama et al. (2018) com maior probabilidade de ocorrência da zona de transporte, onde a simulação foi feita em 2D, sendo desprezada a área de iniciação do evento, pois é simulada apenas em 1D pelo modelo. Ambos os modelos excederam os limites de delimitação da mancha mapeada no trecho inicial de propagação, embora o Kanako-2D tenha considerado maior volume de entrada. A maior discrepância, no entanto, é representada pelo alcance do fluxo e pela dispersão na região de jusante da cicatriz. Considerando relativamente as duas simulações, em iguais condições, a taxa de verdadeiros positivos obtida pelo Kanako-2D foi 25% menor que no modelo com descritores da paisagem, indicando um pior desempenho.

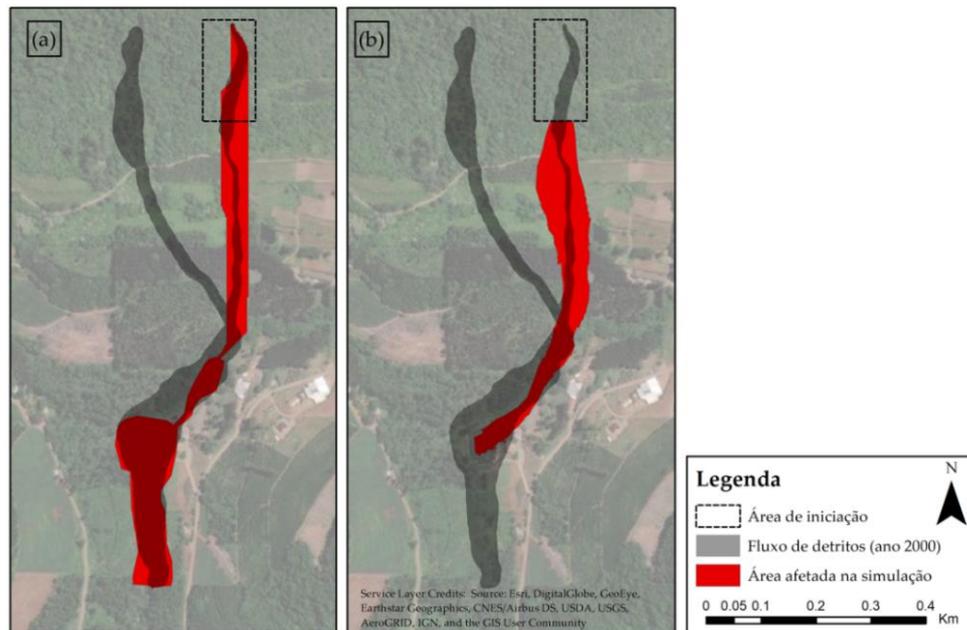


Figura 7. a) Área afetada pelo modelo, considerando apenas a cicatriz ao leste como origem. b) Área afetada obtida pela simulação com Kanako-2D (KOBAYAMA et al., 2018).

4.4. Mapa de Suscetibilidade a fluxos de detritos para bacia do arroio Jaguar

O mapa de suscetibilidade a fluxo de detritos foi gerado considerando os parâmetros calibrados para a bacia do arroio Jaguar com o MDT de melhor resolução, 2,5 metros (Figura 8). Embora o modelo resulte na propagação e alcance do fluxo, a distribuição das áreas indicadas como suscetíveis é fortemente vinculada à distribuição das áreas de origem, de forma que a sensibilidade do modelo depende da representatividade do modelo de suscetibilidade a escorregamentos translacionais considerado. Ao confrontar o mapa de suscetibilidade a fluxos de detritos gerado pelos descritores da paisagem com a carta de suscetibilidade a corridas de massa disponível para o município de Alto Feliz (CPRM, 2014), resulta em uma grande discrepância, limitando a uma única sub-bacia de área suscetível. A carta disponível para o município inclusive desconSIDERA regiões com registros de ocorrência de fluxo de detritos, como o próprio evento do ano de 2000.

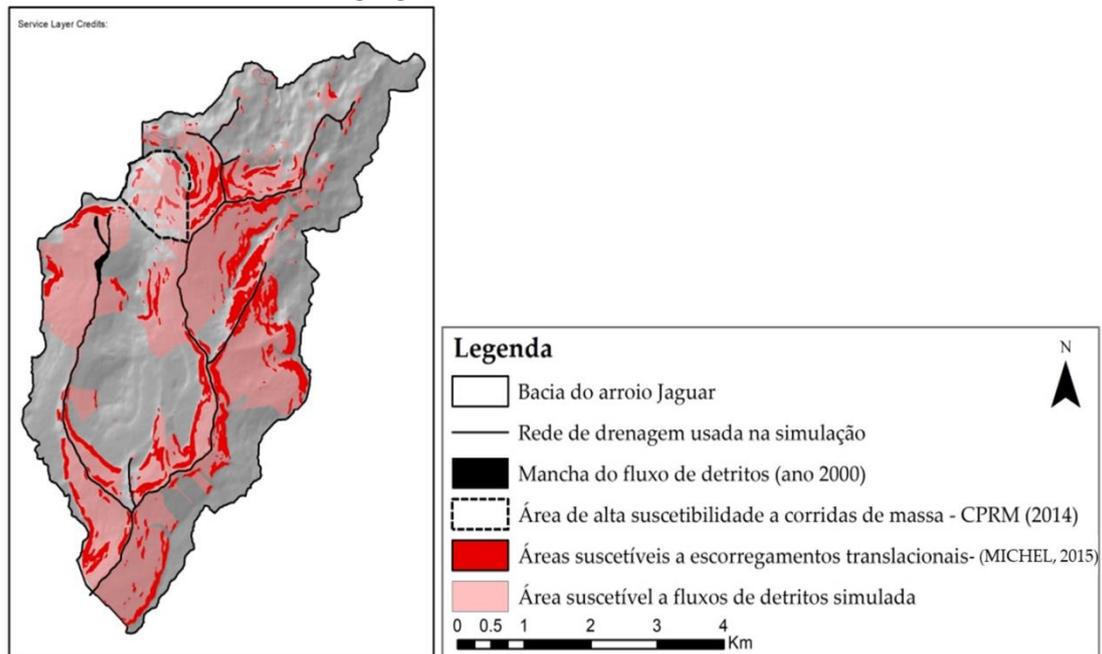


Figura 8. Mapa de suscetibilidade a fluxos de detritos na bacia do arroio Jaguar.

5. Discussão

Grande parte dos modelos de suscetibilidade a fluxos de detritos não diferencia a sua aplicação entre fluxos de detritos canalizados e de encosta aberta. Embora a própria diferenciação entre esses movimentos não seja quantitativamente objetiva, é evidenciado que existe uma diferença de comportamento. Ao contrário dos fluxos de detritos canalizados, fluxos de detritos de encosta aberta podem espalhar lateralmente após a sua mobilização (HÜRLIMANN, McARDELL e RICKLI, 2015), e não necessariamente atingem o canal de drenagem. Portanto, podem ser inteiramente adequadamente representados apenas pela *Avalanche Runout*. No entanto, como apresentado pela cicatriz mais a oeste, o modelo pode acabar superestimando a dispersão lateral do fluxo, aumentando a taxa de falsos positivos da simulação.

Já os fluxos de detritos canalizados, geralmente propagados em encostas com maior confinamento da vertente, ou até mesmo inseridos a maior parte do tempo no canal de drenagem, podem apresentar um melhor desempenho da simulação com o modelo proposto. A simulação do trecho da cicatriz mais ao leste evidencia uma melhor representação do modelo no fluxo de detritos do evento de 2000. No entanto, apenas com a *Avalanche Runout* a simulação dos fluxos de detritos canalizados pode acabar confinada no canal de drenagem. Não obstante os fluxos de detritos canalizados passem a propagar pelo canal transformados em inundações de detritos, caracterizadas pela elevada concentração de sedimentos e aumento da vazão no canal, a redução da declividade do terreno favorece a deposição dos materiais de maior dimensão presentes no fluxo, especialmente às margens do canal de drenagem, de forma que o uso da *Distance Down* se mostra conveniente e necessário nesses casos.

Em ambos os tipos de propagação dos fluxos de detritos a definição do ângulo de alcance segue como critério de parada do movimento. O valor calibrado no evento, de um ângulo de alcance de 12° é condizente com a literatura (JOHNSON, SWANSTON e MCGEE, 2000; HUNGR, MORGAN, e KELLERHALS, 1984), resultando em uma boa representação da mancha da área afetada. Já o limiar de proporção e a altura de material do fluxo podem ser considerados como coeficientes de calibração, uma vez que não necessariamente representam diretamente variáveis físicas do movimento. Embora a profundidade do fluxo possa ser medida, é um parâmetro difícil de ser obtido, e representa bastante variabilidade às condições de confinamento da encosta. Por conseguinte, é igualmente tratada como um parâmetro empírico, a fim de representar o alcance de espalhamento do fluxo sobre os canais de drenagem, e podendo ser estimada a partir de outros parâmetros como por exemplo, o volume associado ao movimento. Reid et al. (2016) consideram um valor de profundidade variável em função da área de seção transversal, a qual é indiretamente estimada em função da área de contribuição em cada trecho de propagação do fluxo. Essa condição permite representar com melhor assertividade as variações de confinamento do terreno, embora o modelo proposto por Reid et al. (2016) não represente adequadamente as áreas de iniciação antecedentes à incorporação nos canais de drenagem.

A propagação dos fluxos de detritos é resultante de diversos fatores, especialmente do volume de material envolvido (RICKENAMANN, 2005), sendo frequentemente associado a diferentes variáveis, em particular a área de ruptura (MEIER et al. 2020), que apresenta influência direta sobre a propagação do modelo. O modelo empírico a partir de descritores da paisagem proposto neste trabalho não considera diretamente o volume, embora já existam relações entre o volume e o ângulo de alcance (COROMINAS, 1996; ZHOU et al., 2019) que podem ser indiretamente utilizadas para inclusão da variável nas simulações. Toyos et al. (2007) propuseram um modelo com aplicação em SIG que utiliza relações empíricas do volume para determinar o ângulo de alcance da simulação. No entanto, a relação empírica é proposta com base em poucos eventos de fluxos de detritos da região, o que acaba restringindo a utilização apropriada do modelo em outras localidades. Estudos como Corominas (1996) e Legros (2002) resultam da análise de diversos eventos, o que garante maior representatividade de abordagens empíricas. Ainda assim, a utilização de dados locais, mesmo que em menor quantidade, consiste na melhor alternativa para modelagem.

Modelos empíricos são especialmente recomendados para análise preliminar, permitindo aplicação em larga escala, com poucos recursos e relativamente baixo esforço computacional. Essas condições facilitam a geração de mapas de suscetibilidade a fluxos de detritos, que por sua vez acabam sendo fortemente atrelados à definição de áreas de origem. Portanto, uma superestimativa de áreas suscetíveis a fluxos de detritos é decorrente da incerteza no estabelecimento das áreas propensas a escorregamentos translacionais, uma vez que fluxos de detritos muitas vezes se manifestam como extensão das áreas sujeitas a escorregamentos ao longo da encosta e dos canais. Em comparação, a aplicação de modelos fisicamente embasados requer profundo reconhecimento de parâmetros de entrada, muitas vezes difíceis de serem estimados, sendo na maioria das vezes localmente aplicados. Dessa forma,

a incerteza trazida pelos modelos empíricos, associada à própria metodologia, é de certa forma compensada pela redução das incertezas incorporadas em função do uso de uma grande quantidade de parâmetros. Por conseguinte, uma vez que o interesse seja exclusivamente o alcance do fluxo ou uma estimativa preliminar da área afetada, considerando a complexidade de modelos como o Kanako-2D e a facilidade de aplicação dos descritores da paisagem, desde que disponível um MDT de qualidade e tendo conhecimento das variáveis empíricas da região ou proximidades, com base em eventos passados, pode-se obter bons resultados a partir dos modelos empíricos.

6. Conclusões

Conforme previsto pela Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (BRASIL, 2012) é necessário realizar o mapeamento de áreas suscetíveis a desastres, incluindo fluxos de detritos, especialmente por serem movimentos associados a grande potencial destrutivo. Embora modelos mais complexos e de maior precisão contribuam com resultados detalhados e riqueza de informação, modelos simplificados e empíricos trazem maior agilidade e abrangência de resultados, permitindo o uso em grande escala com propósito preliminar. Ademais, o modelo proposto a partir dos descritores da paisagem, no estudo de caso utilizado, obteve melhores resultados quando comparados à simulação realizada a partir de um modelo fisicamente embasado.

O uso de descritores da paisagem é quase que exclusivamente associado aos modelos digitais de elevação e a extensão das áreas de origem, de forma que a disponibilidade de modelos de elevação de qualidade satisfatória é fundamental para o seu desempenho, bem como uma delimitação adequada das áreas de iniciação. No entanto, a principal limitação associada ao uso dos descritores da paisagem para análise de suscetibilidade aos fluxos de detritos consiste em estabelecer os parâmetros de calibração com melhor desempenho na área de interesse. A identificação desses parâmetros no estudo de caso resultou em mais de 90% de verdadeiros positivos. Não obstante, ressalta-se como limitação do trabalho utilizar um único evento, devido à ausência de registros do histórico de ocorrências na região. Além disso, outra importante limitação, associada à mesma problemática de ausência de registros, é a falta de validação dos parâmetros pela simulação em outro evento ocorrido na bacia.

Apesar das incertezas envolvidas na calibração exclusiva por um único evento e da utilização de dados com possíveis modificações do terreno e alterações de curvatura, configurando as principais limitações do trabalho, foram obtidos os seguintes valores para os parâmetros requeridos: (i) ângulo de alcance de 12°; (ii) limiar de proporção de 0,37; e (iii) altura de material do fluxo de 5 metros. Recomenda-se a calibração utilizando uma maior quantidade de eventos, o que indica uma limitação de modelos empíricos, diretamente vinculados aos dados históricos do local. A validação do modelo em áreas com maior registro de ocorrências também é necessária, a fim de verificar a representatividade dos parâmetros em toda a bacia. A elaboração de inventários de cicatrizes e o registro de ocorrências de movimentos de massa, especialmente envolvendo fluxos de detritos, é imprescindível para garantir a aplicabilidade e melhor desempenho de modelos empíricos. Portanto, ressalta-se a importância em armazenar e manter bancos de dados de diferentes localidades. O levantamento e registro de informações logo após um evento confere maior confiabilidade além de facilidade na obtenção dos dados.

O mapa de suscetibilidade a fluxos de detritos, gerado para bacia do arroio Jaguar, constatou que a metodologia utilizada para elaboração das cartas atualmente disponíveis para grande parte dos municípios do país, incluindo Alto Feliz, pode estar subestimando o total de áreas propensas a fluxos de detritos. Enfatizando a importância no desenvolvimento de novos modelos para análise de suscetibilidade a fluxo de detritos, os descritores da paisagem configuram uma alternativa eficiente e pouco onerosa. A principal limitação associada ao modelo procede da necessidade de dados de eventos anteriores para utilização na calibração dos parâmetros, ou da utilização de dados já disponíveis em bacias de características semelhantes. Não obstante, considerando a crescente demanda por prevenção de desastres no Brasil, e a inviabilidade de aplicação de modelos complexos em escala nacional, metodologias como *Avalanche Runout* e *Distance Down* são consideradas bastante promissoras e eficientes, principalmente para aplicação em estudos preliminares e locais com pouco recurso e baixa disponibilidade e detalhamento de dados.

Contribuições dos Autores: C.G.S.: Concepção, Metodologia, Validação, Análise formal, Investigação, Curadoria de dados, Redação – versão inicial, G.P.M.: Concepção, Recursos, Redação – revisão e edição, Supervisão, Administração do projeto e Aquisição de financiamento.

Financiamento: Este trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS. Agradecem também aos colegas do Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN) envolvidos na obtenção e tratamento de dados, e aos revisores pelas contribuições apresentadas.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. BEE, E. J.; DASHWOOD, C.; PENNINGTON, C.; CIUREAN, R. L.; LEE, K. Creating a national scale debris flow susceptibility model for Great Britain: a GIS-based heuristic approach, *Natural Hazards Earth System Science Discuss.*, 2019. DOI. 10.5194/nhess-2019-54
2. BEGUERÍA, S. et al. A GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain. *Natural Hazards and Earth System Science*, v. 9, n. 6, p. 1897-1909, 2009. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1897-2009>
3. BRASIL. Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC. Lei nº 12.608 de 10 de abril de 2012. *Diário Oficial da União*. Brasília, DF. 2012.
4. COBRADE. **Classificação e Codificação Brasileira de Desastres**. Instrução normativa nº 01. 2012.
5. COROMINAS, J. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(2), 260-271. 1996. DOI. 10.1139/t96-131
6. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Cartas de Suscetibilidade a movimentos gravitacionais e inundação**. Alto Feliz, RS. 2014. Escala 1:30.000.
7. CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Prevencao-de-Desastres/Cartas-de-Suscetibilidade-a-Movimentos-Gravitacionais-de-Massa-e-Inundacoes-5379.html>> Acesso em: 18 jan. de 2021.
8. Esri Inc. **ArcMap (versão 10.4.1)**. Redlands, Estados Unidos, 2016.
9. FACURI, G. G; PICANÇO, J. L. Evaluations and proposals for the debris flow hazard mapping method of the GIDES Project. *Landslides*, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 339-352, 2020. Springer Science and Business Media LLC.
10. FANNIN, R.J.; WISE, M.P. An empirical-statistical model for debris flow travel distance. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, p. 982-994. 2001. DOI. 10.1139/t01-030
11. GRILC, Z. **Ocena ogroženosti zaradi snežnih plazov v Julijskih Alpah s pomočjo geografskih informacijskih sistemov**. Dissertação – Oddelek za Geografijo, Filozofska Fakulteta, Univerza V Ljubljana. Ljubljana. 2016. 82 p. (Sueco).
12. GUINAU, M. VILAJOSANA, I.; VILAPLANA, J. M. GIS-based debris flow source and Runout susceptibility assessment from DEM data – a case study in NW Nicaragua. *Natural Hazards and Earth System Science*. 7, p. 703-716. 2007. DOI 10.5194/nhess-7-703-2007.
13. HEIM, A. A. **Der Bergsturz und Menschenleben**. Zurich: Fretz and Wasmuth Verlag: p. 218. 1932.
14. HUNGR, O.; MORGAN, G.C.; KELLERHALS, R. (1984). Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 21, pp 663-677. 1984.
15. HÜRLIMANN, M; MCADELL, B. W.; RICKLI, C. Field and laboratory analysis of the runout characteristics of hillslope debris flows in Switzerland. *Geomorphology* [S.L.], v. 232, p. 20-32, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.11.030>
16. IMAIZUMI, F.; HAYAKAWA, Y. S.; HOTTA, N.; TSUNETAKA, H.; OHSAKA, O.; TSUCHIYA, S. Relationship between the accumulation of sediment storage and debris-flow characteristics in a debris-flow initiation zone, Ohya landslide body, Japan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, p. 1923-1938. 2017. DOI. 10.5194/nhess-17-1923-2017
17. JOHNSON, A.C., SWANSTON, D.N.; MCGEE, K.E. Landslide initiation, runout, and deposition within clearcuts and old-growth forests of Alaska. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(1), p. 17-30. 2000. DOI 10.1111/j.1752-1688.2000.tb04245.x
18. KANG, S.; LEE, S-R. Debris flow assessment based on empirical approach in the cenral region of South Korea. *Geomorphology*, 308, p. 1-12. 2018. DOI 10.1016/j.geomorph.2018.01.025
19. KAPPES, M. S.; MALET, J. P.; REMAITRE, A.; HORTON, P.; JABOYEDOFF, M.; BELL, R. Assessment of debris-flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 11, n. 2, p. 627-641. 2011. DOI 10.5194/nhess-11-627-2011

20. KORNEJADY, A.; OWNEGH, M.; BAHREMAD, A. Landslide susceptibility assesstment using maximum entropy model with two different data sampling methods. **Catena**. 152, p. 144-162. 2017. DOI. 10.1016/j.catena.2017.01.010
21. KOBAYAMA, M.; MICHEL, R. D. L. ; PAIXÃO, M. A.; MICHEL, G. P. Small fish-pond design for debris flow disaster measure with Kanako-2D. In Symposium Proceedings of the INTERPRAENENT 2018 in the Pacific Rim. **Proceedings**. 2018. p. 267.
22. KRITIKOS, T.; DAVIES, T. 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. 2014. DOI. 10.1007/s10346-014-0533-6
23. LEGROS, F. The mobility of long-runout landslides. **Engineering Geology**, [S.L.], v. 63, n. 3-4, p. 301-331, 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0013-7952\(01\)00090-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0013-7952(01)00090-4).
24. McDOUGALL, S., MCKINNON, M.; HUNGR, O. Developments in landslide runout prediction. In CLAGUE, J. e STEAD, D. (Eds.), **Landslides: Types, Mechanisms and Modeling**. Cambridge: Cambridge University Press. 2012. p. 187-195. DOI 10.1017/CBO9780511740367.017
25. MCKINNON, M. **Landslide Runout Statistical Analysis of Physical Characteristics and Model Parameters**. Dissertação, Geofísica– The University of British Columbia, Vancouver, Canada. 2010. 405 p. DOI. 10.14288/1.0052933
26. MEIER, C.; JABOYEDOFF, M.; DERRON, M-H.; GERBER, C. A method to assess the probability of thickness and volume estimates of small and shallow initial landslide ruptures based on surface area. **Landslides**, 17, p. 975-982. 2020. DOI 10.1007/s10346-020-01347-0
27. MELO, R.; ZÉRERE, J. Modeling debris flow initiation and runout in recently burned areas using data-driven methods. **Natural Hazards**. 88, p. 1373-1407. 2017. DOI 10.1007/s11069-017-2921-4
28. MICHEL, G.P. **Estimativa da profundidade do solo e seu efeito na modelagem de escorregamentos**. 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. 165 p.
29. 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. DOI 10.13101/IJECE.1.62
30. NUNES, A.L.L.S.; RIOS FILHO, M.G. Barreiras flexíveis para mitigação de fluxo de detritos. In Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, V, 2009, São Paulo. **Anais**. ABMS, 2009. 10p.
31. O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y.; FULLERTON, W. T. Two-Dimensional Water Flood and Mudflow Simulation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 119, n. 2, p. 244–261, 1993. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244)
32. O'CALLAGHAN, J.F.; MARK, D.M. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, 28, p. 328-344. 1984. DOI. 10.1016/S0734-189X(84)80011-0
33. PARK, D.W.; LEE, S.R.; VASU, N.N.; KANG, S.H.; PARK, J.Y. Coupled model for simulation of landslides and debris flows at local scale. **Natural Hazards** 81, p. 1653–1682. 2016. DOI. 10.1007/s11069-016-2150-2
34. PASTORELLO, R.; MICHELINI, T.; D'AGOSTINO, V. On the criteria to create susceptibility map to debris flow at a regional scale using Flow-R. **Journal of Mountain Science**, 14(4), p. 621-635. 2017. DOI. 10.1007/s11629-016-4077-1
35. REID, M. E.; JEFFREY, A. C.; DIANNE, L. B. Forecasting inundation from debris flows that grows volumetrically during travel, with application to the Oregon Coast Range, USA. **Geomorphology**, 273, p. 396-411. 2016. DOI. 10.1016/j.geomorph.2016.07.039
36. RENNÓ, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3469-3481. 2008. DOI. 10.1016/j.rse.2008.03.018
37. RICKENMANN, D. Runout Prediction Methods. In: JAKOB, M.; HUNGR, O. **Debris Flow Hazards and Related Phenomena**. Berlin. Springer Berlin Heidelberg: Praxis. 2005. p. 305-324. DOI. 10.1007/b138657
38. SCHEEVEL, C. R. **Predicting Landslides Stability, Runout and Failure Velocity at Cook Lake Landslide, Wyoming**. Dissertação. Engenharia Geológica. Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School of Mines. Colorado (EUA). 2007.
39. TARBOTON, T. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, 33 (2), p. 309-319, 1997. DOI 10.1029/96WR03137
40. TESFA, T. K.; TARBOTON, D. G.; WATSON, D. W.; SCHREUDERS, K.A.T.; BAKER, M. E.; WALLACE, R. M.. Extraction of hydrological proximity measures from DEMs using parallel processing. **Environmental Modelling & Software**, [S.L.], v. 26, n. 12, p. 1696-1709. 2011. Elsevier BV. DOI. 10.1016/j.envsoft.2011.07.018.
41. TOYOS, G.; ORAMAS DORTA, D.; OPPENHEIMER, C.; PARESCHI, M. T.; SULPIZIO, R.; ZANCHETTA, G. GIS-assisted modelling for debris-flow hazard assessment based on the events of May 1998 in the area of Sarno, southern Italy: Part I. Maximum run-out. **Earth Surface Processes and Landforms**, 32, p. 1491–1502. 2007. DOI. 10.1002/esp.1472

42. ZHOU, W.; FANG, J.; TANG, C.; YANG, G. Empirical relationships for the estimation of debris flow runout distances on depositional fans in the Wenchuan earthquake zone. **Journal of Hydrology**, 577, 11p. 2019. DOI /10.1016/j.jhydrol.2019.12393
43. ZIMMERMANN, M. **Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz**, 1ª Ed. NFP 31 Schlussbericht, Zurich. VDF Hochschulverlag an der ETH. 1997. 162p. (Alemão).



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.